

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN
CÜRUFU HARÇLARIN PERFORMANSININ
GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Aylin ÖZODABAŞ

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMESİ

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Kemalettin YILMAZ

Şubat 2014

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN
CÜRUFU HARÇLARIN PERFORMANSININ
GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

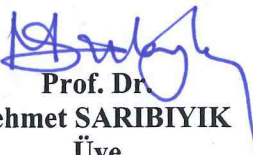
Aylin ÖZODABAŞ

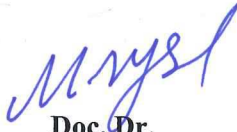
Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ


Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMESİ

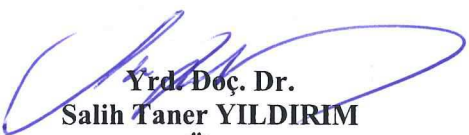
Bu tez **13/02/2014** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Kemalettin YILMAZ
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Mehmet SARIBIYIK
Üye


Doç. Dr.
Mücteba UYSAL
Üye


Yrd. Doç. Dr.
Hasan YILDIRIM
Üye


Yrd. Doç. Dr.
Salih Taner YILDIRIM
Üye

TEŞEKKÜR

Doktora tez programının y¼r¼t¼lmesi esnasında, çalıőmalarına y¼n vererek yardım ve bilgi konusunda bana her t¼rl¼ desteği sağlayan danıőman hocam, sayın Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ' a içtenlikle teőekk¼rlerimi sunarım.

Araőtırma kapsamında deneysel çalıőmalarım sırasında bana maddi ve manevi olarak yardımcı olan baőtta eőim Mustafa ÖZODABAŞ, kızım İpek ÖZODABAŞ' a ve aileme teőekk¼r¼ bir borç bilirim.

Makalemi hazırlarken benden desteklerini esirgemeyen arkadaőım Yrd. Doç. Dr. Halil ÇALIŐKAN' a, ve deneysel çalıőmalarımda bana yardımcı olan arkadaőım Arő. Gör. Dr. Serdar AYDIN' a, Karçimsa'daki teknik desteklerinden dolayı Mehmet FURUNCU' ya çalıőmalarım esnasında kullandığım ponzanın elde edilmesinde katkı sağlayan Mikromin Firmasına ve Karçimsa' da deneylerimi yapmamı sağlayan Akçansa Yetkililerine teőekk¼rlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	xiii
ÖZET	xvii
SUMMARY	xviii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Yüksek Fırın Cürufu	9
1.2. Uçucu Kül	15
1.3. Ponza.....	20
1.4. Sönmüş Kireç (Ca(OH) ₂).....	23
1.5. Alkaliler	24

BÖLÜM 2.

KONU İLE İLGİLİ YAPILMIŞ OLAN LİTERATÜR ÇALIŞMALARI.....	34
2.1. Alkali Aktive Edilen Harçların Dayanım ve Dayanıklılığı İle İlgili Yapılmış Olan Çalışmalar.....	34
2.2. Alkali Aktive Edilen Harçların, Atık Malzemeler ve Kimyasal Katkılar İle Kullanımının Araştırılması Üzerine Yapılmış Olan Çalışmalar ..	43

BÖLÜM 3.

DENEYSSEL ÇALIŞMALAR	53
3.1. Kullanılan Malzemeler	53
3.1.1. Yüksek fırın cürufu.....	53
3.1.2. Uçucu kül.....	53
3.1.3. Ponza	53
3.1.4. Portland Çimentosu	54
3.1.5. Agregası	54
3.1.6. Alkali	55
3.1.7. Karışımların Hazırlanması.....	56
3.2. Uygulanan Deneysel Yöntemleri	58
3.2.1. Basınç ve eğilme deneyleri.....	58
3.2.2. Priz sürelerinin belirlenmesi	61
3.2.3. Hacim genişleme tayini	63
3.2.4. İncelik tayini	64
3.2.5. Elek analizi	66
3.2.6. Özgül ağırlık deneyi	67
3.2.7. Kuruma büzülmesi deneyi	68
3.2.8. Dayanıklılık deneyleri	69
3.3. Deneysel Çalışmalarda İlk Aşama.....	70
3.3.1. Toz halinde alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu (AAYFCT) kullanılarak elde edilen karışımların deney sonuçları.....	70
3.4. Yüksek Fırın Cürufu Karışımlarına Sönmüş Kireç Eklenmesi	87
3.5. Deneysel Çalışmalarda İkinci Aşama	93
3.5.1. Belirli sodyum oksit oranlarındaki (%2 Na ₂ O) harç karışımlarının farklı silikat modülü (M _S) ile çalışılması.....	94
3.5.2. Belirli sodyum oksit oranlarındaki (%4 Na ₂ O) harç karışımları	98
3.5.3. Belirli sodyum oksit oranlarındaki (%4 Na ₂ O) harç karışımları	105
3.5.4. Belirli sodyum oksit oranlarındaki (%6 Na ₂ O) harç karışımları	111

3.5.5. Belirli sodyum oksit oranlarındaki (%7 Na ₂ O) harç karışımları	117
3.5.6. Belirli sodyum oksit oranlarındaki (%8 Na ₂ O) harç karışımları	125
3.6. Deneysel Çalışmalarda Üçüncü Aşama.....	132
3.6.1. Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçlar ile uçucu kül içerikli harç karışımları.....	132
3.6.2. Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu ile ponza içerikli harç karışımları.....	146
3.7. Deneysel Çalışmalarda Dördüncü Aşama	159
3.7.1. Sülfat etkisi	159
3.7.2. Kuruma büzülmesi	171
3.8. Mikroyapı İncelemeleri.....	173
BÖLÜM 4.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	183
KAYNAKLAR	186
ÖZGEÇMİŞ	201

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

NaOH	: Sodyum hidroksit
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum silikat
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum hidroksit
MgSO ₄	: Magnezyum sülfat
Na ₂ SO ₄	: Sodyum sülfat
AAYFC	: Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu
AAYFCT	: Toz halinde alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu
Na ₂ O	: Sodyum oksit
M _s	: Silikat modülü
UK	: Uçucu kül
P	: Ponza
TSE	: Türk standart
ASTM	: Amerikan standart

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Dünya'daki CO ₂ emisyonları ve çimento üretiminin endüstri üretimindeki oranı [177]	2
Şekil 1.2.	Avrupa çimento birliği üye ülkelerinde çimento tüketim değerleri (2010 Cembureau, Activity Report 2010) [177].....	2
Şekil 1.3.	Yüksek fırın cürufunun üretim sürecinin şematik olarak gösterimi [57].....	9
Şekil 1.4.	F tipi uçucu kül [57].....	19
Şekil 1.5.	C tipi uçucu kül [57]	19
Şekil 1.6.	CEM I ile UK karışımli harç numunelerinin Na ₂ SO ₄ ile aktive edilmesi sonucu basınç dayanım değerlerinin birbirleriyle karşılaştırılması [57]	30
Şekil 1.7.	Sodyum silikat alkalisinin su içindeki yüzey tabakasında iyon konsantrasyonlarının çözünmesi [57]	33
Şekil 2.1.	CO ₂ bakımından zengin atmosfere maruz AAYFC betonlarının SEM (BSE) görüntüsü [84].....	35
Şekil 2.2.	AAYFC ve CEM I harçlarının 0.352 M NaHCO ₃ (Sodyum bikarbonat, soda) çözeltisi içindeki karbonatlaşma derinlikleri [57].....	36
Şekil 2.3.	%20 CO ₂ ve %70 bağıl nem içindeki AAYFC ve CEM I harçlarının karbonatlaşma derinlikleri [57]	36
Şekil 2.4.	Nitrik asit (pH:3) etkisindeki AAYFC ve CEM I harçlarının korozyona uğramış derinliklerinin birbirleriyle kıyaslanması [57]	40
Şekil 2.5.	Asetik asit (pH:3) etkisindeki AAYFC ve CEM I harçlarının korozyona uğramış derinliklerinin birbirleriyle kıyaslanması [57]	41
Şekil 3.1.	Deneysel çalışmaların özetini gösteren şema	57

Şekil 3.2.	Eğilme ve basınç deney cihazları.....	59
Şekil 3.3.	Sarsma aleti.....	59
Şekil 3.4.	Kür odası.....	60
Şekil 3.5.	%90 Bağıl nemde ve 20 °C sıcaklıkta kalıpta 1 gün bekletilen harç numuneleri	60
Şekil 3.6.	Üretilen harç numuneleri	61
Şekil 3.7.	Vicat kalıpları ve aleti.....	63
Şekil 3.8.	Le-chatelier aparatı	64
Şekil 3.9.	Blaine cihazı.....	66
Şekil 3.10.	Elek analiz cihazı	67
Şekil 3.11.	Le-chatelier şişesi ve etüv aleti	68
Şekil 3.12.	Komparatör aleti	69
Şekil 3.13.	Sülfatlı sularda bekletilen numuneler	69
Şekil 3.14.	AAFYCT içerikli numunelerin 2 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	83
Şekil 3.15.	AAFYCT içerikli numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	84
Şekil 3.16.	AAFYCT içerikli numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	85
Şekil 3.17.	AAFYCT içerikli numunelerin 2, 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	86
Şekil 3.18.	YFC+Ca(OH) ₂ numunelerde 2 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	90
Şekil 3.19.	YFC+Ca(OH) ₂ numunelerde 7 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	91
Şekil 3.20.	YFC+Ca(OH) ₂ numunelerde 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	92
Şekil 3.21.	YFC+Ca(OH) ₂ numunelerde 2, 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	93

Şekil 3.22.	%2 Na ₂ O oranlı, AAYFC içerikli kaynatılmış numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanımların kaynatılmamış numunelerle karşılaştırılması (MPa).....	97
Şekil 3.23.	%4 Na ₂ O oranlı, AAYFC içerikli numunelerin 2 günlük eğilme ve basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)	101
Şekil 3.24.	%4 Na ₂ O oranlı, AAYFC içerikli numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)	102
Şekil 3.25.	%4 Na ₂ O oranlı, AAYFC içerikli numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)	103
Şekil 3.26.	%4 Na ₂ O oranlı, AAYFC içerikli numunelerin numunelerde 2, 7 ve 28 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa).....	104
Şekil 3.27.	%4 Na ₂ O oranlı, AAYFC içerikli numunelerin numunelerde 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)	104
Şekil 3.28.	%4 Na ₂ O içerikli numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	108
Şekil 3.29.	%4 Na ₂ O içerikli numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	109
Şekil 3.30.	%4 Na ₂ O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri	110
Şekil 3.31.	%6 Na ₂ O içerikli numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	114
Şekil 3.32.	%6 Na ₂ O içerikli numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri.....	115
Şekil 3.33.	%6 Na ₂ O içerikli numunelerin 90 günlük basınç dayanım değerleri	116
Şekil 3.34.	%6 Na ₂ O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri	117
Şekil 3.35.	%7 Na ₂ O içerikli numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	121

Şekil 3.36.	%7 Na ₂ O içerikli numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	122
Şekil 3.37.	%7 Na ₂ O içerikli numunelerin 90 günlük basınç dayanım değerleri	123
Şekil 3.38.	%7 Na ₂ O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	124
Şekil 3.39.	%8 Na ₂ O içerikli numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	128
Şekil 3.40.	%8 Na ₂ O içerikli numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	129
Şekil 3.41.	%8 Na ₂ O içerikli numunelerin 90 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	130
Şekil 3.42.	%8 Na ₂ O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)	131
Şekil 3.43.	AAyFC+UK içerikli numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)	138
Şekil 3.44.	AAyFC+UK içerikli numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)	139
Şekil 3.45.	AAyFC+UK içerikli numunelerin 28 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)	140
Şekil 3.46.	AAyFC+UK içerikli numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)	141
Şekil 3.47.	AAyFC+UK içerikli numunelerin 90 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)	142
Şekil 3.48.	AAyFC+UK içerikli numunelerin 90 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)	143
Şekil 3.49.	AAyFC+UK içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)	144
Şekil 3.50.	AAyFC+UK içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)	145
Şekil 3.51.	AAyFC+P içerikli numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)	151

Şekil 3.52.	AAAYFC+P içerikli numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)	152
Şekil 3.53.	AAAYFC+P içerikli numunelerin 28 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)	153
Şekil 3.54.	AAAYFC+P içerikli numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)	154
Şekil 3.55.	AAAYFC+P içerikli numunelerin 90 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)	155
Şekil 3.56.	AAAYFC+P içerikli numunelerin 90 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)	156
Şekil 3.57.	AAAYFC+P içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)	157
Şekil 3.58.	AAAYFC+P içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)	158
Şekil 3.59.	Sülfat iyonlarının betona sızması sonucu C ₃ A'nın genişmesi ile etrenjit oluşumu	160
Şekil 3.60.	Sülfatlı sularda bekletilen numuneler	161
Şekil 3.61.	AAAYFC, AAAYFC+P ve AAAYFC+UK içerikli numunelerin Na ₂ SO ₄ ve Mg SO ₄ çözeltileri içinde 90 gün bekletilerek elde edilen basınç dayanım değerleri.....	167
Şekil 3.62.	Na ₂ SO ₄ çözeltisi içerisinde bekletilen 90 günlük numunelerin basınç dayanımları	168
Şekil 3.63	MgSO ₄ çözeltisi içerisinde bekletilen 90 günlük numunelerin basınç dayanımları	169
Şekil 3.64.	Sülfatlı çözeltiler içerisinde bekletilen 180 günlük numunelerin basınç dayanımlarının birbirleriyle kıyaslanması (Mpa)	170
Şekil 3.65.	Kuruma büzülmesi deneyi için üretilen numuneler	172
Şekil 3.66.	AAAYFC, AAAYFC+P ve AAAYFC+UK içerikli numunelerin kuruma büzülmesi değerleri.....	173
Şekil 3.67.	Kırık yüzey incelemelerinde kullanılmak üzere ayrılan numunelerin görüntüsü	174
Şekil 3.68.	%50YFC+%10P Ms=0.75 karışımı SEM görüntüsü – 15.000x...	174

Şekil 3.69.	%70YFC+%10P Ms=1.00 karışımı SEM görüntüsü – 500x.....	175
Şekil 3.70.	%75YFC+%5P Ms=0.75 karışımı SEM görüntüsü – 100.000x...	176
Şekil 3.71.	%40 YFC Ms=0.50 karışımı SEM görüntüsü – 100x.....	176
Şekil 3.72.	%60 YFC Ms=0.50 karışımı SEM görüntüsü – 50.000x.....	177
Şekil 3.73.	%50 YFC + %10 P Ms=1.00 karışımı SEM görüntüsü – 5000x..	178
Şekil 3.74.	%40 YFC Ms=0.50 karışımı SEM görüntüsü – 50.000x.....	179
Şekil 3.75.	%40 YFC Ms=0.75 karışımı SEM görüntüsü – 10.000x.....	180
Şekil 3.76.	%75 YFC + %5 P Ms=1.00 karışımı SEM görüntüsü – 500x.....	181

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	Portland çimentosunun kimyasal içeriği [4]	4
Tablo 1.2.	Portland çimentosundaki karma oksitlerin kimyasal yapısı [4]....	4
Tablo 1.3.	Karma oksitlerin özellikleri [4].....	4
Tablo 1.4.	TS EN 197-1'e göre çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri [4].....	6
Tablo 1.5.	Toz halindeki bazı puzolan maddelerin sınıflandırılması [4]	8
Tablo 1.6.	Yüksek fırın cüruflarının Ülkeler arası kimyasal kompozisyonları [5].....	10
Tablo 1.7.	Betonda katkı malzemesi olarak kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine etkisi [42].....	14
Tablo 1.8.	Türkiye'deki kömürle çalışan termik santraller [6]	16
Tablo 1.9.	Türkiye'deki bazı UK'lerin kimyasal kompozisyonları [6].....	17
Tablo 1.10.	Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonu [11]	18
Tablo 1.11.	Dünyadaki ponza rezervleri [48]	21
Tablo 1.12.	Ponzanın fiziksel özellikleri [20]	22
Tablo 1.13.	Ponzanın kimyasal özellikleri [20]	22
Tablo 1.14.	Alkali aktive ve alkalin bağlayıcıların tarihsel gelişimi [1].....	25
Tablo 1.15.	Na ₂ SiO ₃ 'ün içeriğindeki su miktarının değişimiyle birlikte değişen yoğunluklarını gösterir [57].....	29
Tablo 2.1.	AAYFC ve CEM I harçlarının klor difüzyon hızlarının karşılaştırılması [57]	41
Tablo 3.1.	Deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonları ve fiziksel özellikleri.....	54
Tablo 3.2.	Deneysel çalışmada kullanılan alkalinlerin (NaOH) kimyasal kompozisyonu	55

Tablo 3.3.	Deneysel çalışmada kullanılan alkalilerin (Na_2SiO_3) kimyasal kompozisyonu	55
Tablo 3.4.	Deneysel çalışmada kullanılan alkalilerin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kimyasal kompozisyonu	56
Tablo 3.5.	Deneysel çalışmada kullanılan alkalilerin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) fiziksel özellikleri	56
Tablo 3.6.	AAYFCT harçlarının dayanım deneyleri için karışım miktarları (g) Na_2CO_3	71
Tablo 3.7.	AAYFCT harçlarının priz süresi tayini deneyleri için karışım miktarları (g) Na_2CO_3	72
Tablo 3.8.	AAYFCT numunelerde çimento deneyleri	74
Tablo 3.9.	AAYFCT numunelerde çimento deneyleri	76
Tablo 3.10.	AAYFCT içerikli numunelerin 2, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa).....	79
Tablo 3.11.	AAYFCT içerikli numunelerin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa).....	81
Tablo 3.12.	YFC+ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa).....	88
Tablo 3.13.	YFC+ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa).....	89
Tablo 3.14.	%2 Na_2O oranındaki harçların karışım miktarları (g).....	95
Tablo 3.15.	%2 Na_2O oranlı, AAYFC içerikli kaynatılmış numunelerin 28 günlük dayanımlarının kaynatılmamış numunelerle karşılaştırılması	95
Tablo 3.16.	%2 Na_2O oranlı, AAYFC içerikli kaynatılmış numunelerin 28 günlük dayanımlarını, kaynatılmamış numuneleri referans kabul ederek karşılaştırılması	96
Tablo 3.17.	%4 Na_2O oranındaki harçların karışım miktarları (g).....	98
Tablo 3.18.	%4 Na_2O oranlı, AAYFC içerikli numunelerin farklı silikat modülleri ile 2, 7 ve 28 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)	99

Tablo 3.19. %4 Na ₂ O oranlı, AAYFC içerikli numunelerin farklı silikat modülleri ile 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri.(MPa).	99
Tablo 3.20. %4 Na ₂ O oranındaki harçların karışım miktarları (g).....	105
Tablo 3.21. %4 Na ₂ O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa).....	106
Tablo 3.22. %4 Na ₂ O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa).....	107
Tablo 3.23. %6 Na ₂ O oranındaki harçların karışım miktarları (g).....	111
Tablo 3.24. %6 Na ₂ O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa).....	112
Tablo 3.25. %6 Na ₂ O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa).....	113
Tablo 3.26. %7 Na ₂ O oranındaki harçların karışım miktarları (g).....	118
Tablo 3.27. %7 Na ₂ O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa).....	119
Tablo 3.28. %7 Na ₂ O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması.....	119
Tablo 3.29. %8 Na ₂ O oranındaki harçların karışım miktarları (g).....	125
Tablo 3.30. %8 Na ₂ O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa).....	126
Tablo 3.31. %8 Na ₂ O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerlerinin referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)	127
Tablo 3.32. %8 Na ₂ O+UK oranındaki harçların karışım miktarları (g).....	132
Tablo 3.33. AAYFC+UK içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa).....	134
Tablo 3.34. AAYFC+UK içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa).....	136
Tablo 3.35. %8 Na ₂ O+P oranındaki harçların karışım miktarları (g)	146
Tablo 3.36. AAYFC+P içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması.....	148

Tablo 3.37. AAYFC+P içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa).....	150
Tablo 3.38. Sülfatlı çözeltiler içerisinde bekletilen 90 günlük numunelerin basınç dayanımları (Mpa)	161
Tablo 3.39. Sülfatlı çözeltiler içerisinde bekletilen 90 günlük numunelerin basınç dayanımlarının referans numunelerle (90 gün su içinde bekletilen) karşılaştırılması (Mpa).....	164
Tablo 3.40. Sülfatlı çözeltiler içerisinde bekletilen 180 günlük numunelerin basınç dayanımlarının birbirleriyle kıyaslanması (Mpa)	166
Tablo 4.41. AAYFC, AAYFC+P ve AAYFC+UK içerikli numunelerin kuruma büzülmesi değerleri ($\times 10^{-6}$ mm).....	172
Tablo 3.42. Üretilen AAYFC, AAYFC+P, AAYFC+UK numunelerinin SEM görüntülerinin EDX analiz sonuçları	182

ÖZET

Anahtar kelimeler: Yüksek Fırın Cürufu, Alkali, Aktivatör, Sodyum Hidroksit, Sodyum Silikat, Ponza, Uçucu Kül, Durabilite.

Yüksek performanslı betonlarla ilgili araştırmalara paralel olarak, hem çevre kirliliği yapan endüstriyel atık malzemelerin değerlendirilmesi hem de daha ekonomik bir beton elde edilmesi amacıyla, betonun hemen hemen bütün özellikleri, uygun katkıları kullanılarak değiştirilip iyileştirilebilmektedir. Bu amaçla gerek kimyasal katkıları gerekse de puzolonik özelliklere sahip birçok doğal ve yapay malzeme beton üretiminde çeşitli amaçlarla kullanılmışlardır.

Alkali aktive edilen bağlayıcılar, beton üretimi sırasında kullanılan çimento miktarını azaltarak, düşük enerji giderleri, CO₂ salınımının düşürülmesi ile çevre kirliliğinin azalmasına katkı sağlamak ve elde edilen dayanım değerlerinin yüksek olması gibi avantajlar sağlamaktadır.

Bu çalışma, harç üretimi sırasında kullanılan alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufunu (AAYFC) çimento ile belirli oranlarda ikame ederek, harç içindeki yüksek fırın cüruf miktarını (YFC) artırmayı hedeflemektedir. Farklı oranlarda alkali kullanılarak en uygun aktivatör çözeltisi belirlenmiş ve üretilen alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçların dayanımları incelenerek, en büyük dezavantajı olan kuruma büzülmesi değerlerini azaltmak ve sülfatlı sularda daha dayanıklı beton üretmeyi sağlamak amaçlanmıştır. Geçmişte yapılan çalışmalardan farklı olarak AAYFC'li harçlara ponza ve uçucu kül ilave edilerek kuruma büzülmesi değerleri ve sülfatlı sulara olan dayanıklılıkları irdelenmiş ve bu harç numunelerinin SEM görüntüleri alınarak mikro yapıları incelenmiştir.

IMPROVEMENT OF THE PERFORMANCE OF ALKALI ACTIVATED BLAST FURNACE SLAG MORTARS

SUMMARY

Key Words: Blast Furnace Slag, Alkali, Activator, Sodium Hydroxide, Sodium Silicate, Pumice, Fly Ash.

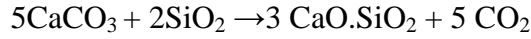
In parallel with research on high performance concrete, obtaining of concrete is aimed for being more economic by evaluation of industrial waste materials casing environmental pollution. In this case, almost all properties of concrete using suitable additives can be modified and improved. As a result of chemical additives and many natural and artificial materials with pozzolanic properties properties are used for various purposes in the manufacture of concrete.

During the production of concrete using alkali activated binder reduces the amount of cement. While energy costs are reducing with the amount of cement, it provides a positive contribution to environmental pollution with reducing CO₂ emissions. However it is an important advantage that the results obtained from strength values are higher.

This study aims to increase the amount of blast furnace slag (BFS) in mortar by replacing alkali activated blast furnace slag (AABFS) with cement in certain ratios during the production of mortar. Optimal activator solution has been determined by using different rates of alkaline. Mortar strength of produced AABFS were investigated. It is aimed to produce more durable cement in sulphate waters and to decrease drying shrinkage values which are the biggest disadvantage. Different from past studies pumice and fly ash was added to the AABFS mortar. These mortars that produced were examined the value of drying shrinkage and durability in sulphate waters and microstructures were investigated by using SEM images of these mortars samples.

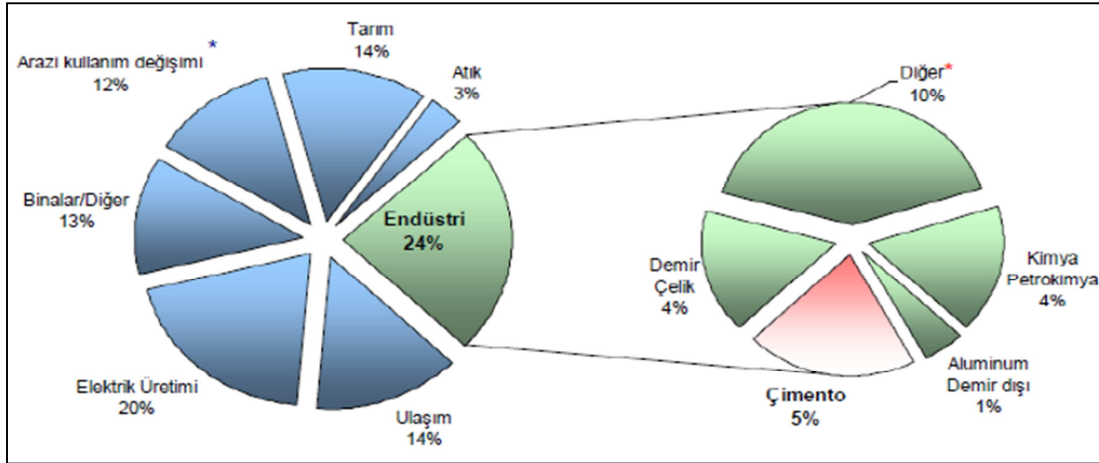
BÖLÜM 1. GİRİŞ

Portland çimentosu üretilirken çok yüksek enerji tüketerek CO₂ açığa çıkarır.

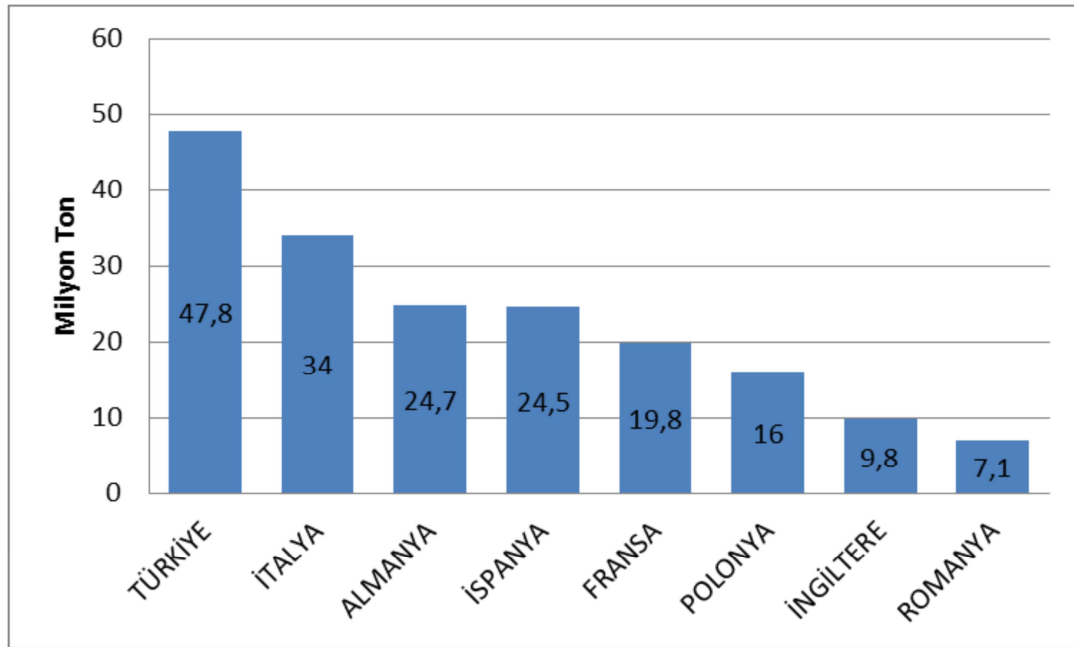


Bu üretim sonucunda 1 ton çimento üretimi için 1 ton CO₂ salınım yapar [1]. Demir çelik üretimi sırasında atık olarak ortaya çıkan yüksek fırın cürufu, çimento içinde belirli miktarlarda kullanılmaktadır. TS 20, cürufu çimentolar içerisindeki cüruf miktarının en az %20 ve en çok %80 olacak şekilde sınırlandırmıştır. Türkiye’ de bu oran %60 değerini geçememektedir. Bu oranı artırabilmek için çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bazikliği yüksek olan alkalili kimyasalları kullanarak uçucu kül, diatomit, metakaolin, zeolit, yüksek fırın cürufu, tuğla tozu, pirinç kabuğu, kırmızı çamur (boksit atığı) ve silis dumanı gibi çeşitli malzemeler ile denenerek alkali aktive edilmiş betonlar elde edilmiştir. Sodyum hidroksit, potasyum hidroksit, sodyum karbonat ve sodyum silikat en çok olarak kullanılan aktivatörlerdir. YFC’nin alkali aktivasyonuna dayanan bağlayıcıların endüstriyel üretimi 1960-1964 yılları arasında Ukrayna’da başlamıştır.

Cembureau, Activity 2010 Raporuna göre, Dünyadaki CO₂ salınımları incelendiğinde, çimento üretiminin %5 oranında ortaya çıktığı görülmektedir. Avrupa Çimento Birliği üyesi ülkelere bakıldığında ise en fazla çimento tüketiminin Türkiye, İtalya, Almanya, İspanya ve Fransa’da olduğu görülmektedir (Şekil 1.1 ve Şekil 1.2).



Şekil 1.1. Dünya'daki CO₂ emisyonları ve çimento üretiminin endüstri üretimindeki oranı [177]



Şekil 1.2. Avrupa çimento birliği üye ülkelerinde çimento tüketim değerleri [177]

Çalışmamızın amacı; beton içinde çimento tüketim miktarlarını azaltarak çevre kirliliğinin azalmasına katkı sağlamak ve çimento miktarını azaltmak için alkalilerle aktive ederek yüksek fırın cüruf miktarını artırmayı hedeflemektedir.

Bu çalışmada; farklı oranlarda alkali kullanılarak üretilen AAYFC'li betonların dayanımlarını inceleyerek en büyük dezavantajı olan kuruma büzülmesi değerlerini azaltmak ve sülfatlı sularda daha dayanıklı beton üretmeyi sağlamak amaçlanmıştır.

Geçmişte yapılan çalışmalardan farklı olarak AAYFC'li betonlara ponza ve uçucu kül ilave edilerek kuruma büzülmesi değerleri ve sülfatlı sulara olan dayanıklılıkları irdelenmiş ve bu beton numunelerinin SEM görüntüleri alınarak mikroyapıları incelenmiştir

Portland çimentosu; katkı içermeyen, klinker ve priz düzenleyici olarak eklenen alçı taşından ibarettir. Kullanım amaçlarına göre çeşitli katkıları kullanılarak değişik çimentolar üretilmiştir. Bu katkı kullanımı, enerji ve hammadde kaynaklarının daha az kullanılması bakımından ekonomik açıdan önemli olmakla beraber kullanıldığı yerlerde sülfatlı, klorürlü, alkalili v.b ortamlardaki zararlı etkilere dayanıklılık açısından da önem taşımaktadır.

Çimento kullanımında betonun maruz kalacağı ortama göre çimento tipi seçilmesi önem arz etmektedir. Örneğin sülfat etkisine karşı dayanıklı beton yapmak amacıyla normal Portland çimentosu ve erken dayanımı yüksek Portland çimentosu yerine, yüksek fırın cürufu ya da sülfata dayanıklı Portland çimento kullanımı uygun olacaktır. Aynı şekilde baraj inşaatları gibi kütle betonlarında hidrasyon ısısının düşüklüğü ve maruz kalacağı su etkisine karşı dayanıklılık açısından cürufu ve puzolonik katkı çimentolar tercih edilmelidir [2].

Çimentonun su ile reaksiyonu sonucu hem havada hem de su altında katılaştıkları ve sertleştikleri için hidrolik bağlayıcılar olarak sınıflandırılırlar. Standartlar, çimentoların fiziksel ve mekanik özelliklerine sınırlamalar koyar. Bu sınırları

sağlayamayan çimentolar beton üretiminde kullanılamaz. Çimentoların fiziksel ve mekanik özelliklerinin tayini TS EN 196'ya uygun olarak yapılır [3].

Tablo 1.1. ve Tablo 1.2'de çimento içerikleri; çimentolar ile ilgili formülleri daha kısa ifade etmek için çimentoyu oluşturan her bir oksit tek harf olarak belirtilmektedir. Çimentoyu oluşturan oksitler ise fırında birbirleriyle birleşmek suretiyle kimyasal olaylar sonucu karmaşık bileşimleri meydana getirirler. Tablo 1.3'de ise karma oksitlerin özellikleri verilmektedir.

Tablo 1.1. Portland çimentosunun kimyasal içeriği [4]

Adı	Oksit	Sembölü
Kireç	CaO	C
Silis	SiO ₂	S
Alümin	Al ₂ O ₃	A
Demir	Fe ₂ O ₃	F
Kükürt trioksit	SO ₃	<u>S</u>

Tablo 1.2. Portland çimentosundaki karma oksitlerin kimyasal yapısı [4]

Bileşim İsmi	Bileşiğin Sembölü	Formülü
Alite	C ₃ S	3CaO.SiO ₂
Belite (β)	C ₂ S	2CaO.SiO ₂
Felite (α)	C ₂ S	2CaO.SiO ₂
	C ₃ A	
Celit	C ₄ AF	
Kalsiyum silikat	CS	CaO.SiO ₂
Trikalsiyum disilikat	C ₃ S ₂	3CaO.2SiO ₂

Tablo 1.3. Karma oksitlerin özellikleri [4]

Bileşen	Hidratasyon hızı	Bağlayıcılık özelliği	Hidratasyon ısısı	Kimyasal dayanıklılık
C ₃ S	İlk hafta hızlı sonra yavaş	Kuvvetli	Orta	Az

Tablo 1.3. Karma oksitlerin özellikleri'nin (devamı)

C ₂ S	İlk hafta yavaş sonra sürekli artım	Kuvvetli	Az	İyi
C ₃ A	Ani (ilk dakikada)	Zayıf	Çok	Kötü
C ₄ AF	Ani (ilk dakika)	Zayıf	Orta	İyi

C₂S; ince bir şekilde öğütülüp su ile karıştırılınca priz yapmaz. Bu nedenle çimento bakımından önemli bir bileşen değildir.

C₃S₂; yuvarlak taneler halinde olup, bu cisimde priz yapmadığından bağlayıcılık açısından önemli değildir.

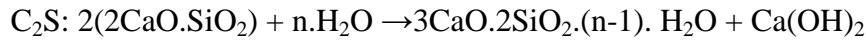
C₂S; çimentonun yavaş sertleşip, bir haftadan sonra dayanım kazanmasını sağlar. C₂S'nin en önemli değişimi β silikatının γ silikatına dönüşüdür. Bu tek yönlü bir değişimdir. γ silikatının priz yapma özelliği yoktur. Bunun için klinkerde γ silikatının fazla miktarda olması istenmez. B silikatı hızlı bir şekilde soğutulursa γ silikatı fazla oluşmaz. Klinkerin yüksek bir hızla soğutulmasının nedeni budur [4].

C₃S; silikatının en önemli özelliği çimentonun prizini çabuklaştırması ve hızlı dayanım kazandırmasıdır.

C₃A; çimentonun oldukça önemli bir bileşenidir. Su ile çok hızlı ve şiddetli bir reaksiyon yapar ve çok ısı çıkarır. Miktarı fazla olursa suyun buharlaşmasına neden olacağından çimentonun hidrasyon olayına zararlı olabilir. Ancak çimentoya hızlı dayanım kazandırır. C₃A'nın çimentoda fazla miktarda bulunması prizini çok erken başlamasına neden olur. Çimentonun hızlı prizini engellemek için fırından çıkan klinkere ağırlığının %3-6 arası alçı taşı ilave edilmektedir. Çimentoya alçı taşı katılmadığı zaman C₃A hızlı bir şekilde hidrasyon yaparak, daha ilk dakikalarda küçük plaklar şeklinde kristalleri meydana getirmek suretiyle priz yapar. Büyük bir ısının açığa çıkmasıyla oluşan bu olaya ani priz denilir. Alçı taşı miktarının fazla olması halinde, bu miktar alüminatların ilk reaksiyonlarına karışır ve bu suretle normal priz yerine bir katılma olur. Bu durum yalancı priz olarak adlandırılır. C₃A ve alçıtaşının birleşmesiyle oluşan “candlot tuzu” veya “etrenjit” içerdiği çok

miktardaki hidrat suyu nedeniyle büyük bir hacim kaplar. Taze betonda ortam sıvı halde olduğundan bu durum sakıncalı değildir [4].

Çimento su ile birleşince bir dizi çok karmaşık kimyasal reaksiyon oluşur. Çimentonun karma bileşenlerinin su ile ayrı ayrı kimyasal reaksiyona girdikleri varsayılır ve hidrasyon sonunda her ana bileşen tarafından değişik hidrasyon ürünleri oluşur. Kalsiyum silikatlar çimentonun esas iskeletini oluşturur. Hidrasyon sonunda C_3S ve C_2S benzer ürünler oluşturur. Bu ürünler C-S-H jeli (tobermorit) ve sönmüş kireçtir (Portlandit).



Hidrasyonunu tamamlamış, boşluklar dışındaki çimento hamuru hacminin; %58'i C-S-H'nin, %27'si Portlandit ($Ca(OH)_2$)'dir.

Tablo 1.4'de Ülkemizde kullanılan çimentoların TS EN 197-1'e göre fiziksel ve mekanik özelliklerinde istenilen standartlar verilmektedir.

Tablo 1.4. TS EN 197-1'e göre çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri [4]

Dayanım sınıfı	Basınç dayanımları (N/mm ²)				Priz başlama süresi (dk)	Genleşme (mm)
	Erken dayanım		Standart dayanım			
	2 Gün	7 Gün	28 Gün			
32.5N	-	≥16	≥32.5	≤52.5	≥75	≤10
32.5R	≥10	-	≥32.5	≤52.5	≥75	
42.5N	≥10	-	≥42.5	≤62.5	≥60	
42.5R	≥20	-	≥42.5	≤62.5	≥60	
52.5N	≥20	-	≥52.5	-	≥45	
52.5R	≥30	-	≥52.5	-	≥45	

Beton, düşük maliyeti, istenen formun verilebilmesi, dayanıklılığı gibi üstün özellikleri nedeniyle en çok kullanılan malzemedir. Yakın gelecekte de yerini alabilecek alternatif malzemeler olarak, geliştirilmiş özellikleri ile özel beton türleri görülmektedir [4].

Beton kendine özgü teknolojisi olan, üretim yöntemi çelik ve benzeri diğer ürünlerden farklı bir malzemedir. Beton üretimi bir dizi işlemin peş peşe doğru yapılması halinde olumlu sonuç alınan bir üretim tarzıdır. Malzeme seçimi, malzeme miktarlarının belirlenmesi, karıştırma, taşıma, yerine yerleştirme, sıkıştırma ve bakım işlemlerinin hepsinin doğru yapılması gerekmektedir. Bu işlem zincirinin birinde yapılacak hata istenilen sonuca varılmasını engeller. Beton malzemesinden aranan üç temel özellik vardır; işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık. Bu özellikler arasına ekonomiyi de eklemek gerekir [4].

Yüksek performanslı betonlara yönelik araştırmalara da paralel olarak, hem çevre kirliliği yapan endüstriyel atık malzemelerin değerlendirilmesi hem de daha ekonomik bir beton elde edilmesi amacıyla, taze ve sertleşmiş betonun hemen hemen bütün özellikleri, uygun katkıları kullanılarak değiştirilip iyileştirilebilmektedir. İşte bu amaçla, gerek kimyasal katkıları gerekse de puzolonik özelliklere sahip birçok doğal ve yapay malzeme, çok eski zamanlardan günümüze değin yapımcı alanında ve beton üretiminde çeşitli amaçlarla kullanılmışlardır. Betonun temel bileşenlerinden biri olmayan bu malzemeler gelişen beton teknolojisinde, hem betonun dayanım ve durabilite özelliklerini değiştirmek hem de üretimde ekonomi sağlamak gibi amaçlarla oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu nedenle de bu tür puzolonik maddeler, mineral katkı maddeleri olarak da tanımlanır [5].

Beton ve betonarme yapıların büyük bir bölümü servis ömrü boyunca su ile etkileşim içindedir.

Dayanım, dayanıklılık, düşük geçirimsizlik gibi betondan beklenen bazı özellikler sadece karışım oranlarından değil aynı zamanda çimento pastasının özelliklerinden de etkilenmektedir. Betondan beklenen bu özellikleri geliştirmek amacıyla uçucu kül,

silis dumanı, yüksek fırın cürufu (YFC) ve pirinç kabuğu külü gibi bazı puzolanlar çimento teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Çimento yerine belirli oranlarda uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların kullanımı, çimento miktarını azalttığından daha az oranda hidrasyon ısısının çıkmasını sağlar [7].

Puzolanlar, çoğunlukla silis veya silis-alümin kökenli malzemelerdir. Kendi başlarına çok az veya hiç bağlayıcı özelliği olmayan puzolan, ancak çok ince bir şekilde öğütüldüğünde nemli ortamlarda ve normal sıcaklıkta kireç (Ca(OH)_2) ile kimyasal reaksiyon yapıp, bağlayıcılık özelliği kazanan inorganik maddelerdir.

Puzolonun tipinden bağımsız olarak kireç-puzolan reaksiyonunun sonucunda, genel olarak Portland çimentosunun hidrasyonu ile aynı türden olan ürünler ortaya çıkmaktadır. Olası farklılıklar küçüktür ve hidrasyon ürünlerinin yapısından çok miktarını etkiler. Çoğunlukla volkanik kökenli malzemeler olan puzolanların, yapay olarak üretilenleri olduğu gibi, bazı endüstriyel atıkların da puzolanik özellikleri vardır. Puzolanların bu özelliği daha çok çimento ve beton endüstrisinde teknik, ekonomik ve ekolojik faydaları nedeniyle kullanılmasını sağlamaktadır [4].

Düşük, normal ve yüksek sıcaklıklarda uçucu kül ve cürüflü betonlar Portland çimentolu betonlara göre daha yavaş dayanım gelişimi gösterirler [8].

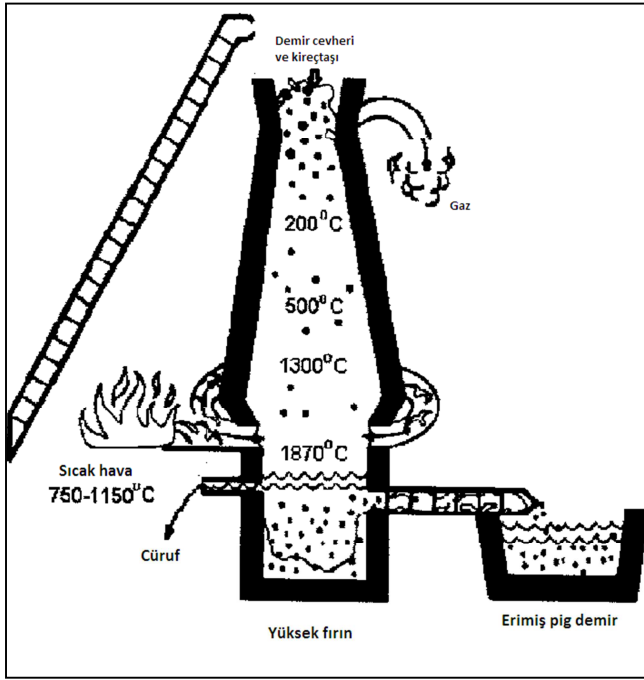
Puzolanlar daha çok kökenine bağlı olarak sınıflandırılırlar, buna göre puzolanlar yapay ve doğal olmak üzere Tablo 1.5’de verilmektedir.

Tablo 1.5. Toz halindeki bazı puzolan maddelerin sınıflandırılması [4]

Doğal puzolanlar	Yapay puzolanlar	Endüstriyel ve çeşitli atık türü puzolanlar
Volkanik tüfler	Kireç	Uçucu kül
Tras	Su kireci	Silika tozu
Zeolit	Pişmiş kil	Yüksek fırın cürufu
Diatomit	Alçı	Pirinç kabuğu külü
Doğal topraklar	Çimento	Yapay alçı

Puzolonik malzemelerle (silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi) oluşturulan Portland çimentolu betonlarda klor etkisiyle donatıda oluşacak korozyonun önlenmesi için yapılan bu çalışmada uçucu kül ile silis dumanının birlikte kullanımı donatı korozyon etkisini önlemiştir [9, 10].

1.1. Yüksek Fırın Cürufu



Şekil 1.3. Yüksek fırın cürufunun üretim sürecinin şematik olarak gösterimi [57]

Yüksek fırın cürufu, yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında endüstriyel yan bir ürün olarak üretilir. Demir cevherleri, hematit (Fe_2O_3), magnetit (Fe_3O_4) gibi demiroksit bileşenlerinin yanı sıra aynı zamanda küçük bir miktar silis, alümin, kil, kükürt, fosfor, mangan gibi yabancı maddeleri de barındırmaktadır. Cevher içerisindeki demirin yabancı maddelerden ayrıştırılmasına yardımcı olması için flux madde olarak; bir miktar kalker taşı da cevherle birlikte Şekil 1.3'deki yüksek fırınlarda kok kömürü ile yüksek sıcaklığa kadar ısıtılıp, eritilir. Kok kömürünün karbonu, cevherin içerisindeki demiroksitin oksijeniyle birleşerek karbondioksit ve karbonmonoksit olarak fırından ayrılır. Böylece geride eriyik durumdaki demir ile birlikte kireç, kok kömürünün külü, silis, alümin, karbon, mangan, fosfor ve sülfür gibi yabancı maddelerden oluşan ve cüruf adı verilen malzeme yoğunluk farkından

dolayı demir eriyiğinin üzerinden ayrı olarak dışarıya çıkar. 1400-1600⁰C sıcaklıkta olan yüksek fırın cürufu farklı soğutma teknikleriyle farklı özellikler kazanır. Suda ani olarak soğumaya bırakılırsa puzolonik özellik kazanmış olur. Havada kendiliğinden soğumaya bırakılırsa puzolonik özelliği olmayan kristal bir yapı ortaya çıkar [11]. YFC'nin fırın çıkışında hızla soğutulması ve en az 2/3 oranında camsı faz içermesi gerekir [12].

Yüksek fırın cürufunun ülkeler arası kimyasal kompozisyonları Tablo 1.6'da verilmektedir.

Tablo 1.6. Yüksek fırın cüruflarının Ülkeler arası kimyasal kompozisyonları [5]

	Amerika ve Kanada	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye	Portland Çimentosu
CaO	29-50	30-40	38-44	34-41	60-67
SiO ₂	30-40	30-36	33-37	34-36	17-25
Al ₂ O ₃	7-18	9-16	15-18	13-19	3-8
Fe ₂ O ₃	0.1-1.5	-	0-0.7	0.3-2.5	0.5-6.0
MgO	0-19	8-21	1-3	3.5-7	0.1-4.0
MnO	0.2-1.5	-	0.3-1.5	1-2.5	-
S	0-0.2	1-1.6	0.6-0.8	1-2	-
SO ₃	-	-	-	-	1-3

Türkiye'de yüksek fırın cürufunun üretildiği tesisler demir çelik fabrikalarıdır. İskenderun, Karabük ve Ereğli olmak üzere 3 adettir.

YFC betonun uzun dönem dayanımını ve durabilitesini artırdığı, beton geçirimsizliğini azalttığı ve kimyasal etkenlere karşı betonun dayanıklılığını arttırdığı birçok araştırmada gözlenmiştir [13]. Yüksek fırın cürufu betonların sülfat dayanımları Portland çimentolu betonlara göre daha dirençlidir [14-16].

Özkan, yapmış olduğu çalışmada %50 YFC + %50 Çelikhane cürufu katkılı harç ve betonların en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Bu betonlar özellikle sülfatlara ve yüksek sıcaklığa Portland çimentosuna göre daha dayanıklı olduğu görülmüştür [17]. YFC kullanımı beton hidrasyonu sırasında, hidrasyon ısısını düşürdüğü için kütle beton (ör: baraj vb.) dökümlerinde prizi yavaşlatmasından dolayı soğuk derz oluşmasını önler. Sülfat çimentonun bazı bileşenleri ile reaksiyona girerek betonun zamanla bozulmasına neden olur. Bu saldırı sülfat iyonlarının, sertleşmiş betondaki alüminli ve kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girmesi etrenjit (DEF; sülfat etkisiyle genişleyen tuz sertleşmiş betonu çatlatıp parçalar) ve alçı taşı oluşturması ile gerçekleşir. Reaksiyon ürünleri betonda genişleme yaratarak çatlaklara ve dağılmalara yol açar. Sülfat iyonları topraktan ya da zemin suyundan beton içine girebilir. Çorak topraklarda, özellikle deniz yapılarında, ayrıca çimento içine katılan alçı taşının oluşturacağı SO_3 miktarını çimento ağırlığının %3'ü ile sınırlamıştır. Yüksek fırın cürufunun kimyasal yapısında C_3A bulunmamasından dolayı cürufu çimentoların içeriğindeki C_3A , Portland çimentolarına kıyasla daha düşük olduğundan sülfatlı ortamlara karşı daha dayanıklıdır.

Binici ve arkadaşları, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve bazaltik ponzayı ayrı ayrı veya birlikte içeren betonların mekanik aşınma ve geçirgenlik özelliklerinin araştırılması bu çalışmanın temel amacıdır. İnce agreganın yüksek fırın cürufu veya bazaltik ponza ile yer değiştirme yüzdeleri bu çalışmada değişik şekillerde araştırılmıştır. Üretilen betonların aşınma dayanımları incelenmiştir. Test sonuçları betonda yüksek fırın cürufu ve bazaltik ponza varlığının aşınmazlık ve su geçirimsizliğine olumlu etkiler yaptığını göstermiştir. Sonuçlar beton aşınması ve geçirgenliğinin katkı tipi ve miktarına bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Diğer yandan özellikle ponza katkılı örneklerin permeabilite değerleri kontrol örneğinden daha düşük elde edildiğini belirtmişlerdir [18, 19]. Ayrıca deniz yapılarında kullanılacak betonlarda ince agrega olarak ponza ve yüksek fırın cürufu katkılarının kullanılmasının beton durabilitesini geliştirileceğini göstermiştir [20]. Ayrıca yüksek fırın cürufu %50 oranında kullanıldığında en düşük klorür sızması olduğu ifade edilmiştir [21].

Kömür altı tozu ve yüksek fırın cürufu ile üretilen harçlar 800 °C ısıda 90 gün bekletilmişlerdir. Ağırlık kaybı, basınç dayanımı, elastisite modülü, çatlak oluşumu gibi özellikler incelenmiş sonuç olarak kömür altı tozu ile elde edilen harçların özellikleri yüksek fırın cürufu ile elde edilen harçlardan daha iyi neticeler verdiği anlaşılmıştır [22].

Yüksek fırın cürufu harçlarda alçı oranının artırılması mekanik dayanımı olumlu yönde etkilediği ifade edilmiştir [23, 24].

Yüksek fırın cürufu %30 ve %60 oranında çimento ile ikame edilmiş, 20 °C su içinde kür edilmiştir. Bu harçların yüksek sıcaklıklarda performansının arttığı ancak sonraki yaşlarda düşüş gösterdiği bu çalışmanın göze çarpan en önemli sonucudur [25]. %60 YFC ilaveli grubun işlenebilmesi ve mekanik özelliklerinin şahit ve diğer gruplardan daha üstün olduğu tespit edilmiştir [26].

Yüksek fırın cürufu ve ponza ile oluşturulan çimentolu betonların deniz suyu etkilerine karşı gösterdikleri performans araştırılmış ve sonuç olarak CSP 80 (%40 YFC + % 40P) olan numunenin deniz suyu etkisine karşı gösterdiği direnç, referans numunelerinden daha iyi olduğu ifade edilmiştir [27]. Ayrıca Binici ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada ise yüksek fırın cürufuyla birlikte ponzayı agrega yerine kullanarak beton borular üretilmiş ve kırılma yüklerinin ponzasız ve cürufsuz olan numunelerden daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir [28].

Yüksek fırın cürufu harçlara alçı ve sönmüş kireç eklenerek özelliklerinin incelenmesi sonucunda kuruma büzülmesi ve karbonatlaşma değerlerinin referans numunelere (cürufu çimentolu harçlar) göre daha azaldığı ileri sürülmektedir [29].

Yüksek fırın cürufu harçlar üretilirken 22 °C de %65 bağıl nem ile 22 °C de %100 bağıl nemde kür yapılan numuneler birbirleriyle mukayese edilmiştir. Mukayese sonucunda %65 bağıl nemde kür yapılan numunelerin basınç dayanımları, %100 bağıl nemde kür yapılan numunelerden %15 daha düşük çıktığı ifade edilmektedir [30].

Yüksek fırın cürufu ile metakaolinli karışımların durabiliteleri mükemmel çıkmıştır. Su emme katsayısı ve su emme derinlikleri de oldukça düşük değerler verdiği anlaşılmaktadır [31].

Cürufli harçların tuz ataklarına karşı durabiliteleri geleneksel harçlara göre daha iyi neticeler vermiştir [32].

Yüksek ısı ile kür edilmiş cüruf karışımı Portland çimentolarının basınç dayanımları havada kür edilen numunelere göre daha düşük çıktığı anlaşılmaktadır [33].

Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı ile oluşturulan harçlarda en yüksek otojen büzülme silis dumanı olan numunelerde, en düşük otojen büzülme ise uçucu kül olan numunelerden elde edildiği belirtilmiştir [34, 35].

Kendiliğinden yerleşen beton karışımlarında çimento yerine %20 veya %35 oranlarında yüksek fırın cürufu kullanılmasının, dayanım özellikleri bakımından daha iyi olacağı görülmüştür [36].

Taze betonda kullanılan uçucu kül bağlayıcıların, standart kıvam suyu ihtiyacını arttırdı, işlenebilirliği azalttı ve taze betonun hava içeriğini arttırdı. Yüksek fırın cürufu ise bağlayıcıların standart kıvam suyu ihtiyacında küçük bir azalmaya, işlenebilirlikte ise artmaya sebep oldu. Ayrıca yüksek fırın cürufu yaklaşık bütün ikame düzeylerinde hava içeriğini azalttığı belirtilmiştir [37].

Yüksek fırın cürufunun çimento ile belli oranlarda yer değiştirilerek kullanılması ve reaktif pudra betonunun çeşitli şekillerde kür edilmesi, sinterleşmiş boksit, granit ve kuvarsın agrega olarak kullanılması sonucu basınç dayanımının 400 MPa'a kadar çıktığı gözlenmiştir [38].

Yüksek fırın cürufu harçların sodyum sülfatlı sulara ve sülfirik asitlere maruz bırakılmış ve sonuç olarak geleneksel harçlardan daha iyi dayanıklılık sağladıkları görülmüştür [39].

ASR ve sülfat etkilerine karşı zeolit, uçucu kül ve YFC'nin belli oranlarda çimentoya karıştırılması sonucu elde edilen betonların durabiliteleri incelenmiştir. ASR ve sülfat etkilerinde uzunluk değişimleri, mikroyapı incelemeleri üretilen bu harçların Portland çimentolu harçlara göre daha zayıf kaldığı belirtilmiştir [40].

SiO₂'li nano parçacıklar yüksek fırın cürüflü betonlara bağlayıcının %3'ü oranında konulduklarında hidrasyon hızını arttırdıkları ve bundan dolayı yarma dayanımının da arttığı gözlenmiştir. %3'den fazla olduğunda ise yarma dayanımını düşürdüğü gözlenmiştir [41].

Tablo 1.7. Betonda katkı malzemesi olarak kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine etkisi [42];

Olumlu Etkileri	Olumsuz Etkileri
Taze betondaki işlenebilirliği artırır.	Betonun özellikle soğuk havalarda daha geç priz almasına yol açar.
Taze betonun priz süresini uzatır.	Betonda belirli miktarda sürüklenmiş hava elde edebilmek için daha çok miktarda hava sürükleyici katkı malzemesinin kullanılması gerekir.
Betondaki terlemeyi azaltır.	Betonun ilk günlerdeki dayanım kazanma hızını azaltır.
Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltır.	
Sertleşmiş betonun sülfatlara karşı dayanıklılığını artırır	

Betonda kullanılan yüksek fırın cürufunun beton üzerindeki olumlu ve olumsuz özellikler Tablo 1.7’de verilmektedir.

YFC’nin yeterli bağlayıcılık gösterip gösteremeyeceğini araştırmak için, hidrolik modülünün 1’den büyük olması gerekir. Ancak son yıllarda, uygun kimyasal kompozisyona sahip olabilmenin yeterli olmadığı görülmüştür. Cüruf aktivite indeksini belirlemek için ASTM C 989 standardına göre 242g su, 500g CEM I ve 1375g standart kumdan oluşan cüruf katkısız kontrol harcı ile 250g CEM I, 250g YFC, 1375g standart kum, cüruf katkılı bir başka harç daha hazırlanmaktadır. 5 cm’lik küp numuneler, 7 ve 28 günlük yaşlarda basınç dayanımı deneyine tabi tutulmakta ve aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır.

CP: Cüruf katkılı harç numuneleri

P: Kontrol numuneleri

CAİ: Cüruf aktivite indeksi

$$CAİ (\%) = (CP/P) * 100$$

1.2. Uçucu Kül

Uçucu kül beton üretiminde en yaygın olarak kullanılan puzolandır. Bu malzeme, termik enerji santralleri içinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir üründür. Baca gazları atmosfere bırakılmadan önce bu gazlar içindeki ince tanelerin toz toplama sistemi tarafından toplanmasıyla elde edilir. Uçucu kül rutubetli ortamlarda kalsiyum iyonları ile reaksiyona girerek silikat hidrate oluşturan yarı kararlı alümin silikatlar içerir [11].

Uçucu küllerin en çok kullanıldığı alanların başında inşaat sektörü gelmektedir. Bu alanda yapılan çalışmaların çoğu uçucu küllerin çimento, beton, tuğla, hafif agrega üretiminde ve zemin stabilizasyonu ile dolgu işlerinde kullanılmasına yöneliktir. Bunların yanı sıra uçucu kül absorban olarak atık suların arıtılmasında, asidik karakterli toprak ıslahında, döküm ve metal sanayisinde, sondaj işlerinde ve karlanma ile buzlanmanın önlenmesinde de kullanılmaktadır [4].

Dünyadaki uçucu kül üretimi yılda yaklaşık 450 milyon tondur ancak toplam uçucu kül miktarının sadece %6'sı çimento ve beton karışımlarında puzolan olarak kullanılmaktadır. Tablo 1.8'de görüldüğü üzere Türkiye'de kömürle çalışan 15 tane termik santral bulunmaktadır. Ülkemizde yıllık uçucu kül üretimi yaklaşık 15 milyon ton civarındadır. Bütün Dünyada bir yılda üretilen toplam UK'ün ancak %25'den daha azı değerlendirilmektedir. Bununla birlikte Almanya, Hollanda ve Belçika'da üretilen toplam UK'ün %95'den fazlası, İngiltere'de ise yaklaşık %50'si kullanılmaktadır [15,16]. Diğer taraftan büyük miktarlarda UK üretilen A.B.D. ve Çin'de sırasıyla yaklaşık %32 ve %40 oranında UK kullanıldığı görülmektedir. UK'lerin bacalarda tutulması ile günümüzün çok önemli problemlerinden biri olan hava ve toprak dolayısıyla çevre kirliliği de kısmen önlenmiş olmaktadır. Öte yandan UK'lerin biriktirilmesi veya atılması, önemli oranda çevre kirliliğine yol açmaktadır. UK'lerin neden olduğu çevre problemleri arasında, tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, yağmur ve rüzgâr erozyonu, toprakta süzülme dolayısıyla toksik madde taşınması ve radyasyon sayılabilir [7].

Tablo 1.8. Türkiye'deki kömürle çalışan termik santraller [6]

No	Santral adı	Yakıt cinsi	Kurulu güç (MW)	Bulunduğu il
1	Afşin-Elbistan A	Linyit	1355	Kahramanmaraş
2	Afşin-Elbistan B	Linyit	320	Kahramanmaraş
3	Çan	Linyit	320	Çanakkale
4	Çatalağzı	Taşkömürü	300	Zonguldak
5	Çayırhan Park	Linyit	620	Ankara
6	Çolakoğlu 2	Taşkömürü	190	Kocaeli
7	Kangal	Linyit	457	Sivas
8	Kemerköy	Linyit	630	Muğla
9	Orhaneli	Linyit	210	Bursa
10	Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
11	Soma A-B	Linyit	1034	Manisa
12	Sugözü-İskendurun	İthal kömür	1210	Adana

Tablo 1.8. Türkiye'deki kömürle çalışan termik santraller'in (devamı)

13	Tunçbilek A-B	Linyit	429	Kütahya
14	Yatağan	Linyit	630	Muğla
15	Yenköy	Linyit	420	Muğla

Tablo 1.9'da Türkiye'deki uçucu küllerin, Tablo 1.10'da ise F ve C tipi uçucu küllerin ortalama kimyasal kompozisyonları verilmektedir.

Tablo 1.9. Türkiye'deki bazı UK'lerin kimyasal kompozisyonları [6]

Bileşik	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan
SiO ₂	27.40	56.80	58.59	49.13
Al ₂ O ₃	12.80	24.10	21.89	15.04
Fe ₂ O ₃	5.50	6.80	9.31	8.25
CaO	47.00	1.40	4.43	13.20
MgO	2.50	2.40	1.41	4.76
Na ₂ O	0.30	3.00	0.24	2.20
K ₂ O	-	-	1.81	1.76
SO ₃	6.20	2.90	0.41	3.84

Uçucu kül tanecikleri genellikle küresel yapıda olup büyüklükleri 1-200 µm arasında değişmektedir. Özgül ağırlıkları 1.9-2.4 gr/cm³ arasında değişen Uçucu külün çimentoya katılması ile betonda veya çimento hamurunda biraz hacim genişmesi olmakta, rötre ise azalmaktadır.

ASTM C618'e göre uçucu küller iki geniş kategoriye ayrılmaktadır [11].

F ve C tipi olmak üzere iki tiptir. F tipi uçucu kül genellikle %10'dan daha az CaO içerir. Buna karşın C tipi uçucu kül ise %15'ten %35'e kadar CaO içerir.

a) F sınıfı uçucu küller Şekil 1.4'de verilmekte olup, bitümlü kömürlerden elde edilir.

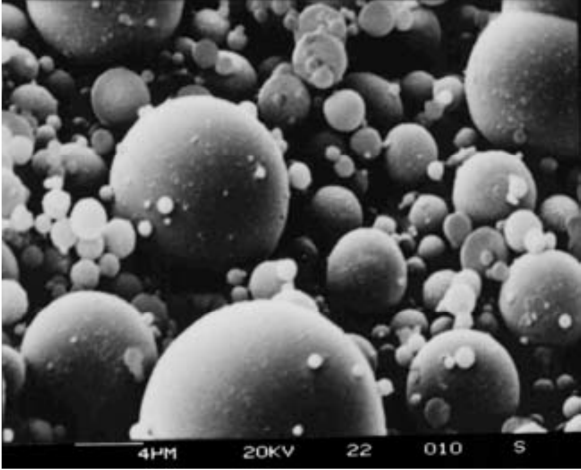
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%70$ şartını sağlayan küllerdir,

b) C sınıfı küller ise Şekil 1.5’de verilmekte olup, genelde linyitler ve yarı bitümlü kömürlerden elde edilir.

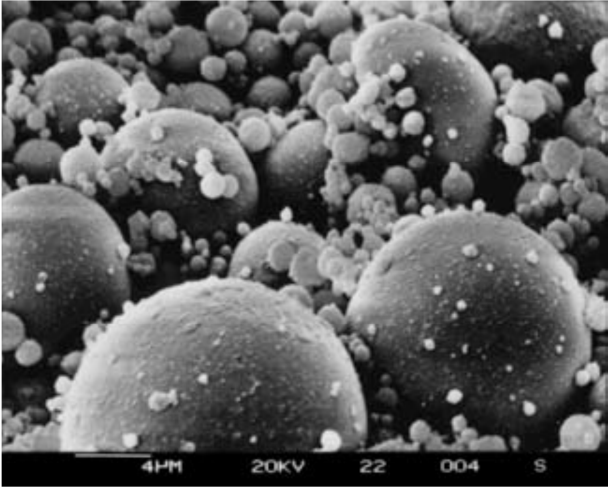
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%50$ şartını sağlayan küllerdir.

Tablo 1.10. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonu [11]

Bileşik	F Tipi		C Tipi	
	Düşük F’li	Yüksek F’li	Düşük C’li	Yüksek C’li
SiO_2	46-57	42-54	25-42	46-59
Al_2O_3	18-29	16.5-29	15-21	14-22
Fe_2O_3	6-16	16-24	5-10	5-13
CaO	1.8-5.5	1.3-3.8	17-32	8-16
MgO	0.7-2.1	0.3-1.2	4-12.5	3.2-4.9
K_2O	1.9-2.8	2.1-2.7	0.3-1.6	0.6-1.1
Na_2O	0.2-1.1	0.2-0.90	0.8-6	1.3-4.2
SO_3	0.4-2.9	0.5-1.8	0.4-5	0.4-2.5
LiO_2	0.6-4.8	1.2-5	0.1-1	0.1-2.3
TiO_2	1-2	1-1.5	<1	<1



Şekil 1.4. F tipi uçucu kül [57]



Şekil 1.5. C tipi uçucu kül [57]

Yapılan bir çalışmada Seyitömer ve Çayırhan termik santralleri uçucu küllerinin çimentoda priz başlama ve sonu sürelerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla uçucu küller, çimentonun ağırlıkça %5, 10, 15 ve 20'si yerine ikame edilerek kullanılmıştır. Uçucu küllerin çimentoların priz başlama ve sonuna olan etkisi deneylerle tespit edilmiştir. Sonuç olarak uçucu küllerin, çimentoda priz başlama ve priz sonu süreleri kontrol çimentolarına göre arttığı ifade edilmiştir [43].

Günümüzde önemli bir yapı malzemesi olarak kullanımı yaygınlaşan gaz betonun üretiminde kullanılan ana hammaddelerden biri olan kuvars yerine uçucu kül, mineral katkı malzemesi olarak ülkemizde geniş rezervlere sahip genişletilmiş perlit, bağlayıcı olarak da çimento, kireç ve alçı kullanılarak hafif yapı malzemesi

üretimi amaçlanmıştır. Yapılan bu çalışmanın sonuçlarına göre deney örneklerinin birim ağırlık ve gözeneklilik değerlerinin ticari gaz beton değerlerine uyum sağladığı, bununla birlikte basınç dayanım değerlerinin standart değerlerin bir miktar altında kaldığı belirlenmiştir. Buna uçucu külün kimyasal ve fiziksel özelliklerinin stabil olmaması ve otoklav kür koşullarında mikro yapıyı etkileyen farklı faz yapılarının gelişmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [44, 45].

Çimento yerine kullanılan F sınıfı uçucu kül miktarının kendiliğinden sıkışan betonun özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Sonuçta uçucu külün maliyet ve hidratasyona olumlu etkisi gibi avantajları da dikkate alındığında, kendiliğinden sıkışan beton karışımlarında çimento yerine %30 veya %40 oranlarında uçucu kül kullanılmasının dayanım özellikleri bakımından daha iyi olacağı görülmüştür [46].

Uçucu kül ve metakaolin içeren kendiliğinden yerleşen harçlarda yayılma, V hunisi akma zamanı, viskozite ve priz alma süresi gibi taze özellikler ile basınç dayanımı deneysel olarak incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, uçucu küllü kendiliğinden yerleşen harçlarda priz alma süresi kontrol harcına göre oldukça uzamıştır. Ayrıca metakaolinin uçucu küllü kendiliğinden yerleşen harçlarda priz alma süresini önemli oranda azalttığı ve viskoziteyi ise arttırdığı gözlenmiştir [47].

1.3. Ponza

Ponza; boşluklu, süngerimsi, volkanik olaylar neticesinde oluşmuş, fiziksel ve kimyasal etkenlere karşı dayanıklı, gözenekli camsı volkanik bir kayadır. Oluşumu sırasında bünyesindeki gazların ani olarak yapısını terk etmesi ve ani soğuma nedeniyle, sayısız gözenek içerir. Gözenekler arası genelde bağlantısız boşluklu olduğundan izolasyonu oldukça yüksektir. Yapılan araştırmalarda ponza ile üretilen betonların donma-çözülme dayanıklılıkları, normal betonlardan daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir. Sertliği Mohs skalasına göre 5-6'dır. Kimyasal olarak %75'e varan silis içeriği bulunabilmektedir [48].

Genelde açık renkli olup beyazdan, kreme, mavi, griye kadar değişen renklerde olur, ancak yeşil, kahverengi ve siyah da olabilir. Asidik ve bazik karakterli volkanik

faaliyetler sonucu oluşan; gözenekli bünyesinde kristal suyu olmayan bir kayaç tipidir. Asidik ponza; beyaz, kirli beyaz renkte olup, daha yaygın olarak bulunur ve yoğunluğu $0.5-1 \text{ gr/cm}^3$ arasında değişir. Bazik ponza ise yabancıların “Scoria” dedikleri, Türkçede ise bazaltik ponza olarak bilinen kahverengi, siyahımsı renkte ponza türü olup, özgül ağırlığı $1-2 \text{ gr/cm}^3$ dür [3].

Dünya üzerinde en fazla asidik ponza cinsi bulunmaktadır. Araştırmalara göre Türkiye 3 milyar metreküp ponza rezervi ile oldukça önemli bir potansiyele sahiptir. Bu durumda Dünya rezervlerinin 1/7'sine karşılık gelmektedir [48]. Tablo 1.11'de Dünyadaki, ponza rezerv dağılımları verilmektedir. Tablo 1.12 ve Tablo 1.13'de ise ponzanın fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmektedir.

Tablo 1.11. Dünyadaki ponza rezervleri [48]

Kıtalar ve Ülkeler	Miktar (Milyon ton)
Kuzey Amerika	12 000
Avrupa	5 336
Türkiye	2 836
İtalya	2 000
Avustralya	500
Orta Amerika	80
Güney Amerika	80

Ponzanın kullanım alanları;

1. İnşaat sektöründe
2. Tekstil sektöründe
3. Tarım sektöründe
4. Kimya sektöründe

Ponza betonunun ısı iletkenlik katsayısı dikkate alındığında, normal betondan 6 kat daha fazla yalıtım sağladığı tespit edilmiştir. Bu özelliğinden dolayı asmolen vb

alanlarda kullanımı ile büyük enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ponzaya bu alanlarda kullanım imkânı veren özelliği, onun yüksek puzolonik aktivitesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca yangına dayanıklılık açısından da normal betona kıyasla %20'ye varan oranda daha emniyetli olduğu kabul edilir [48].

Tablo 1.12. Ponzanın fiziksel özellikleri [20]

Fiziksel Özellikler	
Renk	Açık griden. kirli beyaza
Kristal Şekli	Amorf
Sertlik (MOHS)	5.5 – 6.0
K.B Hacim Ağırlığı (gr/cm ³)	0.32 – 0.97
Gerçek Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)	2.15 – 2.65
Porozite (%)	45 – 90
Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.08 – 0.20
Isınma Isısı (cal /gr.°C)	0.24 – 0.28
Ses Yalıtımı (dB)	40 – 55
Su Emme (Ağırlıkça %)	30 – 70

Tablo 1.13. Ponzanın kimyasal özellikleri [20]

Kimyasal Özellikler	
pH	7 – 7.30
Radyoaktivite	Yok.
Suda Çözünen Madde Miktarı (Ağırlıkça %)	£ 0. 15
Asitte Çözünen Madde Miktarı (Ağırlıkça %)	£ 2.9
Uçucu Madde (Ağırlıkça %)	Yok
Asitlerle Etkileşim (*)	İnert.
Alevlenme Derecesi (°C)	Yok.
Ergime Derecesi (°C)	>900

(*) Pomza (ponza) sadece hidroflorik asit ile etkileşerek toksik silikon tetraflorit gazı çıkarır.

Doğada ponza asidik ve bazik olmak üzere iki tipte bulunur. En önemli nedeni yüksek puzolonik aktiviteye sahip olmasıdır. Türkiye'deki ponza rezervleri Dünya rezervinin 1/7 sini oluşturur.

Ülkemizin rezerv kaynakları bakımından zengin olması sebebiyle ponza kullanılarak hafif beton üretilmesi ve üretilen betonların agresif ortamdaki dayanım özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Üretilen numuneler normal su, tuzlu su ve asidik ortamda kür edilmiştir. Tuzlu su ortamında kür edilen beton numunelerin normal su ortamında kür edilen numunelere göre basınç ve eğilme dayanımlarında %5 daha az değer kaybettiği ifade edilmektedir [49].

Çimento içerisinde ponzanın kullanılabilirliği araştırılmış, ponza katkılı çimentolu numunelerin 7 ve 28 günde eğilme ve basınç dayanımlarında düşüslere neden olmakla birlikte, ilerleyen yaşlarda onlara çok yakın ya da onlardan daha yüksek değerler vermiştir. Ayrıca rötre ve sülfat genleşme değerlerinde de önemli düşüsler gözlenmiştir. Sonuç olarak Erzincan ve Nevşehir yöresi ponzalarının çimento üretiminde çimento ağırlığının maksimum %20'si oranında puzolonik katkı maddesi olarak kullanılabilceğini göstermiştir [50, 51].

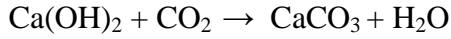
Yazıcıoğlu yapmış olduğu çalışmada ponza hafif agregası ile üretilen hafif beton harçlarının otoklavda basınçlı buhar ile kür edildikten sonra fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Üretilen numuneler kalıptan alındıktan 24 saat sonra 2, 4, 6, 8 ve 10 saat süreyle otoklavda basınçlı buhar kürüne tabi tutulmuşlardır. Aynı özellikteki numunelerden bir bölümü 7 ve 28 gün olmak üzere havada ve suda kür edilmişlerdir. Ponzalı harç numunelerinin 8 saat basınçlı buhar kürüne tabi tutulmaları ile fiziksel ve mekanik özelliklerinin havada ve suda kür edilen numunelere göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür [52].

1.4. Sönmüş Kireç (Ca(OH)₂)

Fabrikalardan elde edilen sönmüş kireç yalnızca Ca(OH)₂ olup ince toz halindedir. Çimento gibi torbalar halinde satılır ve hidrate kireç denir. Kireç şantiyelerde havuzlarda fazla su ile söndürüldüğünde ise oluşan ürün Ca(OH)₂+nH₂O şeklindedir ve yağlı kireç olarak adlandırılır. Sönmüş kuru toz kireç, sönmemiş kirecin higroskopik özelliği nedeniyle suyla olan kontrollü reaksiyonu sonucunda elde edilmektedir. Sönmemiş kireç suyla reaksiyona girdiğinde önceleri çok hızlı

yükselen sıcaklık, sönmenin sonlarına doğru sabitleşir. Sönme eğrisinin karakteristiği CaO'in pişme biçimine bağlıdır. En fazla ısı yükselmesi en az su kullanımı durumunda olur. Eğer kireç tamamen söndürülmezse, bu olay yapıda tamamlanır ve kirecin kullanıldığı yerlerde çatlak vb. kusurlar oluşur. Bu nedenle kirecin söndürülme işlemine dikkat edilmelidir. Kireç taşları, şantiyelerde açılan kireç havuzlarında en az 15 gün su içinde bekletilmelidir [4].

Sönmüş kireç su ile karıştırıldıktan sonra elde edilen hamur havada bırakılınca, havadaki karbondioksiti alarak aşağıda görülen reaksiyon sonucu, suda erimeyen kalsiyum karbonata dönüşür.



Sönmüş kireç, bazik karakterde bir malzeme olduğundan demir ve çelikle tepkimeye girmez. Buna karşın alüminyum, kurşun ve pirinçle kimyasal reaksiyona girebilir.

1.5. Alkaliler

Portland çimentosu kullanılmadan bir bağlayıcı üretimine yönelik çalışmalardan en ilgi çeken, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların alkalilerle aktivasyonudur.

Teorik olarak silika ve alümina içeren her malzeme alkalilerle aktive edilebilir. Günümüze kadar yapılan araştırmalarda kaolinitik killer, metakaolin, uçucu kül, kırmızı çamur, zeolit gibi malzemelerin aktivasyonunda en yaygın olarak kullanılan aktivatörler, sodyum veya potasyum hidroksit (POH, NaOH) ile cam suyu (Na_2SiO_3) veya potasyum cam suyu ($\text{nSiO}_2\text{K}_2\text{O}$) karışımıdır [4].

Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar, normal Portland çimentoları ve betonlarına göre erken ve daha yüksek mekanik dayanım [53], daha düşük hidrasyon ısısı ve agresif kimyasallara karşı daha iyi dayanıklılık gibi bazı önemli avantajlara sahiptir.

Bunun yanında ani priz, mikro çatlak oluşumu ile yüksek büzülme ve çiçeklenme gibi bazı dezavantajları vardır [4].

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi amorf karakterli malzemeler bir Aktivatör vasıtasıyla aktive edilerek bir bağlayıcıya dönüştürülebilmektedir. Aluminosilikat uçucu küllerin aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda “geopolimer” adı verilen amorf yapıdaki inorganik polimerler oluşurken, yüksek fırın cürufunun reaksiyonu sonucunda çimento esaslı bağlayıcılardaki C-S-H jeline benzer hidrate kalsiyum silikat oluşmaktadır [54].

Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar, normal Portland çimentoları ve betonlarına göre erken ve daha yüksek mekanik dayanım, daha düşük hidrasyon ısı ve agresif kimyasallara karşı daha iyi dayanıklılık gibi bazı önemli avantajlara sahiptir. Bunun yanında, ani priz, mikro çatlak oluşumu ile yüksek büzülme ve çiçeklenme gibi bazı dezavantajları vardır [54]. Ani prizi önlemek için yapılan bazı çalışmalarda fosforik veya malik asit kullanılmıştır [55, 56]. Ani priz oluşması bazı durumlarda avantaj sağlayabilir.

Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların geçmişten günümüze gelişimindeki bazı önemli adımlar Tablo 1.14’de özetlenmiştir.

Tablo 1.14. Alkali aktive ve alkalin bağlayıcıların tarihsel gelişimi [1]

Yazarlar	Yıl	Önem
Feret	1939	Çimentoda cüruf kullanımı
Purdon	1940	Alkali-cüruf kombinasyonları
Glukhovsky	1959	Alkalin çimentoların teorik esasları ve gelişimi
Glukhovsky	1965	Bilesen olarak doğal maddelerin kullanımı nedeniyle “alkalin çimentolar” adının ilk kullanımı.
Davidovits	1979	“Geopolimer” terimi-daha fazla polimerizasyonu vurgular.
Malinowski	1979	Antik kemerli su yollarının karakterizasyonu
Fors	1983	F-çimentosu (cüruf-alkali-süper akıskanlaştırıcı)

Tablo 1.14. Alkali aktive ve alkalın bağlayıcıların tarihsel gelişimi'nin (devamı)

Langton ve Roy	1984	Antik yapı malzemelerinin karakterizasyonu.
Davidovits ve Sawyer	1985	"Pyrament" patent.
Krivenko	1986	R ₂ O-RO-R ₂ O ₃ -SiO ₂ -H ₂ O.
Malolepsy ve Petri	1986	Sentetik melit cüruflarının aktivasyonu.
Malek ve diğer.	1986	Cüruf çimentoları-düşük seviyede radyoaktif atık oluşturur.
Davidovits	1987	Antik ve modern çimentoların kıyaslanması.
Deja ve Malolepsy	1989	Klorürlere direnç görülmüştür.
Kaushal ve diğer.	1989	Zeolit oluşumunu içeren alkalın karışımlarından adiabatik (tam yalıtımlı) kür edilmiş nükleer atık oluşumları
Roy ve Langton	1989	Antik beton ile benzerlikleri
Majumdar ve diğer.	1989	C12A7-cüruf aktivasyonu.
Talling ve Brandstetr	1989	Alkalilerle aktive edilmiş cüruf.
Wu ve diğer.	1990	Cüruf çimentolarının aktivasyonu.
Roy ve diğer.	1991	Hızlı priz alan alkali-aktive bağlayıcılar.
Roy ve Silsbee	1992	Alkali-aktive bağlayıcılar: genel bakış
Roy ve Malek	1993	Cüruf çimentosu
Glukhovsky	1994	Antik, modern ve gelecek betonları.
Krivenko	1994	Alkalın bağlayıcılar
Wang ve Scrivener	1995	Cüruf ve alkalilerle aktive edilmiş cürufun mikroyapısı.

Alkali aktive ve alkalın bağlayıcıların uygulama alanları [57].

1. Yapısal betonlarda
2. Duvar bloklarında

3. Beton kaldırımlarda
4. Beton büzler
5. Elektrik direkleri
6. Gaz beton
7. Isıya dayanıklı beton
8. Petrol kuyuları
9. Tehlikeli ve radyoaktif atıkların stabilizasyonu gerektiren betonlarda
10. Sulama sistemleri, dalgakıranlar
11. Prefabrik ve yerinde bina inşaatları
12. Döşemeler, temeller

Bu malzemelerin alternatif kullanım alanı ise, nükleer atık yönetimi ve zehirli metallere stabilizasyonu da dahil olmak üzere atık yönetimidir. Alkali alüminosilikat reaksiyonları, atıkları ortadan kaldırmada önemli bir role sahiptir. Bariyer olarak veya kapsülleşmede kullanıldığında hem matrisin geçirimsizliğini azaltır, hem de fazların yapısında oluşan belli iyonları sabitleştirir. Zararlı radyoaktif atıklar bentonit, kaolinit, halloysit ve dickite gibi killerle reaksiyona girerek, dayanıklı monolitik katılar oluşturabilir [57]. Metakaolin ve doğal zeolitler ile karıştırılarak elde edilen alkali aktive edilmiş cürüflü matrislerin stronsiyum (Sr) ve sezyum (Cs) gibi radyoaktif atıkların zararlı etkilerine karşı geliştirilebilirliği araştırılmış ve AAYFC'li betonların bu tip atıkların emilimini daha iyi yapabildiği görülmüştür [58].

Kaolin kilinin 600-800 °C arası sıcaklıklarda kalsine edilmesiyle üretilen bir mineral katkı olan metakaolin ile üretilen harç örneklerinin incelenmesi sonucunda metakaolin katkısının, harçların ASR, klor geçirimsizliği ve kapillarite katsayısını önemli ölçüde azalttığı sonucuna ulaşılmıştır [59].

Metakaolin çimentoya üç farklı oranda (%0-10-20) ikame edilmiştir. Özellikle suda kür edilmiş metakaolin katkı oranının %20'ye ulaştığı betonların performanslarında basınç dayanımı, su geçirimsizliği, su emme, klorür iyon geçirimsizliği, kuruma rötresi, sülfat dayanımı, porozite ve boşluk dağılımlarında iyileşme tespit edilmiştir [60].

%20 metakaolin, %40 yüksek fırın cürufu ve %40 uçucu kül kullanılmış. Metakaolin hidratasyon ısını artırırken, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ise düşürmüştür [61]. Metakaolin ve silis dumanı çimento yerine %5, 10, 15 ve 25 oranında ikame edilmiştir. Metakaolin ve silis dumanı su emme, boşluk oranı ve basınç dayanımlarını olumlu yönde etkilemiş olduğu ifade edilmektedir [62, 63].

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda alkalilerle aktive edilerek kullanılmış olan puzolanlar [64];

1. Kaolin kili
2. Metakaolin
3. Uçucu küller
4. Yüksek fırın cürufu
5. Uçucu kül ve cüruf karışımları
6. Uçucu kül ve metakaolin
7. Yüksek fırın cürufu ve metakaolin
8. Yüksek fırın cürufu ve kırmızı çamur
9. Uçucu kül ve kırmızı çamur
10. Yüksek fırın cürufu ve silis dumanı
11. Zeolit

Alkalileri 6 grupta inceleyebiliriz [57];

1. Kostik alkaliler: MOH
2. Zayıf asitli tuzlar: M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 vd.
3. Silikatlar: $M_2O.nSiO_2$
4. Alüminatlar: $M_2O.nAl_2O_3$
5. Alüminosilikatlar: $M_2O.nAl_2O_3.(2-6).SiO_2$
6. Güçlü asitli tuzlar: M_2SO_4

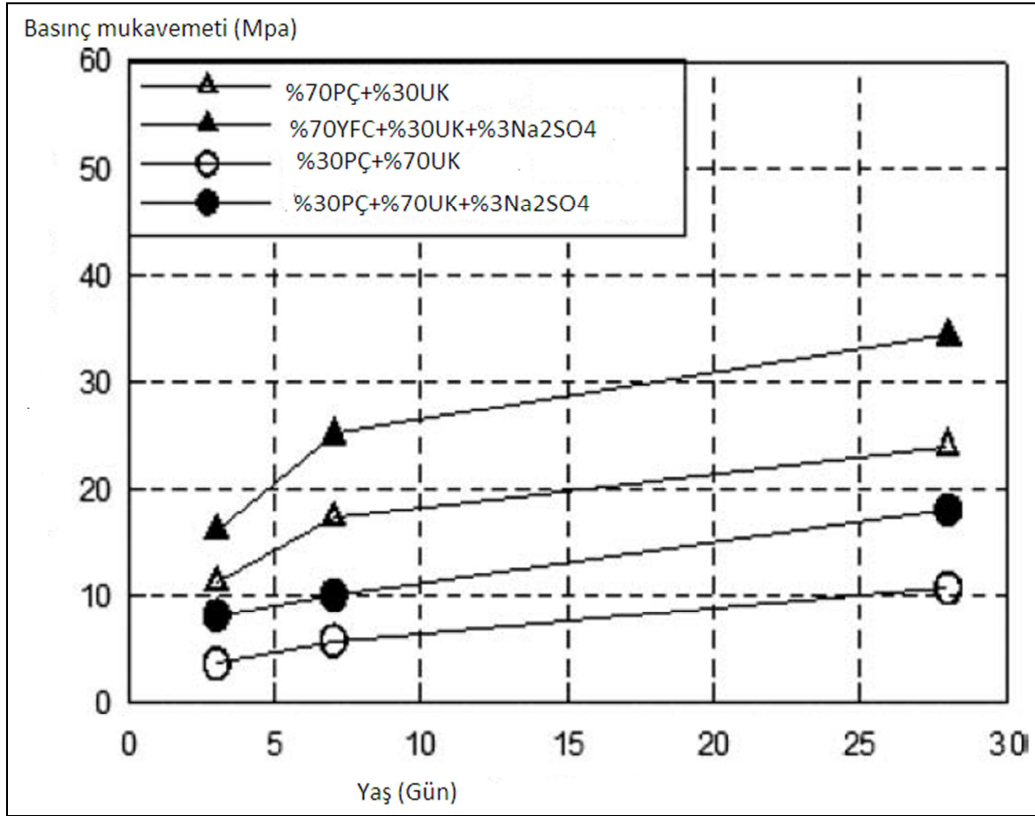
En çok kullanılan alkaliler; sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum sülfat ve sodyum silikat. Sodyum karbonat ve sodyum sülfat doğal kaynaklardan elde edilir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit ise sadece üretilerek elde edilir [57].

Tablo 1.15’de sodyum silikat içeriğindeki su miktarının artmasıyla birlikte yoğunluklarının da azaldığı görülmektedir.

Tablo 1.15. Na_2SiO_3 ’ın içeriğindeki su miktarının değişimiyle birlikte değişen yoğunluklarını gösterir [57]

Formül	Yoğunluk
$\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_2$	2.614
$\text{Na}_2\text{O}.2\text{SiO}_2$	2.50
$\text{Na}_2\text{O}.n\text{SiO}_2$	-
$\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_2.5\text{H}_2\text{O}$	1.75
$\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_2.6\text{H}_2\text{O}$	1.81
$\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_2.9\text{H}_2\text{O}$	1.65

Na_2SO_4 (sodyum sülfat) birçok çalışmada CEM I ve kireç bazlı bağlayıcılar için alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Ancak erken ve geç yaşlarda etrenjit oluşmasına sebep olur. Bu konuyla ilgili yapılmış çalışmalara örnek olarak Şekil 1.6’daki grafik gösterilmiştir.



Şekil 1.6. CEM I ile UK karışımı harç numunelerinin Na_2SO_4 ile aktive edilmesi sonucu basınç dayanım değerlerinin birbirleriyle karşılaştırılması [57]

AAYFC bağlayıcılarının ana hidrasyon ürünü C-S-H'tır. Ancak alkali aktivasyon yönteminde, aktive edilecek hammaddenin tipine bağlı olarak farklı mikro yapıya sahip farklı reaksiyon ürünleri oluşmaktadır. Bu farklılıklardan dolayı, alkali aktivasyon prosesi iki farklı model ile tanımlanmaktadır. İlk model $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ dördü sistemli olup, CaO açısından zengindir. İkinci modelde orijinal malzeme düşük CaO içeriğine ($<1\%$), yüksek SiO_2 ve Al_2O_3 içeriğine sahiptir. İlk model genellikle camı YFC'nin alkali aktivasyonuna işaret etmektedir. Ana reaksiyon ürünü, C-S-H jeline benzer hidrate kalsiyum silikattır. Bu faz Portland çimentosunun hidrasyonunda oluşandan farklı olup, Ca/Si oranı daha düşüktür. Diğer fazların veya hidrate bileşenlerin oluşumu, kullanılan aktivatörün tipine ve miktarına, cürufun yapısına, kompozisyonuna ve kür koşullarına bağlıdır. İkinci modelde aktivasyona maruz kalacak malzeme, alüminosilikat uçucu küllerdir. Bu aktivasyonda reaksiyon sıcaklığı önemli bir rol oynar. Ortam sıcaklığında reaksiyon hızı çok düşüktür. Bununla birlikte 40 ile 85 °C arasındaki sıcaklıklarda kür ile reaksiyon hızı önemli derecede artar ve 2 saatte 20MPa'a ulaşan dayanımlar elde

edilebilir. Bu durumda oluşan reaksiyon ürünleri, hidrate alüminosilikat zincirlerince oluşturulan negatif yükleri alkalın iyonlarınca dengelenmiş amorf yapıdaki inorganik polimerlerdir [4]. Betonun hidratasyonu sırasında Portlanditin azalması tobermoritin artmasına sebep olur böylece betonda dayanım ve dayanıklılık artar. Geopolimer örnekleri buharlaşmayacak şekilde vinil malzemeye sarılarak, su kürü yerine 75 °C etüvde en az 2 gün süre ile bekletilirse dayanım değerlerinde daha iyi neticeler elde edildiği görülmüştür [65-67]. Farklı aktivatörlerin varlığı nedeniyle hidratasyon ürünlerindeki değişim hidratasyon prosesini ve mikroyapı oluşumunu değiştirerek dayanım gelişimini etkilemektedir.

Geopolimer betonu ile sarılan donatılı numuneler deniz duvarında tutulmuş ilk 7 gün içinde geopolimer betonun üstünde mikro çatlaklar oluşmuştur. Bu sorunu çözmek için uygun agrega seçimi önerilmektedir [68].

Geopolimer malzemelerin, çelik çürüfusu ile birlikte kullanılarak aşınma direnci ve yapışma aderansı incelenmiştir. Sonuç olarak çelik çürüfusu aşınma direncini kayda değer biçimde geliştirdiği gözlenmiştir [69].

Geopolimer üretiminde en uygunsuz kompozisyon C sınıfı uçucu kül, en uygun F sınıfı uçucu kül deneysel çalışmada kullanılmıştır. 30 MPa basınçla şekillendirilen 40-60-80-100 °C sıcaklıklarda, 2-4-6-24-48-72 saat aralığında ısıl işlemlerle üretilen geopolimer tuğlaların basınç dayanımı, su tutma, yoğunluk vb. değerlerine bakılmıştır. C sınıfı uçucu küllerle üretilen geopolimer tuğlalar geleneksel tuğla malzeme standartlarına ulaşmaktadır. F sınıfı uçucu küllerle üretilen geopolimer tuğlalar 60 °C sıcaklıkta 24 saat ısıl işlem sonrasında elde edilen basınç dayanım değeri 45 MPa değerini verdiği belirtilmiştir [70].

Paloma ve ark, optimum alkalın aktivatör konsantrasyonunu çürüf kütlesinin %3-5'i arasında Na₂O olarak bildirmiştir. Bu oranların üzerinde Na₂O kullanımının maliyeti artırdığını fakat %8 Na₂O kullanımının optimum dayanımı yakaladığını tespit etmişlerdir. Dayanım üzerinde etkili en önemli faktör aktivatörün tipi olup sıralama Na₂SiO₃+NaOH>>Na₂CO₃>NaOH şeklindedir [71].

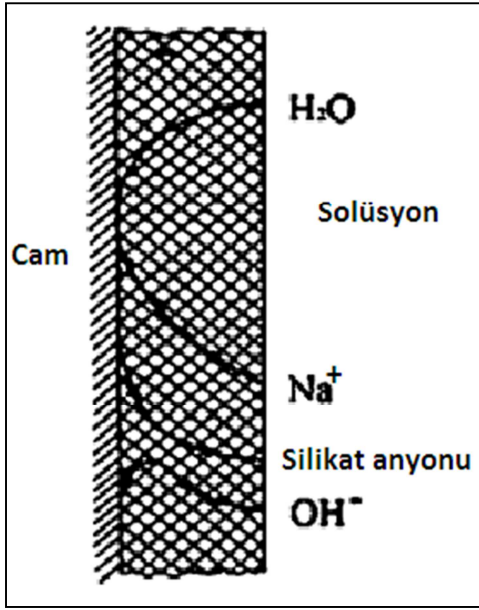
Portland çimentosuyla mukayese edilirse, NaOH ile aktive edilen sistemler hareketli, $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ olan sistemler ise hareketlidir [72].

Bakharev ve arkadaşları, alkali aktive edilmiş cürüflu karışımları hazırlarken sodyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum karbonat ve sodyum fosfat alkalileri kullanmışlar ve kür sıcaklığını 60 °C belirlemişlerdir. Elde edilen basınç dayanımları ise 20-40 MPa arasındadır. En etkili aktivatörün sodyum silikat olduğunu ileri sürmüşlerdir. En uygun silikat modülünün ise $M_s=0.75$ olması gerektiğini öngörmüşlerdir [73].

NaOH, Na_2SiO_3 ve Na_2CO_3 alkalilerin Portland çimentosu kullanılan cürüflu harçların priz sürelerini hızlandırmış, işlenebilirliklerini azaltmıştır [74].

Na_2O oranının artışı pH değerini artırırken, SiO_2 oranının artışı ise pH değerini düşürür. Ayrıca alkali aktivatör dozajı artarsa priz süresini azalttığı fark edilmiştir [75, 76].

AAFC'li bağlayıcılar, CEM I'ye kıyasla önemli teknik avantajlara da sahiptir. Bunlar; daha erken ve daha yüksek mekanik özellikler [77], düşük porozite, düşük permeabilite, hidratların düşük çözünürlüğü, donma-çözülme etkilerine daha yüksek dayanıklılık, donatılı elemanlarda düşük donatı korozyonu hızı, yüksek klorür difüzyon hızlarından kaynaklanan etkilere dayanıklılık [78], daha iyi agrega-matris ara yüzeyi oluşumu olarak sayılabilir. Ayrıca düşük üretim maliyeti, enerjinin verimli kullanımı ve çevre dostu olması da önemli özelliklerindedir. Bununla birlikte hızlı priz, yüksek büzülme, ilerleyen dönemlerde mikro çatlak oluşumu, çiçeklenme gibi dezavantajları vardır. Bazı araştırmacılar ASR nedeniyle genleşme oluşturabilmesi olasılığının daha fazla olduğunu ileri sürmektedirler [54, 79].



Şekil 1.7. Sodyum silikat alkalisinin su içindeki yüzey tabakasında iyon konsantrasyonlarının çözünmesi [57]

Şekil 1.7’de yüksek fırın cürufu su ile çok yavaş reaksiyona girer. Bununla birlikte, alkali aktivatörden gelen hidroksil iyonlarının (OH^-) YFC’deki yapının çözünmesini sağlayarak hidrasyon hızını arttırdığı bilinmektedir.

BÖLÜM 2. KONU İLE İLGİLİ YAPILMIŞ OLAN LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

2.1. Alkali Aktive Edilen Harçların Dayanım ve Dayanıklılığı İle İlgili Yapılmış Olan Çalışmalar

Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu/uçucu küllü bağlayıcılarda Na_2O oranını %4 ve %6 oranında tutarak, kuruma büzülmesi, basınç ve eğilme dayanımı ayrıca su emme deneyleri yapılmış, kuruma büzülmesi değerleri hariç diğer deneyler Portland çimentolarıyla mukayese edilebilir değerler elde edilmiştir [80].

Yüksek fırın cüruf ağırlığının %7.5 sönmüş kireç, %1 sodyum silikat ve %2 sodyum karbonat kullanılmıştır. 28 günün sonunda elde edilen basınç dayanım değerlerinde sodyum silikat kullanılan alkalili bağlayıcılar sodyum karbonat kullanılan numunelerden daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir [81].

NaOH ve Na_2CO_3 ile aktive edilen yüksek fırın cürufu pastalarda en iyi erken dayanımı NaOH ile aktive edilen numunelerden elde edilmiştir. Ayrıca AAS numuneleri su içinde kür edilirse basınç dayanımlarında %15 ile 18 arasında düşüş olduğu belirtilmiştir [82].

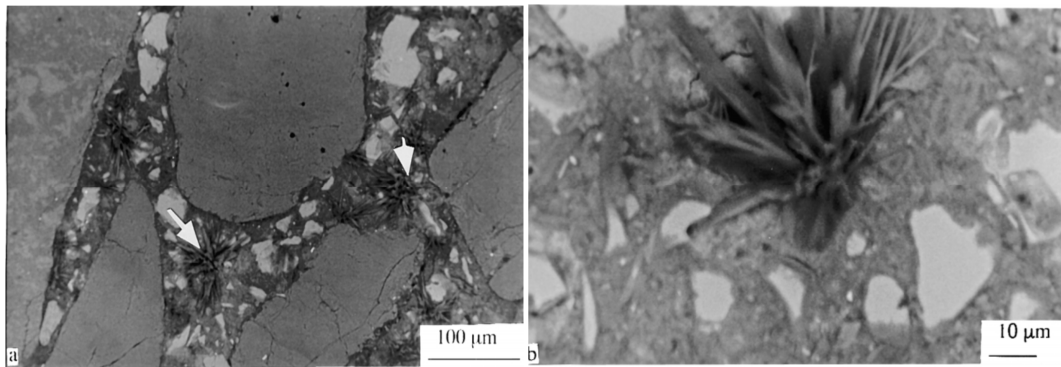
%5 Na_2SO_4 içeren çözelti içinde 12 ay bekletilen AAYFC betonların %17, Portland çimentosunun ise %25, %5 MgSO_4 'lı çözelti içinde bekletilen AAYFC betonlarının ise %23, Portland çimentosunun ise %37 oranlarında düştüğü gözlenmiştir. AAYFC'li betonlar asitli çözeltilere maruz kaldıklarında Portland çimentolu betonlardan daha iyi performans gösterirler ASR (alkali silika reaksiyonu) etkilerinde tam tersi bir durum söz konusudur [83-86]. Oysa F. Puertas ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada ise reaktif agrega (opal, reaktif silis içeriği %21) ve alkali olarak NaOH kullanılmış olup, ASR etkisi sonucu AAYFC betonlarındaki genleşme miktarı (<%0,02), CEM I betonlarından daha az olduğu görülmüştür [87, 88]. Fakat alkali

aktive edilmiş uçucu küllü betonlarda reaktif agregalar kullanılarak, CEM I'li betonlara kıyasla alkali-silika reaksiyonuna daha az hassasiyet gösterdikleri gözlenmiştir [89].

Puertas ve arkadaşları, AAYFC betonlarında ASR etkisini araştırmışlardır. Aktivatör olarak cam suyu kullanılmıştır. Reaktif silisli agregalar kullanıldığında Portland çimentolarında meydana gelen genişlemenin AAYFC'li betonlara göre 4 kat daha fazla olduğunu, kalkerli agregalar kullandıklarında ise her iki harçta da genişleme olmadığını tespit etmişlerdir [90].

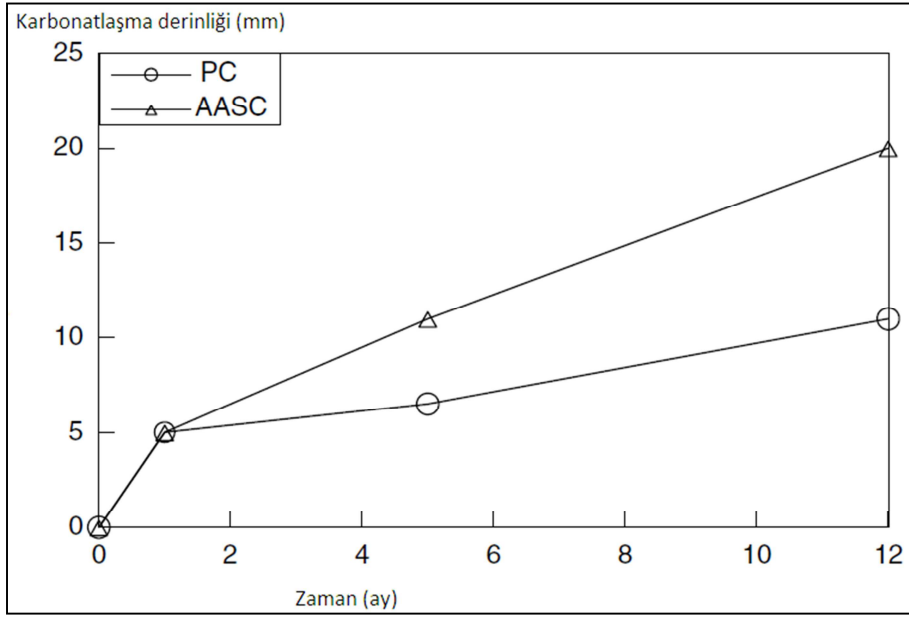
Collins ve Sanjayan, CEM I kullanmadan alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu betonlar üretmişler, farklı kür koşullarında basınç dayanım gelişimleri takip edilmiş, 3 tipte üretilen numunelerin mikro çatlakları ölçülmüş olup, kür nemi eksik olan numunelerde mikro çatlak gelişiminin yükseldiği ve dayanım değerlerinin de önemli ölçüde azaldığı gözlenmiştir [91, 92].

AAYFC betonu CO_2 'e maruz bırakıldığında C-S-H ile reaksiyonundan kalsiyum karbonat, dekalsifike (Si bakımından zengin, Ca tüketilmiş) C-S-H ve alüminosilikat jeli oluşur. AAYFC betonunun Ca içeriğinin düşüklüğünden dolayı, $CaCO_3$ miktarı çok azdır. Karbonatlaşma reaksiyonu sonucunda, matrisin porozitesi artabilir. Bu betonun geçirimsizliğini ve CO_2 girişini artırır. Bu yüzden reaksiyon cephesi içeriye doğru daha hızlı ilerler. Bu nedenle AAYFC betonu karbonatlaşmaya karşı CEM I'li betonlardan daha hassastır (Şekil 2.1) [84, 93].

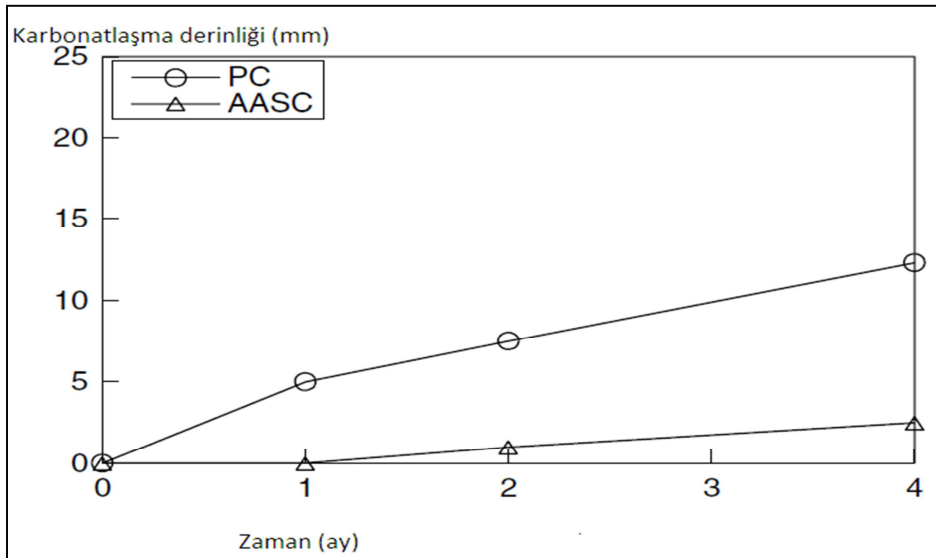


Şekil 2.1. CO_2 bakımından zengin atmosfere maruz AAYFC betonlarının SEM (BSE) görüntüsü [84]

Şekil 2.2’de AAYFC’li betonların karbonatlaşma derinlikleri, CEM I’li betonlardan daha fazla, Şekil 2.3’de ise bilakis %70 bağıl nemden dolayı Portland çimentolu betonların karbonatlaşma derinlikleri, AAYFC’li betonlara göre daha fazla olduğu görülmektedir [57].



Şekil 2.2. AAYFC ve CEM I harçlarının 0.352 M NaHCO_3 (Sodyum bikarbonat, soda) çözeltisi içindeki karbonatlaşma derinlikleri [57]



Şekil 2.3. %20 CO_2 ve %70 bağıl nem içindeki AAYFC ve CEM I harçlarının karbonatlaşma derinlikleri [57]

Yüksek sıcaklıkta kür yapılan AAS betonlarda kuruma büzülmesi etkin bir şekilde azalmış, erken dayanım yükselmiştir. Ancak geç yaşlardaki dayanım düşmüştür. Dayanımdaki bu düşüşün sebebi; yüksek sıcaklıklar reaktif türlerin çözünmesine yardımcı olur. Böylece erken yaşlarda büyük miktarda reaksiyon ürünü oluşur. Bu ürünler daha heterojen ve daha sıkı dağılımlı olup, mikro yapıları düşük sıcaklıklarda kür edilenlerden farklıdır. Bu nedenle, reaksiyon zamanı ilerledikçe difüzyon prosesinin gerçekleşmesi daha fazla zorlaşır ve reaksiyonun daha yavaş ilerlediğini öngörmüşlerdir [94, 95].

Bakharev, yapmış olduğu bu çalışmada 800-1000 °C, Na ve K alkalili geopolimerlerin davranışını incelemiştir. Basınç dayanımları ve büzülmeler incelenmiştir. 800 ve 1000 °C'de küre tabi tutulmuşlardır. 800 °C ısıda sodyum aktivatörlü betonlarda bozulmalar görülmüştür. 1000 °C ısıda potasyum aktivatörlü betonlarda basınç dayanımını düşürmüştür [96].

Geopolimer betonlarında sodyum klorür (NaCl) kullanılması priz süresini geciktirmiştir. Ancak 28 günlük dayanım değerlerini %25 oranında düşürmüştür [97].

Toprak, yapmış olduğu çalışmada termik santral taban külünün (TK) alkali aktivasyonu ile üretilen geopolimerin dayanım, dayanıklılık ve mikro yapı özelliklerini araştırmıştır. TK'ya göre ağırlıkça %8, 12, 16 Na₂O ve %0, 4, 8 ve 12 SiO₂ içeren 12 farklı alkali aktive edilmiş harçlar hazırlanmış 20 saat 85 °C %40 bağıl nemde etüvde kür edilmiştir. TK'nın ağırlıkça %12 Na₂O ve %8 SiO₂ içeren alkalilerle aktive edilmesi sonucunda 25-30 MPa dayanıma sahip geopolimer harçlar üretmişlerdir [98].

F tipi uçucu küllü geopolimerler %5 sodyum sülfat ve %5 magnezyum sülfat, ayrıca %5 sodyum sülfat + %5 magnezyum sülfat çözeltilerinde bekletilmiştir. En fazla bozulma (numunelerde oluşan parçalanma) ve dayanım kaybı sodyum sülfatlı çözeltilerinde gözlenmiştir. NaOH içerikli numuneler sülfatlı sularda diğer sodyum silikat ve potasyum hidroksit içerikli numunelerinden daha stabil oldukları

görülmüştür [99, 100]. Buna benzer bir çalışmayı Bakharev yapmış olup kür şartlarını yüksek sıcaklıklarda oluşturmuş NaOH ile aktive edilen numunelerin dayanımlarının, sodyum silikatlı olanlara göre daha iyi neticeler verdiğini göstermiştir [100].

Brough ve Atkinson, KOH ile aktive edilmiş cürufların sodyum hidroksit ile yapılanlarla benzer sonuçlar verdiğini ileri sürmüştür [101].

Brough ve Atkinson, KOH alkalisini, sodyum silikat alkalisine yerine kullanmışlardır. Ancak daha heterojen ve pürüzlü bir yapı elde etmişlerdir. Ayrıca dayanım değerlerinin de düşük olduğunu gözlemlemişlerdir [102].

24 saat 60 °C de kür edilen, NaOH ve cam suyu ile aktive edilmiş uçucu küllü numunelerde silikat modülünün 1.64 olması dayanım değerlerini artırdığı gözlenmiştir [103]. 80 °C de kür edilen AAS numunelerinin hızlı dayanım aldıkları görülmüştür [104].

Puertas ve arkadaşları, %50 Uçucu kül + %50 Yüksek fırın cürufu ve 10 M NaOH solüsyonu, 25 °C kür yapılan numunelerden elde edilen 28 günlük basınç dayanım değeri 50MPa olarak bulunmuştur. Portland çimentosuyla kıyaslanırsa oldukça iyi değerler vermiştir [105].

Nitrik asit (pH 3), asetik asit (pH 3 ve pH 5) solüsyonları içerisinde bekletilen CEM I'li harçlar AAYFC ve AAUK'lü (alkali aktive edilmiş uçucu kül) harçlara göre daha çabuk aşınmış oldukları belirtilmiştir [106].

F tipi uçucu küllü geopolimerler ve %5 asetik ve %5 sülfürik asit çözeltilerinde bekletilmişlerdir. Sodyum silikat, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit içerikli numunelerde önemli ölçüde bozulmalar oluşmuştur. En iyi performans NaOH içerikli yüksek sıcaklıkta kür edilen numunelerde gözlemlendiği belirtilmiştir [107]. Aynı deneyi deniz suyu, sodyum sülfat ve sülfürik asitli çözeltide bekletilen

metakaolin bazlı alkali aktive edilmiş malzemelerde yapılmış, en iyi mekanik sonuçlar NaOH ile aktive edilen numunelerden elde edilmiştir [108-110].

Didamony ve arkadaşları, sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktive edilen cürüflü harçlar ile sülfata dayanıklı çimentolarla deniz suyunda durabilite deneyleri yapmışlar ve sonuç olarak AAYFC'li çimentoların, sülfata dayanıklı çimentolardan daha dayanıklılık sağladığını gözlemlemişlerdir [111].

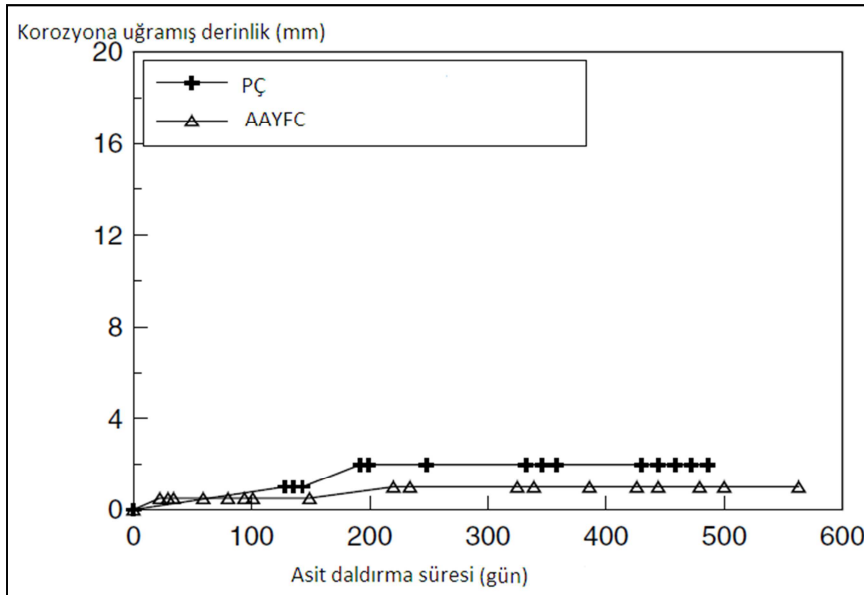
AAYFC'li donatılı betonlarda yapılmış olan korozyon deneyinde, CEM I'li betonlara göre korozyon direncinin daha düşük çıktığı anlaşılmıştır [112, 113]. Ancak Mianda ve Jimenez uçucu küller ile hazırlanmış NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktive edilmiş Portland çimentolu harçların içinde bulundurulmuş donatıların korozyon hızının daha pasif olduğunu göstermişlerdir [114].

CEM I'li betonlarda oluşan nem kaybı, AAYFC betonlarından daha fazla olmasına rağmen kuruma büzülmesi daha azdır [115]. Bunun nedeni; AAYFC betonlarında, CEM I betonlarından daha fazla mezo boşlukların oluşmasıdır. Bir diğer nedeni ise CEM I'li betonların makro boşlukları AAYFC'li betonlardan daha fazladır. Ancak mezo boşluklar içindeki su buharlaşırken, makro boşluklara nazaran daha fazla kapiler güç uyguladıkları için kuruma büzülmesini artırır [116, 117]. Havada soğutularak elde edilen yüksek fırın cürufu, betonda agrega yerine kullanıldığında, gözenekli yapısından dolayı gözeneklerinde nem içerirler, bu durumdan dolayı kuruma büzülmesi değerleri fark edilebilir derecede düşüş göstermiştir [118].

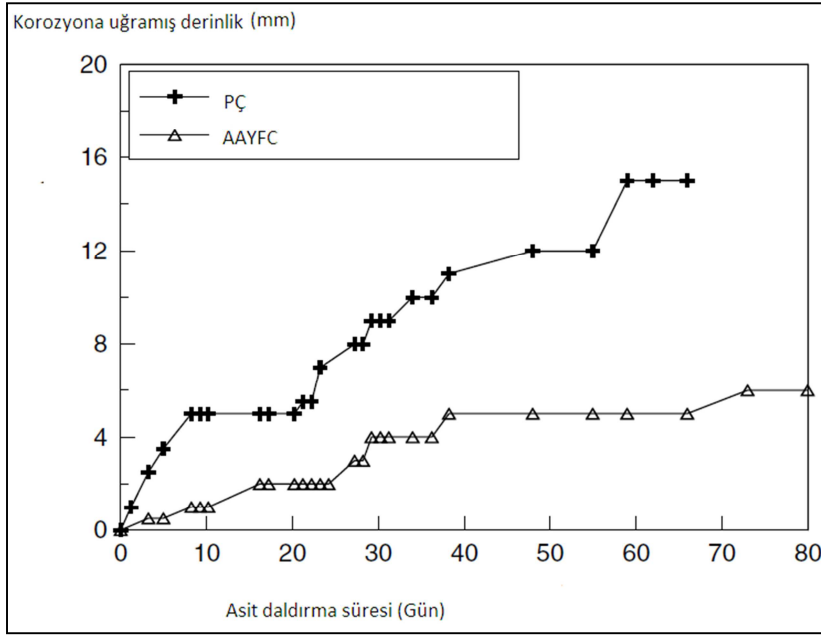
Bakharev, Sanjayan ve Cheng (2003), AAYFC betonlarının asit etkisine karşı dayanıklılığını incelenmiştir. Beton örnekleri pH'ı 4 olan asetik asit çözeltisine maruz bırakılmıştır. İki ay sonunda, AAYFC örneklerinin görünümünde bir değişim olmamış, kütlelerinde ise çok küçük bir artış olmuştur. Bununla birlikte, CEM I örneklerinin yüzeyinde yumuşak beyaz kalıntılar ve kütle kaybı oluşmuştur. CEM I örnekleri 12 ay sonunda %47, AAYFC örnekleri ise %33 dayanım kaybetmiştir. Bir başka deyişle, AAYFC betonu asit çözeltisine maruz kaldığında CEM I betonundan daha iyi dayanıklılık sağlamıştır. Asit çözeltisine maruz kaldığında AAYFC

betonunun iyi performansı, CEM I hamurlarına kıyasla, cüruf hamurlarının daha düşük Ca içeriğine bağlanmıştır. AAYFC hamurlarındaki cüruf parçacıkları ve düşük Ca içeriğine sahip C-S-H (ortalama Ca/Si oranı 1) asit çözeltisinde CEM I hamuru bileşenlerine kıyasla daha kararlı olduğu ifade edilmektedir [83].

Nitrik asit ve asetik asit etkisindeki AAYFC ve PÇ harçlarının korozyon etkilerini irdelemek gerekirse, Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te görüldüğü üzere AAYFC'li harçların korozyon direnci PÇ'li harçlara kıyasla daha iyi değerler vermektedir [57].



Şekil 2.4. Nitrik asit (pH:3) etkisindeki AAYFC ve CEM I harçlarının korozyona uğramış derinliklerinin birbirleriyle kıyaslanması [57]



Şekil 2.5. Asetik asit (pH:3) etkisindeki AAYFC ve CEM I harçlarının korozyona uğramış derinliklerinin birbirleriyle kıyaslanması [57]

AAYFC betonlarının klor difüzyonu etkileri araştırılmış ve yapılan deneyler sonucunda Tablo 2.1'deki değerler elde edilmiştir [57].

Tablo 2.1. AAYFC ve CEM I harçlarının klor difüzyon hızlarının karşılaştırılması [57]

No	Harç	Su/Bağlayıcı	Difüzyon katsayısı
1	CEM I	0.23	321.10^{-12}
2	AAYFC	0.23	75.10^{-12}
3	CEM I	0.35	6390.10^{-12}
4	AAYFC	0.35	240.10^{-12}

AAS çimentolarındaki C-A-S-H (~13 bağ) bağı, Portland çimentosundaki C-S-H (3~5 bağ) bağlarından daha fazla bağ yaparlar. NaOH veya Na_2SiO_3 aktivatörleri kullanıldığında C-A-S-H yapısında tobermorit arasındaki bağ 1.4 nm'a kadar düşer. Bu durumda harca mükemmel mekanik özellikler sağladığı öngörülmüştür [119].

Rasad ve arkadaşları, Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu harçları üretirken cüruf yerine belirli oranlarda kuvars kumunu ikame ederek yeni harçlar üretmişler ve bu ürettikleri harçlara belirli saatlerde 8 bar basınç ve 170 °C sıcaklıkta otoklav kür

uygulamışlardır. Sonuç olarak otoklav kür yapılan numunelerin basınç dayanımları, otoklav kür yapılmayan numunelere göre daha iyi neticeler verdiğini belirtmişlerdir [120].

Aydın ve Baradan, sodyum hidroksit ve sodyum silikat alkalilerini kullanarak otoklav ve buhar kürü uygulamışlardır. Otoklav kür uyguladıkları numunelerde çok düşük silikat modülleriyle (%2 Na₂O) bile basınç dayanımlarında 70 MPa değerini yakalamışlardır. Bununla beraber buhar kürü uygulanan numunelerde de benzer dayanım değerleri ve her iki kür koşullarında da kuruma büzölmelerinde kayda değer azalma gözlemlendiği belirtilmiştir [121].

Haha ve arkadaşları, Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harçlara alüminyum oksit (Al₂O₃) hidratasyona etkisini araştırmışlardır. Alüminyum oksit varlığı hidratasyon süresini yavaşlatmış erken dayanım değerlerini düşürmüştür. Ancak 28 günlük olan numunelerde önemli bir etki sağlamamış olduğu ileri sürülmektedir [122].

Ma ve arkadaşları, Alkali aktive edilmiş harçların permeabilitesini incelemiş ancak çimentolu harçlardan daha fazla olduğunu belirtmişlerdir [123].

Haha ve arkadaşları, sodyum hidroksit ve sodyum metasilikat olmak üzere iki farklı tipte aktivatör kullanmışlardır. Sodyum hidroksit erken dayanım sağlarken, sodyum metasilikat ise 7 günden daha fazla sürede dayanım kazandığı ifade edilmiştir [124].

Yapılmış olan bu çalışmaların sonucunda; AAYFC'li betonların, CEM I'li betonlara kıyasla donatı korozyonuna ve ASR etkilerine karşı göstermiş oldukları dirençlerin daha iyi oldukları, sülfatlı ve asitli sularda daha iyi dayanım değerleri verdikleri, otoklav ya da buhar küründe, normal şartlar altındaki su kürüne kıyasla yüksek basınç dayanımları elde edildiği hatta 70 MPa gibi rakamsal değerlere ulaşıldığı belirtilmektedir.

Kullanılan alkaliler arasında en iyi sonuçları yakalayan Na_2SiO_3 ve NaOH alkalileri olduğu anlaşılmaktadır. Karbonatlaşma ile ilgili yapılmış olan çalışmalarda ise net bir bilgiye ulaşılmamaktadır.

Yüksek sıcaklıklarda kür edilen AAYFC'li betonların kuruma büzülmesi azalmış, erken dayanımları artmış ancak geç dayanımlarda düşüş gözlemlendiği belirtilmektedir.

Kendiliğinden soğumaya bırakılan yüksek fırın cürufunun AAYFC'li betonlarda agrega olarak kullanılması kuruma büzülmesini düşürdüğü anlaşılmaktadır.

2.2. Alkali Aktive Edilen Harçların, Atık Malzemeler ve Kimyasal Katkılar İle Kullanımının Araştırılması Üzerine Yapılmış Olan Çalışmalar

ASRC (alkali-cüruf-kırmızı çamur içeren çimentolu malzemeler) erken ve nihai dayanım değerleri iyi sonuçlar vermiştir. Çeşitli kimyasallara ve donma-çözülme etkilerine karşı daha iyi dayanıklılık göstermişlerdir. Bunun nedeni AAYFC betonları jel boşluğuna sahipken, CEM I betonları kapiler boşluğa sahiptir [125-127]. ASRC malzemelerinde sodyum fosfat kullanılması hidrasyon ıslısını ve hidrasyon reaksiyonunu düşürmüştür [55].

Alçı taşı ilavesinin sodyum silikat esaslı AAYFC hamurlarının kuruma büzülmesini azalttığı anlaşılmıştır. AAYFC'nin yüksek kuruma büzülmesi neme hassas silika jelinin oluşumuna ve boşluk boyutu dağılımına bağlanmaktadır. AAYFC hamurlarında alçı taşı kullanımı daha fazla C-S-H jeli oluşumuna neden olduğu için, mikro boşluk oluşumunu artırır ve sonuç olarak kuruma büzülmesi azalmıştır [54].

Erken yaşlarda AAYFC'li harçlarda sadece fosforik asit kullanılırsa priz süresi ve kuruma büzülmesi artar, basınç dayanımı azalır. Sadece alçı kullanılırsa priz süresi azalır, basınç dayanımı ve kuruma büzülmesi artar. Fosforik asit ve alçı birlikte kullanılırsa sadece fosforik asit kullanılan numunelere benzer etkiler gösterdiği belirlenmiştir [128].

Chi, yaptığı çalışmada sodyum silikat alkalisi kullanmış, Na_2O oranını %4, 5 ve 6 oranlarında tutmuş, doymuş kireç suyunda 60 °C'de kür uygulamış, fosforik asit (H_3PO_4) kullandığı numunelerde basınç dayanımı, yarma dayanımı, kuruma büzülmesi değerlerinin ve yüksek sıcaklığa ayrıca sülfatlı sulara karşı direnç sağlamada da Portland çimentolarıyla kıyaslanabilir olduğunu gözlemlemiştir [129].

Kimyasal katkıları AAYFC betonlarının düşük işlenebilirlik ve yüksek kuruma büzülmesi problemlerini çözme etkileri araştırılmış. Aktivatör olarak sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımı kullanılmış, işlenebilirliği artırdığı ve büzülmeyi önlediği için en uygun katkının hava sürükleyici katkı olduğu belirtilmiştir [125].

Yüksek fırın cürufalarının kaba agrega olarak beton içinde kullanılması sonucunda normal agregalı AAYFC'li betonlara göre basınç dayanımları gelişme göstermiş ve kuruma büzülmeleri ise normal agregalı betonlara göre %40 daha azaldığı gözlenmiştir [130].

SRA (kuruma büzülmesi önleyici katkı) katkısı alkali aktive edilmiş harçların kuruma büzülmesini %50 ve 85 oranında azaltmıştır. 7 gün sonunda %50 veya %99 bağıl nemde yapılan kür, sonucu değiştirmemiştir [116].

Sodyum silikat, sodyum hidroksit ve sodyum karbonat ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu betonlara su azaltıcı, hava sürükleyici, büzülme önleyici, süper akışkanlaştırıcı ve alçı katkıları kullanılmıştır. Hava sürükleyici, su azaltıcı, büzülme önleyici ve alçıdan oluşan katkıları büzülmeyi önemli ölçüde azaltmışlardır. Ayrıca hava sürükleyici katkıları, işlenebilirlikleri artırmış ve basınç dayanımlarına negatif bir etki oluşturmamışlardır. Sonuç olarak hava sürükleyici katkıları AAYFC'li betonlar için tavsiye edilmiştir [131-133].

Yüksek kalsiyum içerikli uçucu küllü geopolimerler NaOH , Na_2SiO_3 ve ısı ile aktive edilmişlerdir. Kalıptan alındıktan sonra 1 saat 75 °C fırında ısıtıldıktan sonra yüksek dayanım elde edilmiştir. Uçucu kül ağırlığının %3-12 oranında süper akışkanlaştırıcı eklenmiş, basınç dayanımı 65 MPa elde edilmiştir. Dayanım değerleri ekstra su

kullanıldığında ise süper akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerden daha iyi değerler elde edildiği belirtilmiştir [65, 134].

pH ile alkali modülü ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) arasında güçlü bir ilişki vardır, ancak priz süresi ile ilişkilendirilemez. Aktivatör içindeki Na_2O konsantrasyonunun artması pH değerini artırır, SiO_2 konsantrasyonunun artması ise pH değerini azaltır [75]. Harç içindeki cüruf ağırlığının %8 ve 13 oranında eklenen MgO içeriği AAYFC betonlarının reaksiyonunu hızlandırmış ve ilk günlerdeki dayanım değerlerini artırmıştır. 28 günlük dayanım değerlerini de %50 ve 80 oranında artırmıştır [135].

Collins ve Sanjayan, alkali aktive edilmiş cürufllu (AAS) betonlar Portland çimentolu betonlarla kıyaslanınca düşük elastisite, yüksek sürtünme ve yüksek dayanıma sahiptir. Bu kombine etkiler AAS numunelerinde çatlama oluşturur. Bu çalışmada kür etkisi, agrega tipi, kuruma büzülmesini azaltıcı kimyasal katkıları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Büzülmeyi önleyici katkıları AAS betonları üzerinde çok az bir etki göstermişlerdir. Normal agrega yerine yüksek fırın cürufu agregası kullanıldığında AAS betonlarındaki büzülmenin azaldığı gözlenmiştir [136].

AAYFC'li betonlara NaCl (sofra tuzu) YFC ağırlığının %4 oranında eklenmiş, priz süresini geciktirmiş ve dayanımı artırmış olduğu gözlenmiştir [56].

Zivica, %7 Na_2O ile aktive edilen silis dumanı ve yüksek fırın cürufu ile oluşturulmuş Portland çimentolu harçların C-S-H bağlarında kuvvetlenme olduğunu belirtmişlerdir [137-139].

Collins ve Sanjayan, alkali aktive edilmiş cürufllu harç karışımlarına uçucu kül veya silis dumanı ikame ederek çeşitli beton numuneleri üretmişlerdir. AAS/UFA (alkali aktive edilmiş uçucu küllü beton karışımı), AAS/CSF (alkali aktive edilmiş cürufllu beton karışımı) ve AAS/UFS (alkali aktive edilmiş silis dumanlı beton karışımı). Ürettikleri bu beton numuneleri üzerinde işlenebilirlik ve dayanım deneyleri yapmışlardır. AAS/UFA beton numunesinin AAS betonuna göre %24 daha mukavimdir. AAS/CSF ve AAS/UFS beton numunesinin dayanım değerleri AAS

betonundan oldukça iyi netice vermiştir. Ancak AAS/CSF betonun işlenebilirliği düşmüş, AAS/UFS betonunun ise AAS betonuyla kıyaslanınca işlenebilirliğinin çok az düşüş gösterdiği ifade edilmiştir [140].

%1 oranında polipropilen lif kullanımı AAYFC betonlarında pozitif bir etki sağlamamış olup elastisite modülünde de geliştirici bir katkıda bulunmamışlardır. Bazı durumlarda işlenebilirlikteki azalma nedeniyle dayanımda azalma olmuştur. En fazla büzülme AAYFC betonlarında görülmüştür. Fakat darbe dayanıklılıklarına ve donma-çözülme etkisine karşı AAYFC betonlarının mekanik özellikleri CEM I betonlarına göre daha iyi çıkmıştır. YFC'nin alkali aktivasyonu sonucunda oluşan C-S-H'nin kompozisyonu ve yapısı CEM I'in yapısından farklıdır. Yarı kristalin C-S-H silikat doğrusal zincirinin tetrahedral köprülerinde yüksek oranda Al ve CEM I hamurlarında oluşan C-S-H jelinden daha düşük Ca/Si oranı sunar. AAYFC harçlarının elastisite modülü CEM I harçlarına kıyasla daha düşük bulunmuştur [141].

Bernal ve arkadaşları, alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu harçlara çelik lifler eklemiştir. 28 günün sonunda elde edilen numunelerin basınç dayanımları düşüş göstermiş ancak yarmada çekme ve eğilme dayanım değerleri 3.75 den 4.64 MPa ve 6.40 dan 8.86 MPa değerlerine ulaşmışlardır [142].

Aydın ve Baradan, yapmış oldukları çalışmada alkali aktive edilmiş cürufllu/silis dumanlı bağlayıcılar içine çelik lif koyarak kuruma büzülmesini incelemiş ve sonuç olarak çelik lif katılmış olan alkali aktivi harçların, Portland çimentolu harçlara göre daha az büzülme gösterdiğini belirtmişlerdir [143].

O. Dolgun, çalışmasında kendiliğinden yerleşen beton üretiminde; Portland çimentosu ile üretilen kontrol betonuna %10, 15, 20 ve 25 oranlarında öğütülmüş ponza ilave edilmiştir. Sıcak kür şartlarında ponza ilavesinin basınç dayanımlarında düşüğe neden olduğu, kaynar kür şartlarında ise basınç dayanımlarının ponza ilavesi ile artış gösterdiği tespit edilmiştir. Standart kür şartlarında ise 3 ve 7 günlük basınç dayanımlarının ponza ilavesi ile birlikte azaldığı, 28 günde ise ponza ilavesinin

kontrol betonlarının basınç dayanımlarına yaklaştığı hatta bir miktar artış gösterdiği tespit edilmiştir [144].

Fernandez ve Palomo, yaptıkları çalışmada uçucu küllü bağlayıcıların NaOH, Na₂CO₃ ve Na₂SiO₃ ile aktive edilmesi sonucu oluşan alüminosilikat jellerin düşük kristal yapıları, mükemmel mekanik özellik sağlamıştır [145].

Ponzanın çimentoya katılması, çimentonun sülfattan kaynaklanan bozulmayı ve çimentonun rötresini, ponza katkı oranındaki artışa bağlı olarak azalttığı, ponza miktarı arttıkça, ponzanın hacim genişmesine olan olumlu katkısının da belirginleştiği tespit edilmiştir [48].

Fan ve arkadaşları, uçucu kül aktivasyonunun çimento üzerindeki etkilerini araştırmış, hazırladığı çimentolu karışıma Na₂SiO₃'ü az miktarda eklediğinde, uçucu kül ve Ca(OH)₂ pH değerini yükselttiği için priz süresini hızlandırdığını tespit etmiştir [146].

Paloma ve Fuente, alkali aktive edilmiş çimentolu malzemelere alternatif matrisler geliştirmek amacıyla yapmış oldukları çalışmada birçok doğal mineralin içinden yarı metal olan bor elementini kullanmışlardır. Yapmış oldukları çalışma sonucunda hidrasyon hızını ve priz süresini geciktirmek için Portland çimento bazlı uçucu kül alkali aktivasyonlu matrislere modifiye etmişler, ancak önemli ölçüde bir katkı sağlamadığını gözlemlemişlerdir [147].

Qian ve arkadaşları, cıva ve çinko katkılı alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu matris yapılarında, düşük cıva konsantrasyon iyonları basınç dayanımını, gözenek yapısını ve hidrasyon derecesini az oranda etkilemiştir. %2 oranında cıva konsantrasyonu erken hidrasyonu önemli oranda geciktirmiş ve erken basınç dayanımının ise düştüğü görülmüştür. Fakat 28 günden sonra negatif bir etkinin olmadığı anlaşılmıştır [148]. Düşük çinko konsantrasyon iyonları basınç dayanımını, priz süresini ve gözenek yapısını olumsuz etkilemiştir. %2 çinko konsantrasyon

iyonları ise 28 günde dahil olmak üzere hidrasyon hızını önemli ölçüde geciktirdiği tespit edilmiştir [149].

Atık kırmızı çamurlu geopolimer bağlayıcıların basınç ve gerilme dayanımı analiz edilmiş agrega/bağlayıcı oranı, agreganın boyutu ve tipi (granit, kireçtaşı, kuvars vb.) önemli bir faktördür. Erken yaşlarda atık kırmızı çamurlu geopolimer bağlayıcılarda yüksek dayanım elde edilmiştir. Bunun nedeni kuvars taşı ile çimento pastasının arasındaki bağın yüksek olmasıdır. Kireçtaşı agregaları çimento ile iyi kimyasal bir bağ kurmuş ancak kuruma büzülmesini artırmıştır [118].

Alkali aktive edilmiş cürüflu karışımlar için aktivatör olarak sodyum karbonat ve taneli kireçtaşı kullanılmıştır. Hidrolik ve oda şartlarında kür yapılmış olup 3 günün sonunda elde edilen basınç dayanımı 41 MPa ve 28 günün sonunda ise 65 MPa elde edilmiştir. Portland çimentolarıyla kıyaslanırsa yakın değerler elde edilmiştir. Ancak çimento kullanımını minimize ederek CO₂ salınımını düşürmüştür [150].

Antonio ve arkadaşları, hidrate olmuş kireç (cüruf ağırlığının %5'i) ve hidrate olmuş kireç (cüruf ağırlığının %2'si) ile alçı (cüruf ağırlığının %2'si) karıştırılarak alkali aktive edilmiş cürüflu bağlayıcılar üretilmiş. Sadece hidrate kireç ile oluşturulan karışımların dayanım değerleri, hidrate kireç + alçı ile aktive edilen numunelere göre daha fazla elde edilmiştir. Kuruma büzülmesi değerlerinde ise sadece hidrate kireç kullanılan numunelerde daha fazla artış gösterdiği belirtilmektedir [151].

Lee ve Devender; yapmış oldukları bu çalışmada uçucu kül bazlı geopolimerler ile doğal silisli agregalar arasındaki ara yüzey dayanımını araştırmışlardır. Alkali aktive olmuş silikatların varlığı agregalar ve geopolimer harçlar arasındaki aderansı geliştirmiştir. Eğer bu yapı klorid içeriyorsa bağlayıcı ve agrega arasındaki aderansı düşürmüştür [152].

Buchwald ve Schulz, alkali aktive edilmiş bağlayıcılarda çimento fırını tozu kullanmışlardır. Dayanım değerlerinde sınırlı bir ilerleme keşfetmişlerdir. Ancak

bundan sonra, kullanılan çimento fırını tozu ile çeşitli alternatif çalışmaların yapılabileceğini ileri sürmüşlerdir [153].

Kuvars kumu ve sodyum silikat ile aktive edilen cürüflu harçlarında ara yüzey çalışmaları yapılmış ve Portland çimentolu harçlara göre daha yoğun ve üniform ara yüzeylerinin olduğu SEM diyagramlarından görülmüştür [154].

Teoreanu, Volceanov ve Stoleri, 3 tip YFC ve 2 tip UK (belli oranlarda YFC yerine) kullanarak bağlayıcı madde üretmiştir. Aktivatör olarak, bağlayıcının %2-6'sı sönmemiş kireç, %2-7'si kalsiyum tuzu (CaCl_2) veya sodyum tuzu (Na_2CO_3 , Na_2SO_4) kullanılmış, YFC'nin UK'a göre pH değerinin yüksek olduğu daha iyi aktivasyon sağladığı bulunmuştur. Ancak performans kaybı olmadan YFC yerine %40'a kadar UK ikamesi yapılabileceği görülmüştür [155].

Alkali aktive edilmiş harçların priz süresini uzatmak için organik tuzlar (kalsiyum ve magnezyum tuzları) kullanılmıştır. Potasyum tuzlarının priz süresini artırdığı tespit edilmiştir [156].

NaOH ve cam suyu ile aktive edilen yüksek fırın cürufunun %10'u kadar ikame edilen silis içeren jeotermal atığı ile oluşturulan harçların AAS harçlarıyla mukayese edilince dayanımlarında bir düşüş gözlenmiştir. Sebebinin ise silisin cüruf yerine kullanıldığında oluşan hava kabarcıklarının olduğu düşünülmektedir [157].

NaOH, Na_2SiO_3 ve MnO_2 aktive edilmiş 24 saat 50 °C de kür edilen uçucu küllü harçlardan elde edilen hafif agregalar kullanılmış olup en yüksek dayanım değeri 33.9 MPa elde edildiği belirtilmiştir [158].

Alkali aktive alüminosilikat kompozitlerin ısıya dirençli hafif agregalarla (vermikulit) yüksek sıcaklıklara maruz kalması; ilk uygulanan sıcaklık 800 °C'de basınç dayanımı %35, eğilme dayanımı ise %66 oranında düşer. 1200 °C sıcaklıkta ise %30 daha düştüğü gözlenmiştir [159].

Alkali aktive edilmiş betonlarda hafif agregalar kullanılmış, ancak hafif agregalar kullanılan betonların basınç dayanımlarında düşüş gözlenmiş, yerine ince agregalar kullanıldığında dayanım değerlerinin yükseldiği anlaşılmıştır [160].

Murri ve arkadaşları, 1000 °C sıcaklığa maruz bırakılan alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu/uçucu küllü malzemelerin dayanımı, alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu/metakaolinli malzemelerden daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu durumda alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu/metakaolinli malzemelerin C-A-S-H bağlarının çok stabil olmadığını ileri sürmektedir [161, 162].

Alkali aktive edilmiş cürufu karışımlar (Si+Ca) ve alkali aktive edilmiş metakaolinli karışımlar (Si+Al) olmak üzere iki tip karışım oluşturulmuştur. Sonuç olarak metakaolinli karışımların kuruma büzülmesi ve çatlak oluşumu cürufu karışımlardan daha zor olduğunu belirtmişlerdir [163].

Bernal ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada, alkali aktive edilmiş cüruf/metakaolin karışımı harçlarda metakaolinin priz süresini uzattığı, hidrasyon ısısını düşürdüğünü gözlemlemişlerdir [164]. AAYFC'li karışımlarda metakaolin oranının artması karbonatlaşma derinliklerini ve kapillariteyi artırmış, dayanım değerlerini düşürmüştür [165].

Reig ve arkadaşları, sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktive edilen kırmızı tuğla atıkları ile hazırlanan harç numuneleri 65 °C'de kür yapılmış, 7 günlük kür sonucu 30 MPa dayanım değeri elde etmişlerdir [166].

Sodyum sülfat ile aktive edilen cürufu beyaz Portland çimentosu ile üretilen harçlar (beyaz Portland çimentosuyla %0, 50 ve 70 oranında ikame edilmiştir) ile Portland çimentolu harçları 2 yıl süreyle sodyum sülfatlı çözeltide bekletmişlerdir. Sonuç olarak alkali aktive edilmiş cürufu beyaz çimentolu harçlar, Portland çimentolu harçlara göre daha iyi direnç sağladıklarını ifade etmişlerdir [167].

Bu çalışmada Portland çimentosu olmadan sodyum silikat, sodyum hidroksit ve sodyum karbonat kullanılmış olup, 7, 28 ve 90 gün sonunda basınç ve eğilme dayanımları ölçülmüştür. 28 günlük basınç dayanımı, sodyum silikat ile aktive edilen karışımın 81 MPa, sodyum hidroksit ile aktive edilen karışımın 29 MPa, sodyum karbonat ile aktive edilen karışımın 36 MPa elde edilmiştir. Oysaki Portland çimentosunun 28 günlük basınç dayanımı 33 MPa'dır. 28 günlük eğilme dayanımı ise, sodyum silikat ile aktive edilen karışımın 6.8 MPa, sodyum hidroksit ile aktive edilen karışımın 3.8 MPa, sodyum karbonat ile aktive edilen karışımından da 5.3 MPa elde edilmiştir. Portland çimentosunun 28 günlük eğilme dayanım değeri ise 5.2 MPa olduğunu belirtmişlerdir [112].

AAYFC'li betonlara, yüksek fırın cürufunun %1 oranında baryum hidroksit ($Ba(OH)_2$) eklenmesi AAYFC'li betonların dayanımını artırmıştır [168].

Yapılmış olan bu çalışmaları özetlemek gerekirse; ASRC (alkali-cüruf-kırmızı çamur içeren çimentolu malzemeler), CEM I ile kıyaslandığında çeşitli kimyasallara ve donma-çözülme etkilerine karşı iyi direnç sağladığı anlaşılmaktadır.

AAYFC'li betonlara fosforik asit eklenmesi priz süresini ve kuruma büzülmesini artırmış, basınç dayanımını düşürmüştür. Alçı eklenmesi ise priz süresini azaltmış, basınç dayanımını ve kuruma büzülmesini artırmıştır.

AAYFC'li betonlara fosforik asit eklenmesi ile doymuş kireç suyunda 60 °C kür yapılan numunelerin kuruma büzülmeleri ve sülfatlı sulara karşı dirençleri PÇ ile mukayese edilebilir değerler yakalamış, basınç ve yarma dayanımları da arttığı gözlenmektedir.

AAYFC'li betonlarda büzülmeyi önleyici katkıların, bor elementinin, cıvanın ve polipropilen lif kullanımının pozitif bir etkisi olmamıştır. Çelik lif kullanımı ise basınç dayanımlarını düşürmüş, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarını artırdığı belirtilmiştir. Sofra tuzu (NaCl) kullanımı ise priz süresini geciktirerek dayanımı

artırmıştır. Metakaolin ise karbonatlaşma derinliklerini ve kapilariteyi artırmış, dayanımı düşürdüğü anlaşılmaktadır.

AAYFC'li betonlarda hafif agregalar basınç dayanımlarını düşürmüş, ince agregaların kullanımı ise basınç dayanımlarını artırdığı belirtilmektedir.

BÖLÜM 3: DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde deneysel çalışmanın yürütülmesi esnasında her aşamada kullanılan malzemeler ve deneylerde uygulanan yöntemler ile ilgili bilgiler verilmektedir. Ayrıca yapılan deneysel çalışmaların bütünü alt bölümün sonunda şema olarak verilmektedir.

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Yüksek fırın cürufu

Bu çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu KARÇİMSA firmasından temin edilmiştir. Tamamı öğütülmüş yüksek fırın cürufu olup, herhangi bir katkı maddesi ihtiva etmemektedir. Özgül ağırlığı ise 2.88'dir. Kimyasal kompozisyonları ve blaine değerleri, ayrıca cüruf aktivite indeksi Tablo 3.1'de verilmektedir.

3.1.2. Uçucu kül

F tipi uçucu kül Çatalağzı termik santralinden temin edilmiştir. Bu çalışmada Çatalağzı termik santraline ait kimyasal kompozisyonlar Tablo 3.1'de verilmektedir.

3.1.3. Ponza

Bu çalışmada kullanılan ponza Mikromin Maden San. Ve Tic. A.Ş'den temin edilmiş olup asidik ponza tipi kullanılmıştır. Portland çimentosundan da ince olan ponzanın blaine değeri ve kimyasal kompozisyonları Tablo 3.1'de verilmektedir.

3.1.4. Portland çimentosu

CEM I 42.5 Portland çimentosu AKÇANSA firmasından temin edilmiştir. Kimyasal kompozisyonları Tablo 3.1’de verilmektedir.

Tablo 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonları ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Kompozisyon	CEM I	YFC	Asidik Ponza	F Tipi Uçucu Kül
SiO ₂ (%)	20.35	39.18	70.0	53.50
Al ₂ O ₃ (%)	5.98	9.81	14.0	15.71
Fe ₂ O ₃ (%)	3.06	1.90	2.5	8.81
CaO (%)	63.35	32.52	0.9	0.29
MgO (%)	1.89	9.94	0.6	2.94
Na ₂ O (%)	0.58	0.40	5.0	0.77
K ₂ O (%)	0.88	1.50	4.0	1.19
TiO ₂	-	-	-	0.12
SO ₃ (%)	2.89	-	-	1.11
Specific gravity (g/cm ³)	3.10	2.53	-	-
Blaine (cm ² /g)	3200	4343	4221	4450
Su emme (%)	-	-	20	-
Puzolonik aktivite (28gün)	56	36	19.8	

3.1.5. Agregası

Üretilen harç numunelerinde agrega olarak rılem kumu kullanılmıştır.

3.1.6. Alkali

Sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve sodyum silikat alkalileri Düzey laboratuvarlarından elde edilmiştir. Kullanılan bu alkalilerin kimyasal kompozisyonları Tablo 3.2, 3.3, 3.4 ve 3.5’de verilmektedir.

Tablo 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan alkalilerin (NaOH) kimyasal kompozisyonu

Kimyasal adı	Sodyum hidroksit (kostik)
Kimyasal formül	NaOH
Molekül ağırlığı	39.9971 g/mol
Yoğunluk	2.1 g/cm ³
pH	13.5
Kaynama noktası	1390 °C

Tablo 3.3. Deneysel çalışmada kullanılan alkalilerin (Na₂SiO₃) kimyasal kompozisyonu

Kimyasal adı	Sodyum silikat (cam suyu)
Kimyasal formül	Na ₂ SiO ₃
Molekül ağırlığı	63.94 g/mol
Yoğunluk	1.38-1.42g/cm ³
ph	11-12.50
Modül	1.90-2.20
Na ₂ O %	11.5-13.50
SiO ₂ %	24-26

Tablo 3.4. Deneysel çalışmada kullanılan alkalilerin (Ca(OH)₂) kimyasal kompozisyonu

Kimyasal Analiz Değerleri	%Değer	TSE-N 459-1
Ca(OH) ₂	min.90	
Toplam CaO+MgO	min.92	min.90
MgO	1-2	max. 5
Çözünmeyen Madde	max.1.5	
SO ₃	max.1.5	max.2

Tablo 3.4. Deneysel çalışmada kullanılan alkalilerin (Ca(OH)₂) kimyasal kompozisyonu'nun (devamı)

R ₂ O ₃ (Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	max.1	
Kızdırma kaybı	max.4	max.4
Serbest Su	max.2	max.2

Tablo 3.5. Deneysel çalışmada kullanılan alkalilerin (Ca(OH)₂) fiziksel özellikleri

Fiziksel Analiz Değerleri		
200µm (Elek üstü)	max.0.5	max.2
90µm (Elek üstü)	max.4	max.7
Birim Hacim Kütlesi (kg/dm ³)	max.0.50	max.0.60

3.1.7. Karışımların Hazırlanması

Karışımlar TS EN 196-1 Standardına göre hazırlanmıştır [169].

Bu Çalışmada Yapılan Bütün Deneylerin Şema Olarak Gösterilmesi

Deneyel Çalışmada İlk Aşama

İkinci Aşama

Üçüncü Aşama

Dördüncü Aşama

AAFYCT	Yüksek fırın cürufu karışımlara sönmüş kireç eklenmesi ile sonuçlar iyi neticelenmediği için aktive edilmeye gerek duyulmamıştır	AAFYC	AAFYC	AAFYC	
Bağlayıcı: YFC+Çimento Aktivatör: $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{Na}_2\text{CO}_3+\text{Ca}(\text{OH})_2$ Uygulanan Deneyler: Priz süresi tayini, özgül ağırlık, elek analizi, blaine, genleşme tayini (le-chatelier), eğilme ve basınç deneyleri		Bağlayıcı: YFC+Çimento Aktivatör: $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$ Uygulanan Deneyler: Eğilme ve basınç deneyleri	Bağlayıcı: YFC+Çimento+UK Aktivatör: $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$ Uygulanan Deneyler: Eğilme ve basınç deneyleri	Bağlayıcı: YFC+Çimento+UK Aktivatör: $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$ Uygulanan Deneyler: Sülfatlı sularda durabilite, kuruma büzülmesi ve mikro yapı incelemeleri	
% 20 YFC %2 Alkali %1 Alkali %0.5 Alkali % 40 YFC %2 Alkali %1 Alkali %0.5 Alkali % 60 YFC %2 Alkali %1 Alkali %0.5 Alkali % 80 YFC %2 Alkali %1 Alkali %0.5 Alkali % 90 YFC %2 Alkali %1 Alkali %0.5 Alkali % 100 YFC %2 Alkali %1 Alkali %0.5 Alkali		% 2 Na₂O %60 YFC Ms=0,75 %80 YFC Ms=0,75 % 4 Na₂O %40 YFC Ms=0,75 Ms=1,00 Ms=1,25 Ms=1,50 %60 YFC Ms=0,75 Ms=1,00 %80 YFC Ms=0,75 Ms=1,00 %90 YFC Ms=0,75 Ms=1,00 % 6 Na₂O %40 YFC Ms=0,5 Ms=0,75 Ms=1,00 %60 YFC Ms=0,5 Ms=0,75 Ms=1,00 %80 YFC Ms=0,5 Ms=0,75 Ms=1,00	% 7 Na₂O %40 YFC Ms=0,5 Ms=0,75 Ms=1,00 %60 YFC Ms=0,5 Ms=0,75 Ms=1,00 %80 YFC Ms=0,5 Ms=0,75 Ms=1,00 % 8 Na₂O %40 YFC Ms=0,5 Ms=0,75 Ms=1,00 %60 YFC Ms=0,5 Ms=0,75 Ms=1,00 %80 YFC Ms=0,5 Ms=0,75 Ms=1,00	Optimum değer olarak % 8 Na₂O oranı sabit alınmıştır. %55 YFC+%5 (UK veya P) Ms=0,5 Ms=0,75 Ms=1,00 %50 YFC+%10 (UK veya P) Ms=0,5 Ms=0,75 Ms=1,00 %75 YFC+%5 (UK veya P) Ms=0,5 Ms=0,75 Ms=1,00 %70 YFC+%10 (UK veya P) Ms=0,5 Ms=0,75 Ms=1,00 %40 YFC+%20 UK Ms=0,5 Ms=0,75 Ms=1,00	AAFYC, AAFYC+UK, AAFYC+P içerikli numunelerde en iyi sonucu veren numuneler tekrar üretilerek Na₂SO₄ ve MgSO₄ çözeltileri içinde 90 ve 180 gün bekletilerek durabiliteleri incelenmiştir. AAFYC, AAFYC+UK, AAFYC+P içerikli numunelerde en iyi sonucu veren numuneler tekrar üretilerek kuruma büzülmesi deneyleri incelenmiştir.

Şekil 3.1. Deneyel çalışmaların özetini gösteren şema

3.2. Uygulanan Deney Yöntemleri

3.2.1. Basınç ve eğilme deneyleri

TS EN 196-1 “Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini” Standardına göre 40x40x160 mm boyutlu kalıplara dökülen numunelere eğilme ve basınç testleri uygulanmıştır.

TS EN 196-1’e göre hazırlanan prizmatik numunelerin eğilme ve basınç dayanımları tayin edilir. Standart kum (1350 g) plastik torbalarda, harç karıştırma makinesinin haznesine konulur. Harç karıştırma kabına önce 225 ml su konulur. 450 g çimento ya da karışım ilave edilir. Karıştırıcı düşük hızda 30 s çalıştıktan sonra cihazın kum bölgesine konulmuş olan kumu otomatik olarak alır. Bu kumun katılması 30 s içinde olmalıdır. 1 dak sonunda karıştırıcı yüksek hızla 30 s çalıştıktan sonra otomatik olarak durur. Karıştırma kabı makineden çıkarılır. 90 s içinde karıştırma kabının cidarlarına yapışan atıklar bir kaşık vasıtasıyla sıyrılarak alınır. 1.5 dakika sonunda cihaz otomatik olarak tekrar devreye girerek 60 s yüksek hızda çalışır ve 4 dakika sonunda harç karıştırma işlemi tamamlanır [169, 170].

Hazırlanan harç beton yapımında kullanılacağı için kalıpları sarsma makinesinde sıkıştırılır. Üç adet kalıp bölmesinin her birinin içine kalıp hacimlerinin yarısı kadar olacak şekilde doldurulur. 60 kere sarsma yaptıktan sonra geri kalan boşluk doldurularak üstleri düzeltilir. Cihaz tekrar 60 sarsma yaptırılır. Kalıplar etiketlenerek nem odasına konulur. Kalıbın üzeri cam plaka ile örtülür. 20 °C sıcaklık ve en az %90 nispi nemli bir odada dökümden 20-24 saat sonra çıkarılır. Su havuzlarında belirli gün bekletilir.

Kırılmalar; beton dökümünden itibaren 2, 7, 28 gün ya da denemeler için daha farklı süreler sonunda yapılır. Beton prizma çubukları önce eğilme dayanımında ikiye kırılır. Sonra kırılan bu prizma çubuklarının basınç değerleri ölçülerek ortalaması alınır. 2 Günlük ortalama basınç dayanımının, 28 günlük dayanım oranına bağlı olarak tayin edilmektedir. Bu oranın 0.5’ten büyük olması durumunda dayanım

gelişiminin hızlı, 0.3 ile 0.5 arasında olması durumunda orta, 0.15 ile 0.3 arasında olması durumunda ise yavaş olduğu kabul edilir.

DeneySEL çalışmalar sırasında kullanılan sarsma, eğilme ve basınç aletlerinin görüntüsü Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de, kür odası ve kür odasında kalıp içinde bekletilen numunelerin görüntüsü Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de, kürden çıkan numuneler ise Şekil 3.6’da verilmektedir.



Şekil 3.2. Eğilme ve basınç deney cihazları



Şekil 3.3. Sarsma aleti



Şekil 3.4. Kür odası



Şekil 3.5. %90 Bağıl nemde ve 20 °C sıcaklıkta kalıpta 1 gün bekletilen harç numuneleri



Şekil 3.6. Üretilen harç numuneleri

3.2.2. Priz sürelerinin belirlenmesi

Priz süresi; TS EN 196-3 “Çimento deney metotları - Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genişleme tayinine göre; 500 g olarak hazırlanan numuneye 155 g su eklenerek karıştırılır. Su eklendiği zaman kaydedilir. Karıştırıcı 90 s karıştırılır. Durduktan sonra 15 s içinde kaşık ile kabın çeperleri sıyrılarak yeniden 90 s hızla karıştırılır. Hazırlanan çimento pastası önceden yağlanmış vicat halkasına (kalıbına) sıkıştırma ve vibrasyon yapmadan hemen yerleştirilir. Kalıbın üzerinden çimento pastasının fazlası bir spatula ile testere hareketi yapılarak alınır ve düzeltilir [170].

Vicat aletine takılan sonda taban plakasının üzerine kadar indirilir ve taksimatlı gösterge üzerinde sıfır okunacak şekilde ayarlanır. Sonda yukarı kaldırılarak duruş konumuna alınır.

Vicat kalıbı ve taban plakası vicat aletine yerleştirilir ve sondanın ucuna göre merkezlenir. Sondanın pasta üzerine hızlı inmesi engellenerek temas edinceye kadar 1-2 s tutularak daha sonra serbest bırakılır ve düşey olarak sondanın pastanın merkezine kendi ağırlığı ile inmesi sağlanır. Sondanın serbest bırakılması başlangıç zamanından 4 dakika sonra olmalıdır. Sondanın serbest bırakılmasından 30 s sonra okuma yapılır. Sonda her batırılışından sonra hemen temizlenir. Sondanın alt yüzü ile plakası arasındaki mesafeyi veren değer okunur. Bu değer çimentonun kütlesi

cinsinden yüzde olarak ifade edebilmek suretiyle pastanın su muhtevası ile birlikte kaydedilir.

Deney değişik miktarlarda su içeren pastalarla, sonda ve taban plakası arasındaki mesafe (6+/-1) mm oluncaya kadar tekrar edilir.

Priz başlama süresinin tayini; vicat kalıbına standart kıvamdaki çimento pastası doldurulur ve yüzey düzeltilir. Deney sırasında her türlü sarsıntıya karşı korunmalıdır. Vicat kalıbı taban plakası ile birlikte nem odasında numunenin priz başlama tahmini süresine göre bir süre bekletilir. Bu kez vicat aletinden sonda çıkarılarak priz başlangıç süresi için iğne takılır.

Vicat kalıbı vicat cihazına ve iğnenin altına yerleştirilir. İğne pasta ile temas edinceye kadar yavaşça indirilir. Sonra hareket eden parçalar birden bırakılır ve iğnenin düşey olarak pastaya girmesi sağlanır. İğnenin serbest bırakılmasından 30 s sonra taksimatlı göstergede okuma yapılır. İğnenin ucu ile taban plakası arasındaki mesafeyi veren bu değer sıfır anından itibaren geçen süre ile kaydedilir.

Priz başlangıç süresinin tespiti için iğne en fazla 10 dakikada bir kenardan en az 10 mm boşluk kalacak şekilde hamura batırılır. İğnenin bir defa girdiği yere bir daha girmemesi için vicat halkasının durumu değiştirilir ve iğne temizlenir.

Çimento hamuruna batan iğne 3-5 mm tabana uzak kaldığı an priz başlamış olur. Sıfır olarak kabul edilen zamandan, priz başlangıç anına kadar geçen süre priz başlama süresidir.

Priz sonu süresinin tayini; taban plakasının üzerinde bulunan dolu kalıp priz süresinin sonu için ters çevrilir. Priz sona erme süresi için iğne ve bağlantıları vicat cihazına takılır. Her batırma işleminden sonra iğne hemen temizlenmelidir. Numune batırma işlemleri arasında nem odasında tutulur. Pastaya batırma işlemleri arasındaki zaman aralıkları önceleri 30 dak kadar artırılabilir. Daha sonra en fazla her 15 dakikada bir batırılmalıdır. İğnenin girdiği bir yere bir daha batırılmamalıdır. İğnenin

ilk 0,05 mm battığı an ile sıfır olarak kabul edilen zaman en yakın 15 dakikaya kadar yuvarlatılarak priz sona erme süresi tayin edilir.

Şekil 3.7’de ise vicat deneyi için kullanılan kalıplar ve priz sürelerini ölçmeye yarayan vicat aleti görülmektedir.



Şekil 3.7. Vicat kalıpları ve aleti

3.2.3. Hacim genişleme tayini

Genleşme tayini; TS EN 196-3’e göre standart kıvamda çimento pastası hazırlanır (vicat tayinindeki çimento pastası kullanılabilir). Çimento pastası hafif yağlanmış Le-chatelier kalıbının (Şekil 3.8) içine sıkıştırılmaksızın doldurulur. Doldurma sırasında kalıbın açılmaması için parmak ile hafifçe sıkılır. Doldurma işlemi bitince yüzeyi düzelterek kalıbın üstü hafif yağlanmış plaka ile örtülür. Nem odasındaki kalıp 24 saat suda bekletilir [170].

1. Süre sonunda gösterge uçları arasındaki mesafe okunur (A).
2. Kalıp su banyosunda kaynama sıcaklığına ulaştıktan sonra 3 saat bekletilir.
3. Süre sonunda tekrar mesafe okunur (B).
4. Kalıbın soğuması beklenir gösterge uçları arasındaki mesafe okunur (C).

5. (C-A) değerinin aritmetik ortalaması alınır.
6. B ve C aynı çıkıyorsa (B-A) değeri kullanarak deney süresi kısaltılır.

Nedeni; CaO veya MgO hidratasyonu sebebiyle ortaya çıkabilecek genleşme riskinin değerlendirilmesidir.



Şekil 3.8. Le-chatelier aparatı

3.2.4. İncelik tayini

TS EN 196-6 “Çimento deney yöntemleri - Bölüm 6: İncelik tayini” göre toz halinde bulunan maddelerin 1g'nın kapladığı rölatif yüzeydir [170].

Toz halindeki maddeleri, belirli porozitede önceden tespit edilen şartlarda sıkıştırıldıktan sonra ve yine önceden tespit edilmiş bir miktar havayı emdirerek, bu maddeden geçirtmek ve bu suretle maddelerin tane inceliğinin tespit edilmesidir. Hava akımına karşı madde tarafından gösterilen direnç, aynı şartlar altında bu maddenin tane inceliğine bağlıdır. Blaine denemesi ile çimentonun veya karışım numunesinin spesifik yüzeyi tayin edilir, dolayısıyla incelik hakkında bir fikir elde edilir.

Bulk içine belirli miktarda numune konulur. Bulk içine konulan numune tartımı; T

$$T= V.(1-e).d$$

$$V=\text{Bulkun hacmi } (66,55\text{cm}^3)$$

d= Numunenin özgül ağırlığı

e= Porozite katsayısı

Önce bulkun alt kısmına bir süzgeç kâğıdı konulur. Ardından 0.0001 hassasiyetli terazide tartılan numune bulkun içine dikkatli bir şekilde boşaltılır. Üzerine bir süzgeç kâğıdı daha konularak kâğıdın iyice oturması sağlanır. Sonra numune içinde hava boşlukları kalmayacak şekilde bastırılarak bulk kapağı kapatılır. Bulk cihaza yerleştirilir (Şekil 3.9). Cihazın açma tuşuna basılır ve sıvı seviyesinin I noktasından aşağı inişi gözlenir, II noktasını biraz geçtiğinde açma tuşu bırakılır. Çözelti yavaş yavaş eski konumuna gelmeye başlar, II noktasından III noktasına kadar geçen zaman elektrotların ucundaki sıvı damlacıklarının yok olması içindir. III noktasından itibaren numarator okuma işlemi yapmaktadır. I noktasına sıvı geldiğinde elektrik iletkenliği prensibiyle okuma işlemi biter. III'ten I'e gelene kadar oluşmuş olan hava emişi ile numuneden hava seviyesinde hava akımına karşı madde tarafından gösterilen direnç numaratorde aksettirilir. Böylece numaratordeki değer kaydedilir, hesap yoluyla spesifik yüzey tayin edilir.

$$\text{Hesaplama Blaine} = F \cdot \frac{\sqrt{e^3 \cdot t}}{d \cdot e \cdot \sqrt{n}}$$

F= Blaine cihazı faktörü

E=Havanın porozite katsayısı (0.5)

\sqrt{n} = 23⁰C'deki havanın viskozitesi (0.0135)

t= Numaratordeki değer (zaman)

d=Numunenin özgül ağırlığı (g/cm³)



Şekil 3.9. Blaine cihazı

3.2.5. Elek analizi

Elek analizi yönteminde; TS EN 196-6'a göre çimento veya karışım numunesinin inceliği standart eleklerden elenerek ölçülür. Çimentonun belirlenmiş göz açıklığından daha büyük olan tanelerinin oranı tespit edilir. Elek cihazı üzerine eleme yapılacak elek konulur. 10 g tartılan numune de elek üstüne konulup, cihazın üst kapağı kapatılır ve minimum 1dakika süre (3500 Pa vakum basıncı altında) eleme yapılır (Şekil 3.10). Eleme işlemi sırasında plastik uçlu tokmak ile kapağa vurularak eleme işlemi yapılan malzemenin kapağa yapışması engellenir. Eleme işlemi süresi bitiminde kapak açılır ve elek içindeki malzeme temiz bir kâğıt üzerinde kalan miktar terazide tartılır (m) [170].

Hesaplama = %Elek üstü kalıntı : $(m/10).100$



Şekil 3.10. Elek analiz cihazı

3.2.6. Özgül ağırlık deneyi

TS EN 196-6'a göre Le-chatelier şişesi terebentin ile 0-1mm aralığında doldurulur. Şişe ve içindekiler yarım saat laboratuvar şartlarında bekletilir. Hacim okunur (V_1), 64 g (m) çimento veya karışım numunesi şişe içine konulur. Şişe hacmi sabitlenene kadar bekletilir. Sıvı hacmi tekrar okunur (V_2) [170, 171].

$$\text{Hesaplama } D = \frac{m}{V_2 - V_1}$$

D= Çimento yoğunluğu

m= Çimento kütlesi

V_1 =İlk okunan hacim

V_2 =Son okunan hacim

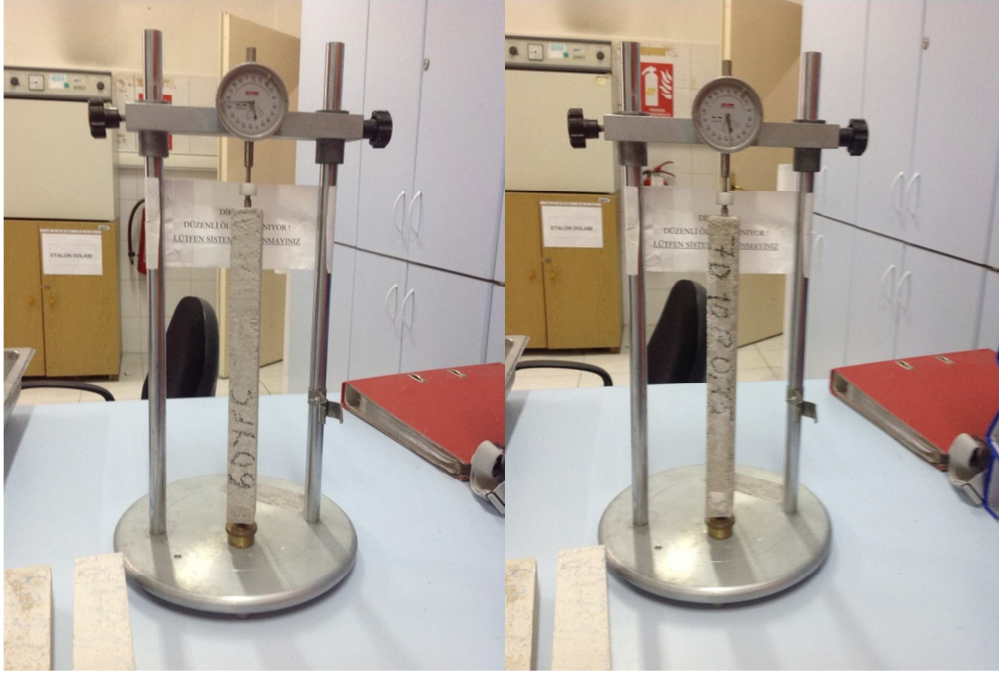
Şekil 3.11'de Le-chatelier aleti ve etüv görüntüsü verilmektedir.



Şekil 3.11. Le-chatelier şişesi ve etüv aleti

3.2.7. Kuruma büzülmesi deneyi

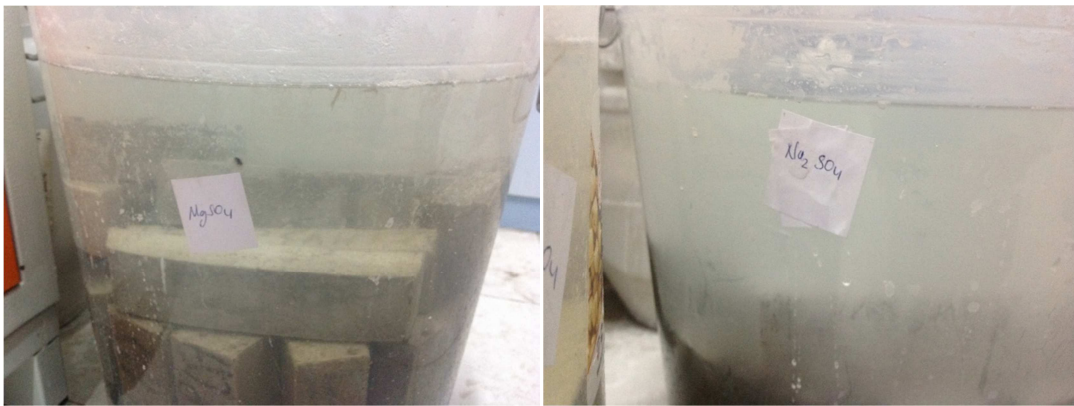
Kuruma büzülmesi ölçümleri 25x25x285 mm boyutlu prizmatik harç çubuğu örnekleri üzerinden ASTM C 596 “Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement” standardına uygun olarak belirlenmiştir. Hazırlanan karışımlar, 24 saat sonra kalıptan sökülmüş ve 7 gün süre ile %95 relatif nem içeren 25 °C kür odasında daha sonraki günlerde 25 °C atmosfer koşullarında bekletilmişlerdir. Harç çubuklarının boy değişimi 0.002 hassasiyetindeki komparatör (Şekil 3.12) yardımıyla ölçülmüştür [172].



Şekil 3.12. Komparatör aleti

3.2.8. Dayanıklılık deneyleri

Harç karışımları %10 $MgSO_4$ (pH=7.44) ve %10 Na_2SO_4 (pH=8.16) 90 gün çözelti içinde bekletildikten sonra basınç dayanımları belirlenmiştir. Şekil 3.13'de $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 çözeltilisinde bekletilen numuneler görülmektedir.



Şekil 3.13. Sülfatlı sularda bekletilen numuneler

3.3. Deneysel Çalışmalarda İlk Aşama

3.3.1. Toz halinde alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu (AAYFCT) kullanılarak elde edilen karışımların deney sonuçları

Bu deneysel çalışmada, çimento CEM I 42.5, yüksek fırın cürufu (YFC) Kardemir yüksek fırın cürufu (çimento inceliğinde), agrega olarak standart kum, sodyum silikat (Na_2SiO_3), sönmüş kireç ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ve sodyum karbonat (Na_2CO_3) alkalileri kullanılmıştır. Kullanılan alkaliler çok ince blaine değerlerinde ve toz formunda çimentoya eklenerek kuru bir karışım elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen bu kuru karışım ile harç numuneleri üretilmiştir.

Kullanılan yüksek fırın cürufu ise çimento miktarının %20, 40, 60, 80, 90 ve 100 oranlarında çimento ile ikame edilmiş olup, kullanılan bağlayıcının (%0.5, 1.00 ve 2.00) oranlarında ise Na_2SiO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve Na_2CO_3 alkalileri kullanılmış, 225 g su, 1350 g standart kum ilave edilerek harç numuneleri üretilmiştir. Ayrıca her bir YFC (%20, 40, 60, 80, 90 ve 100) oranı için şahit numuneler hazırlanmıştır. Elde edilen bu numuneler belirli gün su küründe bekletildikten sonra çimento deneyleri yapılmış ve dayanım değerleri incelenmiştir.

Tablo 3.6.'da dayanım deneyleri için üretilen harç numunelerinin, Tablo 3.7'de ise priz süresi ve hacim genişmesi deneyleri için üretilen çimento pastalarının karışım miktarlarını göstermektedir.

Özgül ağırlık, elek analizi ve blaine deneyleri için Tablo 3.6.'daki değerlerin aynısı alınarak karışım suyu ve standart kum kullanılmadan kuru karışımlar elde edilerek deneyler tatbik edilmiştir.

Tablo 3.6. AAYFCT harçlarının dayanım deneyleri için karışım miktarları (g)

Numune (AAYFCT)	Standart kum	Su	YFC	CEM I	Na ₂ SiO ₃	Na ₂ CO ₃	Ca(OH) ₂
%20YFC*	1350	225	90	360	-	-	-
%40YFC*			180	270	-	-	-
%60YFC*			270	180	-	-	-
%80YFC*			360	90	-	-	-
%90YFC*			405	45	-	-	-
%20YFC+%2Alk.			63	360	9.00	9.00	9.00
%40YFC+%2Alk.			153	270	9.00	9.00	9.00
%60YFC+%2Alk.			243	180	9.00	9.00	9.00
%80YFC+%2Alk.			333	90	9.00	9.00	9.00
%90YFC+%2Alk.			378	45	9.00	9.00	9.00
%100YFC+%2Alk.			423	0	9.00	9.00	9.00
%20YFC+%1Alk.			76.5	360	4.50	4.50	4.50
%40YFC+%1Alk.			166.5	270	4.50	4.50	4.50
%60YFC+%1Alk.			256.5	180	4.50	4.50	4.50
%80YFC+%1Alk.			346.5	90	4.50	4.50	4.50
%90YFC+%1Alk.			391.5	45	4.50	4.50	4.50
%100YFC+%1Alk.			436.5	0	4.50	4.50	4.50
%20YFC+%0.5Alk.			83.25	360	2.25	2.25	2.25
%40YFC+%0.5Alk.			173.25	270	2.25	2.25	2.25
%60YFC+%0.5Alk.			263.25	180	2.25	2.25	2.25
%80YFC+%0.5Alk.	353.25	90	2.25	2.25	2.25		
%90YFC+%0.5Alk.	398.25	45	2.25	2.25	2.25		
%100YFC+%0.5Alk.	443.25	0	2.25	2.25	2.25		

*Referans numuneler

Tablo 3.7. AAYFCT harçlarının priz süresi tayini deneyleri için karışım miktarları (g)

Numune (AAYFCT)	Su	YFC	CEM I	Na ₂ SiO ₃	Na ₂ CO ₃	Ca(OH) ₂
%20YFC*	155	100	400	-	-	-
%40YFC*		200	300	-	-	-
%60YFC*		300	200	-	-	-
%80YFC*		400	100	-	-	-
%90YFC*		450	50	-	-	-
%20YFC+%2Alk.		70	400	10.0	10.0	10.0
%40YFC+%2Alk.		170	300	10.0	10.0	10.0
%60YFC+%2Alk.		270	200	10.0	10.0	10.0
%80YFC+%2Alk.		370	100	10.0	10.0	10.0
%90YFC+%2Alk.		420	50	10.0	10.0	10.0
%100YFC+%2Alk.		470	0	10.0	10.0	10.0
%20YFC+%1Alk.		85	400	5.0	5.0	5.0
%40YFC+%1Alk.		185	300	5.0	5.0	5.0
%60YFC+%1Alk.		285	200	5.0	5.0	5.0
%80YFC+%1Alk.		385	100	5.0	5.0	5.0
%90YFC+%1Alk.		435	50	5.0	5.0	5.0
%100YFC+%1Alk.		485	0	5.0	5.0	5.0
%20YFC+%0.5Alk.		92.5	400	2.5	2.5	2.5
%40YFC+%0.5Alk.		192.5	300	2.5	2.5	2.5
%60YFC+%0.5Alk.		292.5	200	2.5	2.5	2.5
%80YFC+%0.5Alk.	392.5	100	2.5	2.5	2.5	
%90YFC+%0.5Alk.	442.5	50	2.5	2.5	2.5	
%100YFC+%0.5Alk.	492.5	0	2.5	2.5	2.5	

*=Referans numuneler

Tablo 3.8’de verilen değerlerde, yapılmış olan özgül ağırlık deneylerinde, 3.09 g/cm³ ile en yüksek CEM I ile yapılan şahit numune, sonrasında %20 YFC, %40 YFC, %60 YFC, %80 YFC, %90 YFC sırasıyla 3.03, 3.05, 2.95, 2.92, 2.90 değerleri elde edilmiş olup alkali ile aktive edilenlerin ise %20 YFC + %0.5 Alk., %20 YFC + %1 Alk., %20 YFC + %2 Alk. sırasıyla 2.99, 2.98, 2.97 ve %40 YFC + %0.5 Alk., %40 YFC + %1 Alk., %40 YFC + %2 Alk. sırasıyla 2.95, 2.96, 2.96 ve %60 YFC +

%0.5 Alk., %60 YFC + %1 Alk., %60 YFC + %2 Alk. sırasıyla 2.94, 2.93, 2.90 ve %80 YFC + %0.5 Alk., %80 YFC + %1 Alk., %80 YFC + %2 Alk., sırasıyla 2.89, 2.87, 2.82 ve %100 YFC + %0.5 Alk., %100 YFC + %1 Alk., %100 YFC + %2 Alk. Sırasıyla 2.83, 2.79, 2.75 değerleri elde edilmiştir. Görüldüğü üzere YFC'li şahit olan numunelerin özgül ağırlıkları CEM I'li numunelere göre daha düşük, aktive edilen numunelerin ise özgül ağırlıkları YFC'li numunelerden de daha düşük değerler vermiştir.

Tablo 3.8'de verilen değerlerde, yapılmış olan elek analizi deneylerinde ise 0.045 mm'lik elek üstünde kalan numunelerin yüzdelerik miktarları incelendiğinde şahit numuneler ve %20 YFC + %0.5 Alk., %40 YFC + %0.5 Alk., %60 YFC + %0.5 Alk., %60 YFC + %1 Alk., %80 YFC + %0.5 Alk., %80 YFC + %1 Alk., %90 YFC + %0.5 Alk., %90 YFC + %1 Alk., %100 YFC + %0.5 Alk., %100 YFC + %1 Alk., %100 YFC + %2 Alk. Numunelerinden elde edilen elek analizi değerlerinin TS EN 196-6 standardına uygun olduğu diğer numunelerin ise standartların üstünde kaldığı, bu durumun nedeninin de sodyum silikatın tam öğütülememesinden kaynaklandığı anlaşılmıştır.

Yapılan blaine deneylerinden elde edilen değerler bütün kuru karışım numunelerinde incelik değerlerinin TS EN 196-6 standardına uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda kullanılan Na_2SiO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve Na_2CO_3 alkalilerin de inceliklerinin uygun oldukları anlaşılmıştır. Tablo 3.8'de verilen değerlerde, kullanılan YFC'nin blaine değerlerinin CEM I çimentosundan daha ince olduğu görülmektedir. Bu durumdan dolayı YFC içerikli numunelerin blaine değerlerinin daha yüksek sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Ancak numuneler içeriğindeki alkali oranları arttıkça blaine değerlerinin düştüğü gözlenmektedir.

Tablo 3.8. AAYFCT numunelerde çimento deneyleri

Numune (AAYFCT)	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Elek Analizi (%Elek üstü kalıntı)		Blaine (Özgül yüzey cm ² /g)
		0.045mm	0.09mm	
CEM I*	3.09	2.8	-	3586
%20YFC*	3.03	0.4	-	3700
%40YFC*	3.05	4.4	0.3	3780
%60YFC*	2.95	3.6	0.8	3920
%80YFC*	2.92	0.2	-	4027
%90YFC*	2.90	0.7	-	4270
%20YFC+%2Alk.	2.97	0.9	-	3680
%40YFC+%2Alk.	2.96	8.0	4.4	3760
%60YFC+%2Alk.	2.90	6.6	3.6	3832
%80YFC+%2Alk.	2.82	7.0	2.4	3935
%90YFC+%2Alk.	2.81	6.2	3.2	4100
%100YFC+%2Alk.	2.75	4.5	2.4	4309
%20YFC+%1Alk.	2.98	6.2	1.6	3778
%40YFC+%1Alk.	2.96	5.9	1.7	3745
%60YFC+%1Alk.	2.93	10.7	1.4	3852
%80YFC+%1Alk.	2.87	3.9	1.2	3987
%90YFC+%1Alk.	2.87	4.1	1.4	4033
%100YFC+%1Alk.	2.79	3.8	1.3	4221
%20YFC+%0.5Alk.	2.99	4.8	1.0	3782
%40YFC+%0.5Alk.	2.95	4.3	0.9	3783
%60YFC+%0.5Alk.	2.94	3.6	0.8	3932
%80YFC+%0.5Alk.	2.89	3.3	0.7	3984
%90YFC+%0.5Alk.	2.82	3.2	0.7	4025
%100YFC+%0.5Alk.	2.83	2.8	-	4318

*=-Referans numuneler

Tablo 3.9’da verilen değerlerde, şahit numuneler için yapılan vicat deneylerinde kullanılan su miktarları standartlara uygundur. Ancak %20 YFC + %2 Alk. ve %100 YFC + %2 Alk. İçeren numuneler hariç, %2 Alkali içeren bütün numuneler ani priz yapmıştır. %0.5 Alkali içeren numuneler ise ani priz yapmamış ancak TS EN 196-3 standardına uygun olarak görülen su miktarlarının biraz üstüne çıkmışlardır. Bununla beraber %0.5 Alkali içeren numunelerin priz süreleri oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Hatta CEM I’li betonlardan bile daha kısa sürede priz almıştır. AAYFCT’ li numunelerin YFC miktarı arttıa priz sürelerinin de arttığı görülmektedir. Fakat bu durum AAYFCT’li numunelerin YFC içerikli şahit numunelerle kıyaslandığında priz sürelerinin düşük kaldığı anlaşılmaktadır.

%100 YFC içeren harçlarda artan alkali oranlarında ani priz oluşmamış, hatta priz başlama ve sona erme süreleri CEM I’li betonlardan daha iyi neticeler vermiştir. Ancak dayanım değerleri ise diğer bütün numunelerden daha düşük elde edilmiştir. Ani priz bazı durumlarda avantaj sağlayabilir. rnek olarak; erken kalıp alınması gereken yerlerde, tünel ve köprü betonlarında, su sızdıran yerlerde olmasından dolayı kullanılması söz konusu olabilir. Bu duruma ek olarak YFC miktarı arttıa beton maliyetini de dşrdği için tercih edilmesi söz konusudur. Ancak alkali oranları yükseldikçe maliyet değerlerinin de artış göstereceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Yüksek fırın cüruflu çimentodan yapılan betonların kalıp alma süresinin uzun olması ve dayanımlarını geç kazanması en büyük dezavantajdır. Farklı aktivatörlerle, farklı oranlarda alkali kullanılarak optimum priz süreleri üzerinde çalışmalar yapılabilir.

Tablo 3.9’daki genleşme tayini değerleri ise TS EN 196-3 standartlarını sağlamış neredeyse hiç genleşme yapmamışlardır. Bu durumda, AAYFC’ li betonların kuruma büzülmesi değerleri çok yüksek olduğu için hacim genleşmesinin tam tersi bir durum olması söz konusudur.

Tablo 3.9. AAYFCT numunelerde çimento deneyleri

Numune (AAYFCT)	Vicat (su miktarı ml)	Priz süresi (dk)		Genleşme tayini (Le-chatelier mm)		
		Başı	Sonu	İlk(A)	Son(B)	Sonuç(C)
CEM I 42.5*	144	195	235	15	16	1
%20YFC*	155	195	240	13	13	0
%40YFC*	155	160	220	12	12	0
%60YFC*	155	180	220	11	11	0
%80YFC*	145	300	380	15	15	0
%90YFC*	150	370	410	14	14	0
%20YFC+%2Alk.	155	60	65	19	19	0
%40YFC+%2Alk.	Ani priz	-	-	-	-	-
%60YFC+%2Alk.	Ani priz	-	-	-	-	-
%80YFC+%2Alk.	Ani priz	-	-	-	-	-
%90YFC+%2Alk.	Ani priz	-	-	-	-	-
%100YFC+%2Alk.	160	70	100	13	13	0
%20YFC+%1Alk.	Ani priz	-	-	-	-	-
%40YFC+%1Alk.	Ani priz	-	-	-	-	-
%60YFC+%1Alk.	Ani priz	-	-	-	-	-
%80YFC+%1Alk.	Ani priz	-	-	-	-	-
%90YFC+%1Alk.	Ani priz	-	-	-	-	-
%100YFC+%1Alk.	170	60	100	14	15	1
%20YFC+%0.5Alk.	160	110	165	16	16	0
%40YFC+%0.5Alk.	160	180	210	12	12	0
%60YFC+%0.5Alk.	160	250	295	15	15	0
%80YFC+%0.5Alk.	163	240	270	14	14	0
%90YFC+%0.5Alk.	170	230	275	15	15	0
%100YFC+%0.5Alk.	165	130	160	11	11	0

*=-Referans numuneler

Tablo 3.10'da %20 YFC + %0.5 Alk., %20 YFC + %1Alk., %20 YFC + %2 Alk. İçerikli numunelerin 2 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %20 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %20, %22 ve %26 oranlarında, 7 günlük değerler ise sırasıyla %17, %51 ve %32 oranlarında, 28 günlük numunelerde ise %5, %17 ve %29 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.10'da %40 YFC + %0.5 Alk., %40 YFC + %1Alk., %40 YFC + %2 Alk. içerikli numunelerin 2 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %40 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %19, %32 ve %90 oranlarında, 7 günlük değerler ise sadece %40 YFC + %0.5 Alk., içeren numunelerde %19 oranında bir artış sağlamış, diğer numunelerde ise (%40 YFC + %1 Alk. ve %40 YFC + %2 Alk.) sırasıyla %29 ve %84 oranlarında, 28 günlük numunelerde ise %10, %35 ve %88 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.10'da %60 YFC + %0.5 Alk., %60 YFC + %1Alk., %60 YFC + %2 Alk. İçerikli numunelerin 2 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %22, %64 ve %81 oranlarında, 7 günlük değerler ise sadece %60 YFC + %0.5 Alk. ve %60 YFC + %1 Alk. İçeren numunelerde sırasıyla %120 ve %51 oranlarında bir artış sağlanmış, diğer numunede ise (%60 YFC + %2 Alk.) %62 oranında, 28 günlük numunelerde ise %6, %9 ve %60 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.10'da %80 YFC + %0.5 Alk. Numunesinde 2 günlük eğilme dayanım değeri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında %7 kadar artış sağlanmış, diğer numunelerde ise (%80 YFC + %1 Alk. ve %80 YFC +%2 Alk.) sırasıyla %17 ve %10 oranlarında, 7 günlük değerler ise sadece %80 YFC + %1 Alk. İçeren numune de referans numunesiyle aynı oran elde edilmiş, diğer numunelerde ise (%80 YFC + %0.5 Alk. ve %80 YFC +%1 Alk.) sırasıyla %11 ve %6 oranlarında düşmüş, 28 günlük değerlerde ise %80 YFC + %0.5 Alk. içeren numunede %12 oranında artış sağlanmış, %80 YFC + %1 Alk. İçeren numunede ise referans numunesiyle aynı değer elde edilmiş, diğer numunede ise (%80 YFC +%2 Alk.) %7 oranında düşüş olmuştur.

Yukarıdaki değerlerden de anlaşılacağı üzere alkali oranının artması eğilme dayanım değerlerini düşürdüğü gözlenmiştir.

Tablo 3.10'da %90 YFC + %0.5 Alk., %90 YFC + %1Alk., %90 YFC + %2 Alk. İçerikli numunelerin 2 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %90 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %3, %128 ve %56 oranlarında bir artış sağlanmış olup, 7 günlük değerler ise %90 YFC + %1 Alk. içeren numunede %6 oranında bir düşüş olmuş, diğer numunelerde ise (%90 YFC + %0.5 Alk. ve %90 YFC + %2 Alk.) sırasıyla %66 ve %56 oranlarında artış sağlanmıştır. 28 günlük eğilme dayanım değerlerinde ise %90 YFC + %0.5 Alk. içeren numunede referans numunesiyle aynı değer elde edilmiş, %90 YFC + %1Alk., %90 YFC + %2 Alk. içeren numunelerde ise %13 ve %20 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.10'da %100 YFC referans numunesi elde edilemediği için, %100 YFC + Alk. İçerikli numuneler %90 YFC içerikli referans numunesiyle kıyaslandı. %100 YFC + %0.5 Alk., %100 YFC + %1 Alk ve %100 YFC + %2 Alk. İçerikli numunelerin 2 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesiyle kıyaslandığında sırasıyla %67, %90 ve %261 oranlarında, 7 günlük değerler kıyaslandığında sırasıyla %9, %94 ve %110 oranlarında artış sağlanırken, 28 günlük değerler kıyaslandığında sırasıyla %52, %55 ve %15 oranlarında düşüş göstermiştir.

Sonuç olarak en yüksek eğilme dayanım değerleri cüruf oranının fazla olduğu değerler %90 YFC + %1 Alk.. ve %100 YFC + %2 Alk. Olan numunelerde görülmüştür. Cüruf oranının artması harç içinde kullanılan alkalilerin aktivasyonunu artırmıştır. Ancak bütün numunelerde, %100 YFC + 0.5 Alk. İçerikli numuneler hariç alkali oranlarının artması eğilme dayanım değerlerini düşürmüştür.

Tablo 3.10. AAYFCT içerikli numunelerin 2, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

Numune (AAYFCT)	2 Gün	Bağlı değer**	7 Gün	Bağlı değer**	28 Gün	Bağlı değer**
%20YFC*	5.74	1.00	7.15	1.00	8.62	1.00
%20YFC+%0.5Alk.	4.58	0.80	5.96	0.83	8.15	0.95
%20YFC+%1Alk.	4.47	0.78	3.52	0.49	7.19	0.83
%20YFC+%2Alk.	4.25	0.74	4.85	0.68	6.13	0.71
%40YFC*	3.24	1.00	4.51	1.00	7.31	1.00
%40YFC+%0.5Alk.	2.63	0.81	5.35	1.19	6.55	0.90
%40YFC+%1Alk.	2.19	0.68	3.21	0.71	4.78	0.65
%40YFC+%2Alk.	0.32	0.10	0.72	0.16	0.87	0.12
%60YFC*	2.36	1.00	2.28	1.00	5.70	1.00
%60YFC+%0.5Alk.	1.85	0.78	5.02	2.20	5.38	0.94
%60YFC+%1Alk.	0.84	0.36	3.45	1.51	5.18	0.91
%60YFC+%2Alk.	0.46	0.19	0.87	0.38	2.27	0.40
%80YFC*	0.96	1.00	3.06	1.00	5.40	1.00
%80YFC+%0.5Alk.	1.03	1.07	2.71	0.89	6.04	1.12
%80YFC+%1Alk.	0.80	0.83	3.06	1.00	5.39	1.00
%80YFC+%2Alk.	0.86	0.90	2.89	0.94	5.00	0.93
%90YFC*	0.39	1.00	1.81	1.00	5.26	1.00
%90YFC+%0.5Alk.	0.39	1.03	3.01	1.66	5.26	1.00
%90YFC+%1Alk.	0.89	2.28	1.71	0.94	4.60	0.87
%90YFC+%2Alk.	0.61	1.56	2.82	1.56	4.22	0.80
%100 YFC*	Numune elde edilemedi					
%100YFC+%0.5Alk.***	0.65	1.67	1.98	1.09	2.51	0.48
%100YFC+%1Alk.***	0.74	1.90	3.52	1.94	2.35	0.45
%100YFC+%2Alk.***	1.41	3.61	3.80	2.10	4.46	0.85

* Referans numuneler

** Referans numunelerin değerlerini 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

***%90 YFC Referans numunesi ile karşılaştırıldı.

Tablo 3.11’de %20 YFC + %0.5 Alk., %20 YFC + %1Alk., %20 YFC + %2 Alk. İçerikli numunelerin 2 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %20 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %18, %32 ve %48 oranlarında, 7 günlük değerler ise sırasıyla %20, %39 ve %51 oranlarında, 28 günlük numunelerde ise %21, %57 ve %57 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.11’de %40 YFC + %0.5 Alk., %40 YFC + %1Alk., %40 YFC + %2 Alk. içerikli numunelerin 2 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %40 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %2, %38 ve %99 oranlarında, 7 günlük değerler ise, sırasıyla %8, %57 ve %99 oranlarında, 28 günlük numunelerde ise %9, %56 ve %99 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.11’de %60 YFC + %0.5 Alk., %60 YFC + %1Alk., %60 YFC + %2 Alk. İçerikli numunelerin 2 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %8, %60 ve %85 oranlarında, 7 günlük değerler ise sırasıyla %11, %55 ve %84 oranlarında, 28 günlük numunelerde ise %18, %6 ve %82 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.11’de %80 YFC + %0.5 Alk., %80 YFC + %1Alk., %80 YFC + %2 Alk. İçerikli numunelerin 2 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %3, %24 ve %20 oranlarında, 7 günlük değerler ise sırasıyla %9, %7 ve %16 oranlarında, 28 günlük numunelerde ise %24, %30 ve %36 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.11’de %90 YFC + %0.5 Alk İçerikli numunelerin 2 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %90 YFC ile kıyaslandığında %8 oranında düşmüş, %90 YFC + %1Alk., %90 YFC + %2 Alk. İçerikli numunelerde ise sırasıyla %383 ve %11 oranlarında, 7 günlük değerler ise %16, %14 ve %6 oranlarında artış sağlanmış. 28 günlük eğilme dayanım değerlerinde ise %33, %42 ve %43 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.11’de %100 YFC + %0.5 Alk İçerikli numunelerin 2 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %90 YFC ile kıyaslandığında %32 oranında düşmüş, %90 YFC + %1Alk., %90 YFC + %2 Alk. İçerikli numunelerde ise sırasıyla %227 ve %248 oranlarında, 7 günlük değerler ise %49, %86 ve %4 oranlarında. 28 günlük eğilme dayanım değerlerinde ise %76, %63 ve %62 oranlarında düşüş göstermiştir.

Eğilme dayanım değerlerinden elde edilen bazı numunelerde dayanım değerleri referans numunelerinin üstünde iken, basınç dayanım değerlerinden elde edilen bütün numunelerin dayanım değerleri referans numunelerin altında kalmıştır.

Tablo 3.11. AAYFCT içerikli numunelerin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

Numune (AAYFCT)	2 Gün	Bağlı değer**	7 Gün	Bağlı değer**	28 Gün	Bağlı değer**
%20YFC*	24.05	1.00	38.15	1.00	53.40	1.00
%20YFC+%0.5Alk.	19.80	0.82	30.65	0.80	42.20	0.79
%20YFC+%1Alk.	16.38	0.68	23.30	0.61	22.70	0.43
%20YFC+%2Alk.	12.42	0.52	18.88	0.49	23.20	0.43
%40YFC*	15.66	1.00	26.47	1.00	42.10	1.00
%40YFC+%0.5Alk.	15.40	0.98	24.30	0.92	38.50	0.91
%40YFC+%1Alk.	9.66	0.62	11.31	0.43	18.41	0.44
%40YFC+%2Alk.	0.52	0.03	1.74	0.07	3.70	0.09
%60YFC*	9.32	1.00	17.53	1.00	32.25	1.00
%60YFC+%0.5Alk.	8.59	0.92	15.54	0.89	26.45	0.82
%60YFC+%1Alk.	3.76	0.40	7.82	0.45	30.19	0.94
%60YFC+%2Alk.	1.37	0.15	2.73	0.16	5.70	0.18
%80YFC*	4.05	1.00	11.20	1.00	24.85	1.00
%80 YFC +%0.5Alk.	3.92	0.97	10.23	0.91	19.00	0.76
%80YFC+%1Alk.	3.07	0.76	10.39	0.93	17.29	0.70
%80YFC+%2Alk.	3.24	0.80	9.43	0.84	16.00	0.64

Tablo 3.11. AAYFCT içerikli numunelerin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)'nın (devamı)

%90YFC*	1.50	1.00	7.99	1.00	22.90	1.00
%90 YFC +0.5Alk.	1.83	0.92	9.24	1.16	15.42	0.67
%90YFC+%1Alk.	9.65	4.83	9.13	1.14	13.20	0.58
%90YFC+%2Alk.	2.22	1.11	8.49	1.06	13.04	0.57
%100 YFC*	Numune elde edilemedi					
%100YFC+%0.5Alk.***	1.36	0.68	4.04	0.51	5.45	0.24
%100YFC+%1Alk.***	6.53	3.27	1.12	0.14	8.50	0.37
%100YFC+%2Alk.***	6.95	3.48	7.64	0.96	8.65	0.38

* Referans numuneler

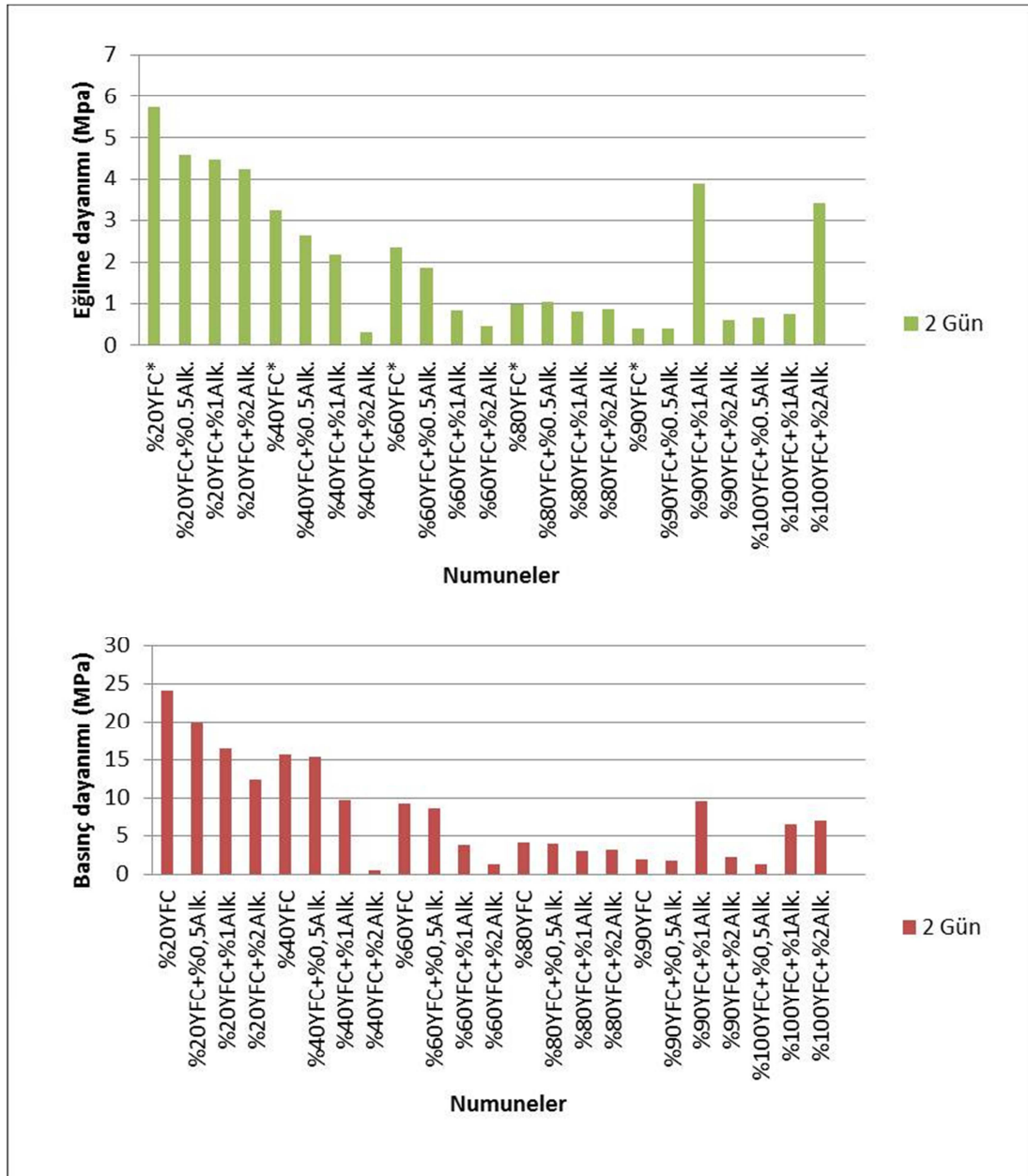
**Referans numunelerin değerlerini 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

***%90 YFC Referans numunesi ile karşılaştırıldı.

Betonun durabilite ve geçirmezlik gibi özelliklerinin yanında, bazı uygulamalarda istisnai durumlar söz konusu olsa da betonun basınç dayanımı genellikle onun en değerli özelliği olarak göz önünde tutulur ve betonun kalitesi, onun basınç dayanımı ile tanımlanır. Betonarme yapılarda, kesit içindeki basınç gerilmelerini beton, çekme gerilmelerini ise donatı olarak, iki malzemenin ortaklaşa çalışması ilkesine göre düzenlenir. Bu açıdan bakıldığında, betonun dayanım özelliği ile diğer özellikleri arasında bağlantı kurabilmek ve bu özelliklerin ne büyüklükte olduğunu değerlendirip fikir elde edebilmek mümkün olmaktadır.

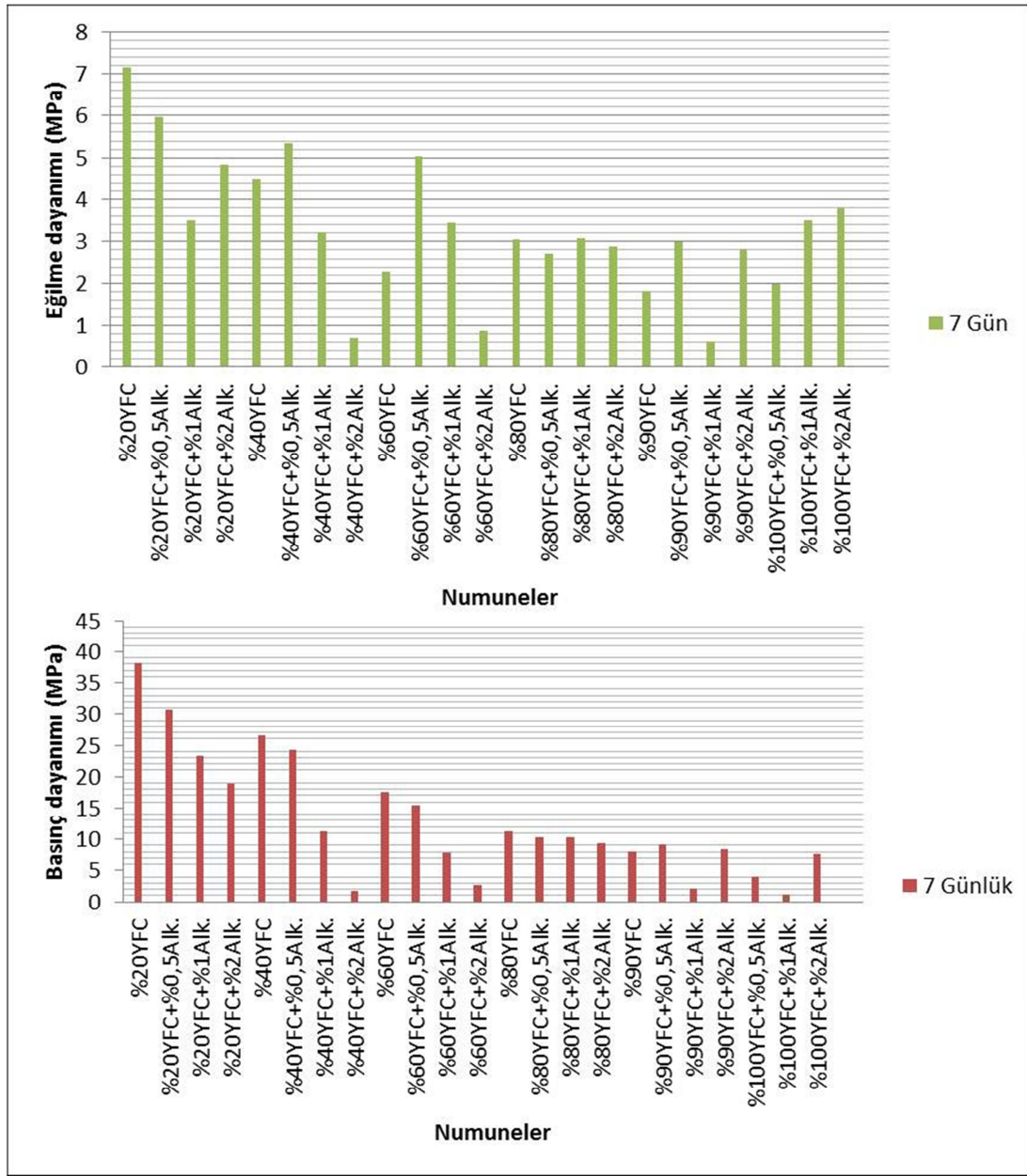
Beton üzerinde yapılan çalışmalarda, betonun basınç dayanımı ile diğer özellikleri arasındaki ilişkiler araştırılmış, çalışma sonuçları, betonun birçok özelliğinin (geçirimsizlik, aşınma, boşluk oranı vb.) basınç dayanımı ile aynı oranda değiştiğini göstermiştir [25]. 2, 7, 28 ve 90 günlük deneysel çalışmalardan elde edilen dayanım değerlerinin birbirleriyle orantılı olduğu bazı durumlarda düşüş gözlemlendiği, hatta 90 günden sonra değerlerin çok fazla değişmediği bilinmektedir.

Şekil 3.14'de AAYFCT numunelerinin 2 günlük eğilme ve basınç dayanımlarına ait grafikler verilmektedir.



Şekil 3.14. AAYFCT içerikli numunelerin 2 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)

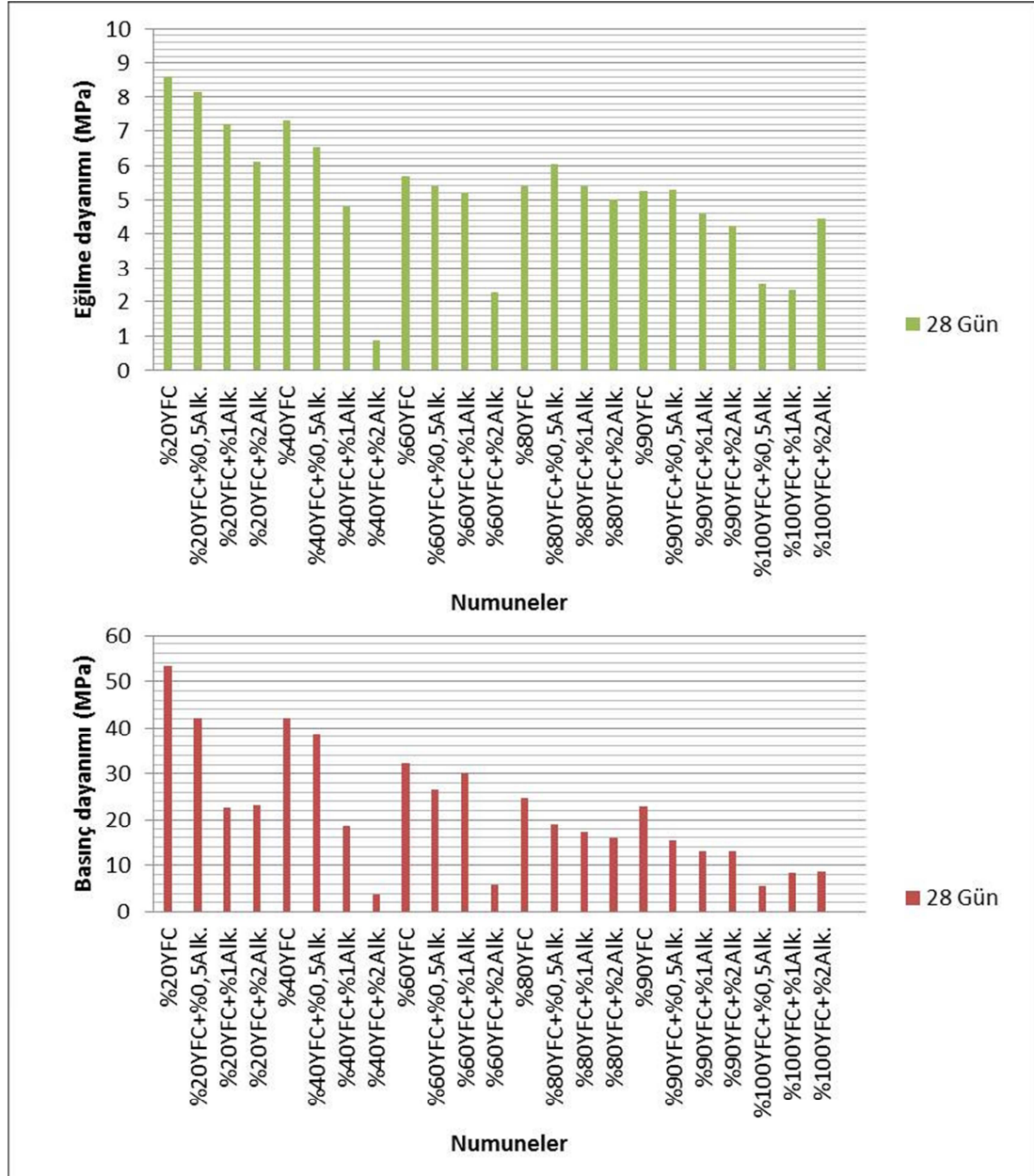
Şekil 3.15’de ise AAYFCT numunelerinin 7 günlük eğilme ve basınç dayanımlarına ait grafikler verilmektedir.



Şekil 3.15. AAYFCT içerikli numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)

Şekil 3.16'da 28 günlük dayanım değerlerini irdelemek gerekirse; bazı değerler referans numunelerine yaklaşmış ancak referans numunelerini geçememişlerdir. Özellikle alkali oranları arttıkça değerler ters orantılı bir şekilde düşmektedir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir; alkaliler harç hazırlanırken kuru bir şekilde çimentoya karıştırılmış daha sonra bu hazırlanan karışıma su eklenmiştir. Alkali iyonlar suya tam bir geçiş sağlayamamış ve aktive olamamışlardır. Bundan sonraki deneysel çalışmalarda, öncelikle alkaliler suda çözdürüldükten sonra çimentolu

karışımlara eklenmiştir. Neticede alınan sonuçlarda elde edilen dayanımlardan daha iyi sonuçlar alındığı gözlenmiştir.

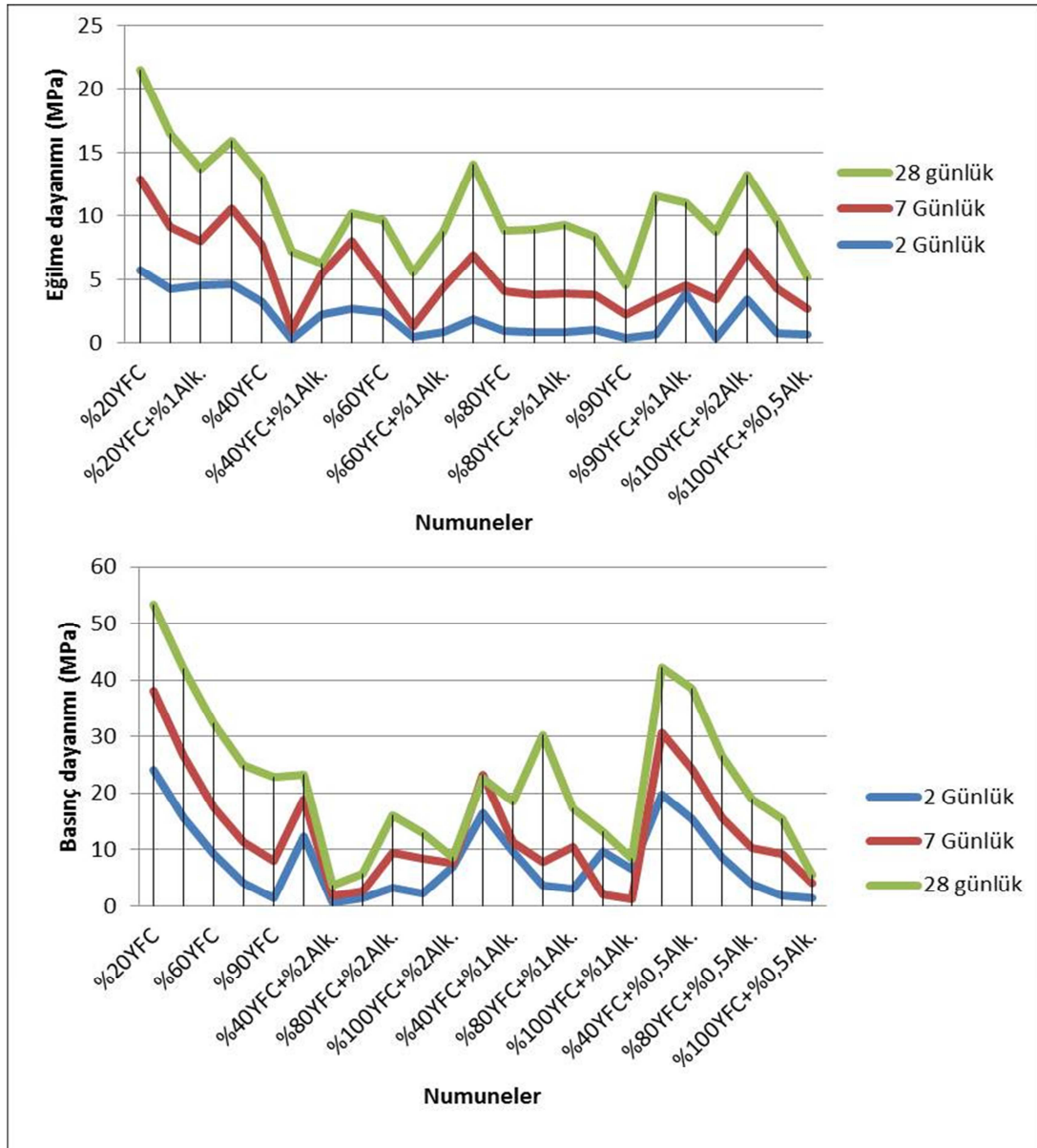


Şekil 3.16. AAYFCT içerikli numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)

Şekil 3.17’de görüldüğü üzere basınç dayanımlarından elde edilen değerler eğilme dayanımındaki gibi değişken olmamış, neredeyse bütün değerler referans numunelerden daha az neticeler verdiği görülmüştür.

Şekil 3.17' deki grafikten elde edilen 28 günlük eğilme dayanımı değerleri eğrisi bazı noktalarda hem 2 günlük hem de 7 günlük eğriden daha az olduğu, basınç dayanım değerlerinden elde edilen eğrilerin ise orantılı bir artış sağladığı görülmektedir.

Eğilme ve basınç dayanımlarının ise birbirleriyle ilişkili olmayacağı, eğilme dayanım değeri çok iyi olan bir numunenin basınç dayanımlarının her zaman iyi değerler vermediği, aralarında doğru orantılı bir ilişkinin olmadığı ilerleyen çalışmalardan da anlaşılmaktadır.



Şekil 3.17. AAYFCT içerikli numunelerin 2, 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)

3.4. Yüksek Fırın Cürufu Karışımlara Sönmüş Kireç Eklenmesi

Bu yapılan deneylere ek olarak; sönmüş kirecin bazik karakterli olmasından dolayı yüksek fırın cürufu ile belirli oranlarda (YFC' nin %4, 6, 8 ve 10'u) karıştırılarak 28 gün kürde bekletilmiş ve dayanım değerlerinin incelenmesi hedef alınmıştır. Çimento olarak CEM I 42.5 ve agrega olarak standart rilem kumu kullanılmıştır. Ancak beklenen sonuçların çok altında değerler elde edildiği için alkalilerle aktive edilmesine gerek görülmemiştir. Bununla birlikte farklı çalışmalarda sönmüş kireç kullanılarak harç suyu içinde alkalilerle birlikte çözündürülüp dayanım ve dayanıklılık değerleri incelenebilir veya kür suyuna belirli oranlarda sönmüş kireç eklenerek bazik bir ortam oluşturulup yine dayanım ve dayanıklılık değerleri incelenebilir.

Üretilen harç numuneleri 2, 7 ve 28 gün su küründe bekletilmiş, dayanım değerleri incelenmiş olup, dayanım değerlerinin sonuçları aşağıda verilen grafik ve tablolarda verilmektedir.

Tablo 3.12'de 7 günlük %4, 6, 8 ve 10 Ca(OH)_2 içerikli numunelerin eğilme dayanım değerleri %60 YFC olan referans numunelerinden fazla çıkmıştır. Ancak 28 günün sonunda en iyi değerleri veren numuneler %52 YFC; %8 Ca(OH)_2 , %50 YFC; %10 Ca(OH)_2 , %74 YFC; %6 Ca(OH)_2 , %72 YFC; %8 Ca(OH)_2 , %70 YFC; %10 Ca(OH)_2 , %82YFC; %8 Ca(OH)_2 , %80YFC. %10 Ca(OH)_2 sırasıyla referans numunelere göre %3, %6, %9, %22, %19 ve %3 katı kadar elde edilmiştir. Fakat bu elde edilen neticeler referans numuneleriyle kıyaslandığında çok memnun edici değildir.

Tablo 3.12. YFC+ Ca(OH)₂ içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

Numune (YFC+ Ca(OH) ₂)	2 Gün	Bağlı değer**	7 Gün	Bağlı değer **	28 Gün	Bağlı değer**
%60YFC*	2.36	1.00	2.28	1.00	5.70	1.00
%56YFC+%4 Ca(OH) ₂	1.88	0.80	3.74	1.64	5.46	0.96
%54YFC+%6 Ca(OH) ₂	1.59	0.67	3.36	1.47	5.61	0.98
%52YFC+%8 Ca(OH) ₂	1.96	0.83	3.28	1.44	5.88	1.03
%50YFC+%10 Ca(OH) ₂	1.73	0.73	3.52	1.54	6.05	1.06
%80YFC*	0.96	1.00	3.06	1.00	5.40	1.00
%76YFC+%4 Ca(OH) ₂	0.58	0.60	1.44	0.47	4.20	0.78
%74YFC+%6 Ca(OH) ₂	0.60	0.63	1.95	0.64	5.43	1.01
%72YFC+%8 Ca(OH) ₂	0.65	0.68	2.32	0.76	5.91	1.09
%70YFC+%10 Ca(OH) ₂	0.70	0.73	2.23	0.73	6.59	1.22
%90YFC*	0.39	1.00	1.81	1.00	5.26	1.00
%86YFC+%4 Ca(OH) ₂	0.32	0.82	1.50	0.83	5.21	0.99
%84YFC+%6 Ca(OH) ₂	0.28	0.72	1.05	0.58	3.94	0.75
%82YFC+%8 Ca(OH) ₂	0.26	0.67	1.74	0.96	6.27	1.19
%80YFC+%10 Ca(OH) ₂	0.15	0.38	1.53	0.85	5.44	1.03

* Referans numuneler

**Referans numunelerin değerini 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

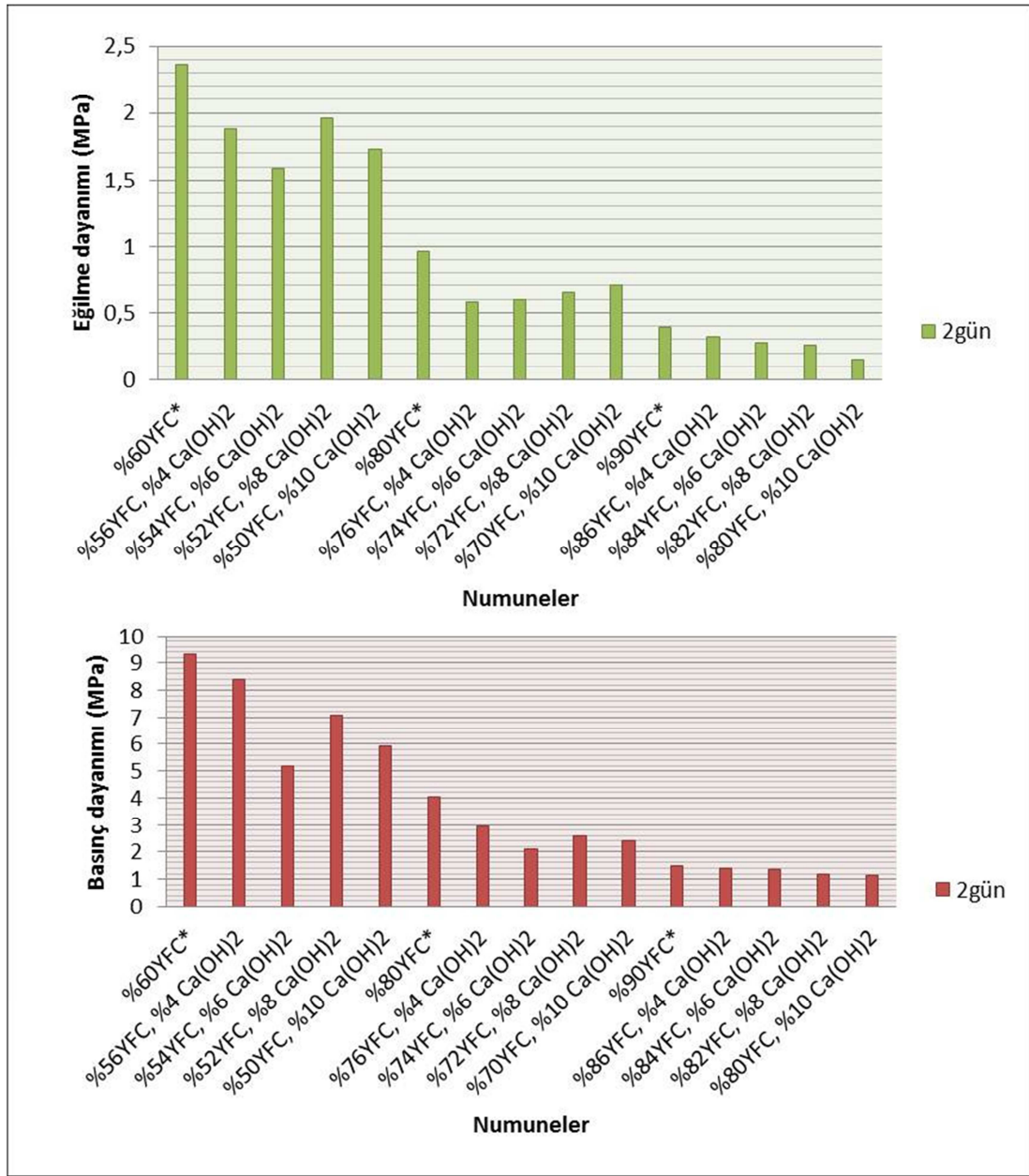
Tablo 3.13. YFC+ Ca(OH)₂ içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

Numune (YFC+ Ca(OH) ₂)	2 Gün	Bağlı değer **	7 Gün	Bağlı değer**	28 Gün	Bağlı değer **
%60YFC*	9.32	1.00	17.53	1.00	32.25	1.00
%56YFC+%4 Ca(OH) ₂	8.42	0.90	13.86	0.79	26.50	0.82
%54YFC+%6 Ca(OH) ₂	5.18	0.56	13.59	0.78	23.60	0.73
%52YFC+%8 Ca(OH) ₂	7.08	0.76	15.34	0.88	27.90	0.87
%50YFC+%10 Ca(OH) ₂	5.94	0.64	13.38	0.76	22.00	0.68
%80YFC*	4.05	1.00	11.20	1.00	24.85	1.00
%76YFC+%4 Ca(OH) ₂	2.95	0.73	6.97	0.62	16.46	0.66
%74YFC+%6 Ca(OH) ₂	2.12	0.52	6.30	0.56	19.60	0.79
%72YFC+%8 Ca(OH) ₂	2.60	0.64	7.75	0.69	21.50	0.87
%70YFC+%10 Ca(OH) ₂	2.42	0.60	8.47	0.76	21.05	0.85
%90YFC*	1.50	1.00	7.99	1.00	22.90	1.00
%86YFC+%4 Ca(OH) ₂	1.42	0.95	6.07	0.76	19.65	0.86
%84YFC+%6 Ca(OH) ₂	1.35	0.90	3.77	0.47	16.03	0.70
%82YFC+%8 Ca(OH) ₂	1.16	0.77	5.48	0.68	17.03	0.74
%80YFC+%10 Ca(OH) ₂	1.15	0.77	5.48	0.69	15.83	0.69

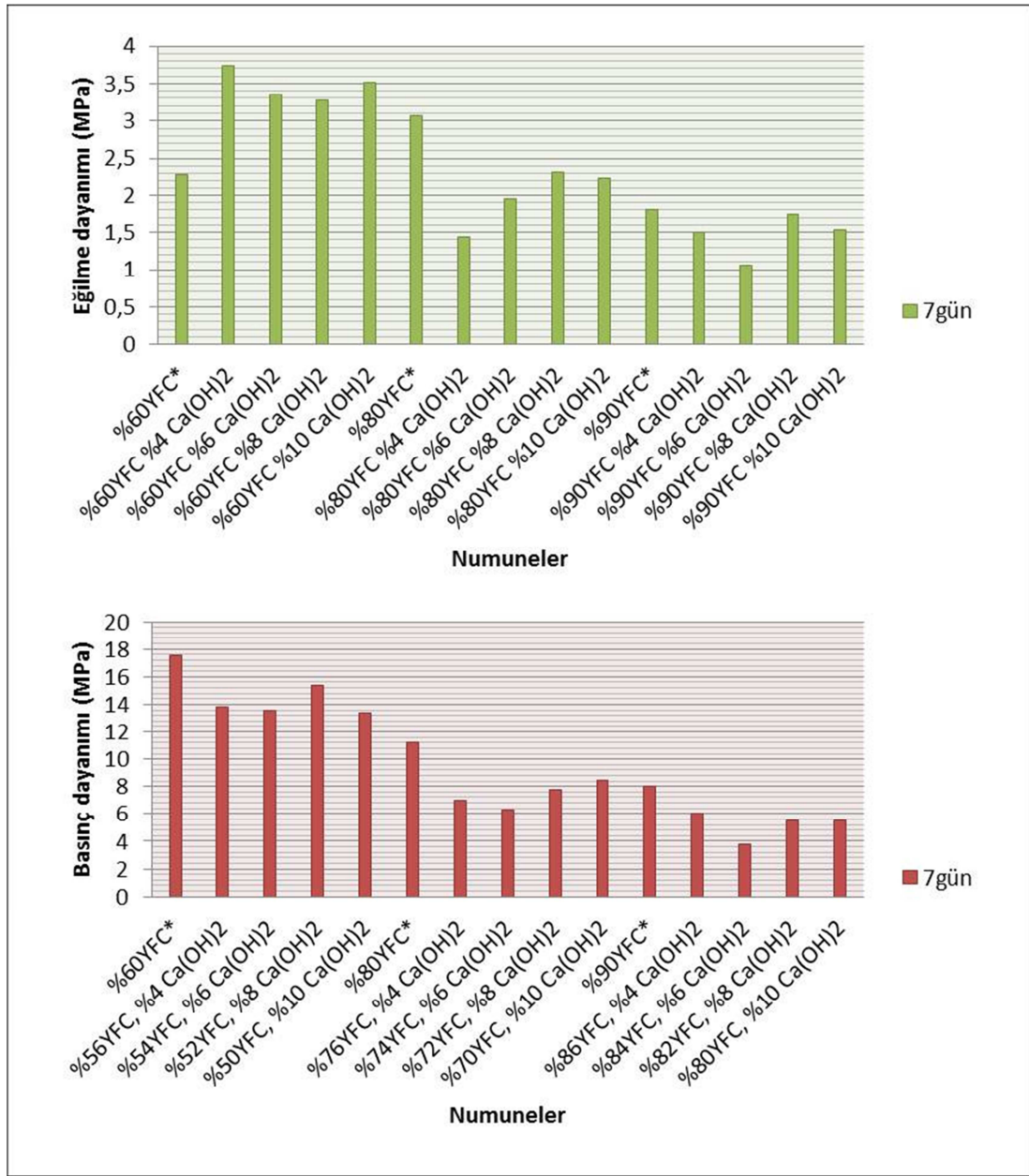
* Referans numuneler

**Referans numunelerin değerlerini 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

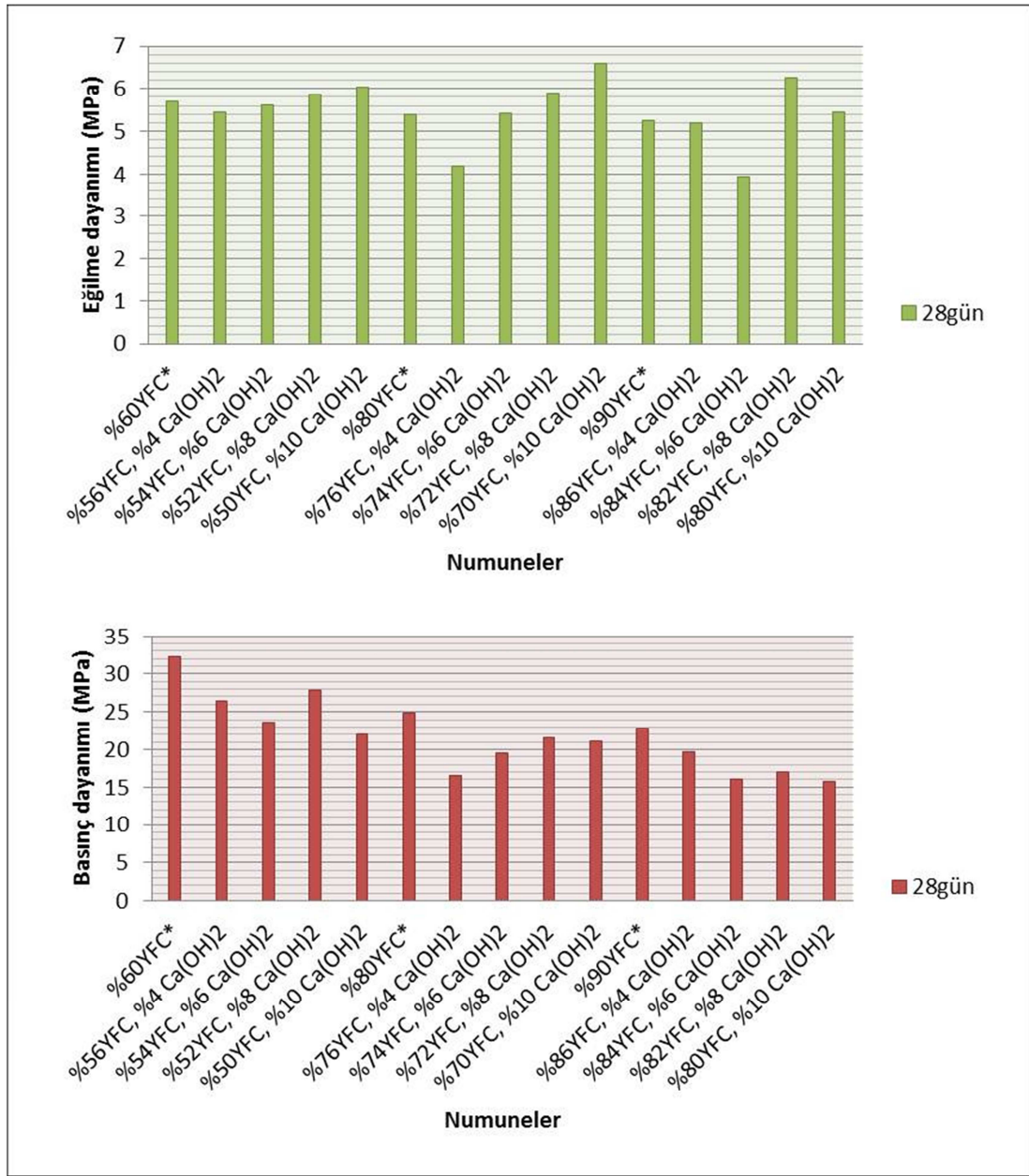
Tablo 3.13'ü irdelemek gerekirse, 28 günlük değerlerin basınç dayanım değerlerinin hiçbiri referans numunelerini yakalayamamışlardır. Bu durum Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'deki grafiklerde de görülmektedir. Bu nedenle bundan sonraki çalışmada AAYFC betonu üretilirken sönmüş kireç kullanılmamıştır.



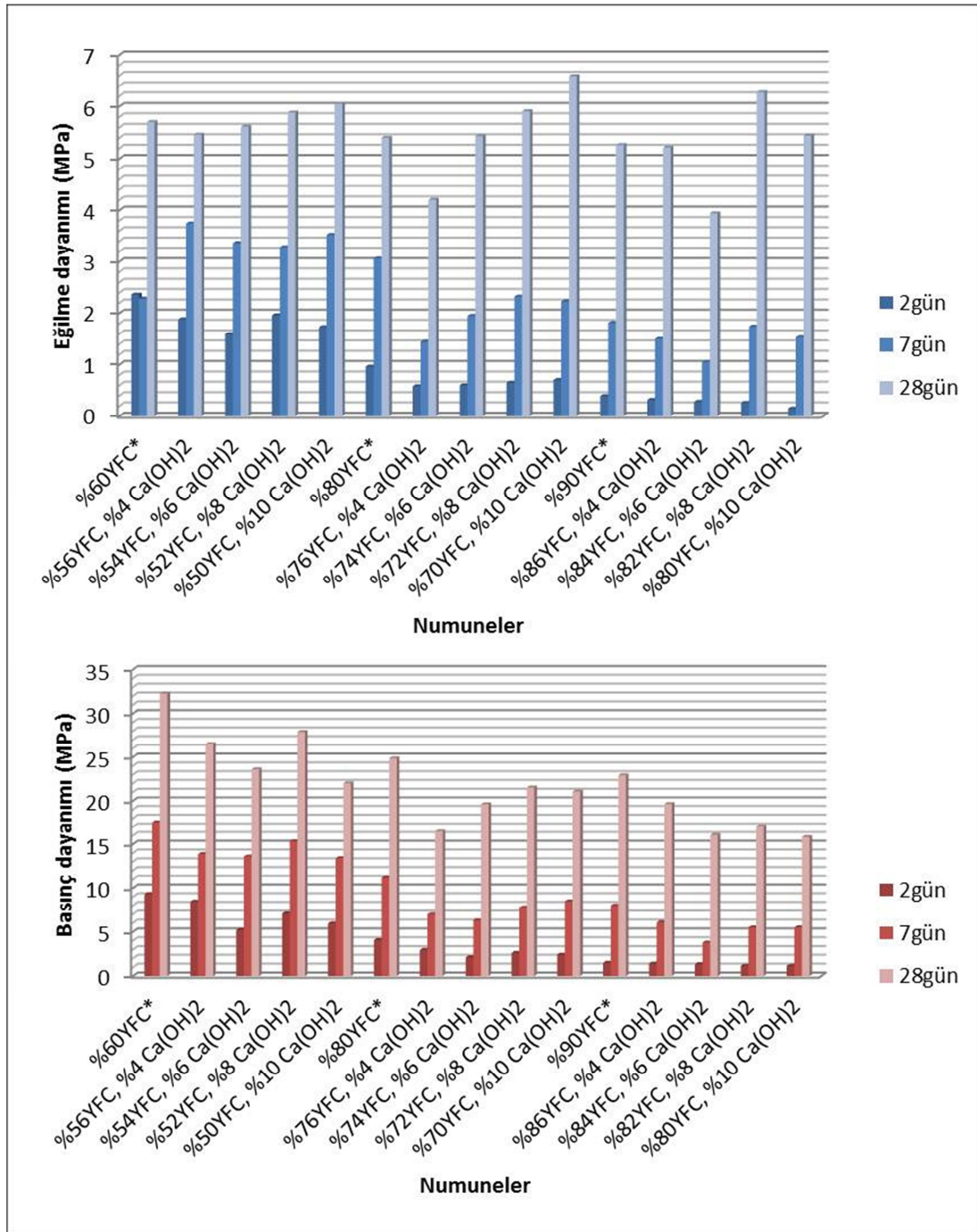
Şekil 3.18. YFC+Ca(OH)₂ numunelerde 2 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.19. YFC+Ca(OH)₂ numunelerde 7 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.20. YFC+Ca(OH)₂ numunelerde 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.21. YFC+Ca(OH)₂ numunelerde 2, 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)

3.5. Deneysel Çalışmalarda İkinci Aşama

Bu aşamada, sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözelti halinde ve sodyum hidroksit (NaOH) ise katı halde karışım suyuna belirli oranlarda hesaplanarak eklenmiş, çimento olarak CEM I 42.5, agrega olarak standart kum, yüksek fırın cürufu ise Kardemir cürufu

kullanılarak harç karışımları elde edilmiştir. Kullanılan alkali kimyasalları Düzey Laboratuvarlarından temin edilmiştir. Kullanılan malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri 3. Bölümdeki tablolarda verilmektedir. Sodyum oksit (Na_2O) oranı ise kullanılan cüruf ağırlığının %2, 4, 6, 7 ve 8'i oranında hesaplanmıştır. Belirlenen her bir sodyum oksit (Na_2O) oranı için farklı oranlarda yüksek fırın cürufu (YFC), belirlenen her bir YFC için üç farklı oranda silikat modülleri (M_S) hesaplanmıştır. Ayrıca her bir YFC oranı için şahit numuneler hazırlanmış ve üretilen AAYFC harçlarıyla kıyaslanmıştır. Bu duruma ek olarak %4 Na_2O oranı için farklı silikat modülleri ile çalışılmıştır.

Üretilen harç numuneleri 7, 28 ve 90 gün su küründe bekletilmiş, dayanım değerleri incelenmiştir.

3.5.1. Belirli sodyum oksit oranlarındaki (%2 Na_2O) harç karışımlarında sıcak kür uygulaması

Bu deneyde kullanılan alkaliler; Na_2SiO_3 çözelti ve NaOH ise granül halde kullanılmış olup, Na_2O oranı YFC'nin %2'si olarak hesaplanmış ve silikat modülleri (M_S : $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) ise $M_S=0$ ve 0.75 olarak belirlenmiştir. Karışım suyundan Na_2SiO_3 çözeltisindeki su oranı çıkarılarak harç karışım hesabı yapılmıştır. Çimento olarak CEM I 42.5 ve agrega olarak standart rilem kumu kullanılmıştır. Karışım miktarları Tablo 3.14' de verilmektedir.

Alkali kullanım oranı harç içinde arttıkça maliyet artar. Ayrıca kuruma büzülmesi değerleri de artar. Bu iki dezavantajı önlemek için %2 Na_2O oranında AAYFC içerikli numunelerin kalıba döküldükten 1 gün sonra k harç içindeki aktivasyonunu artırmak için kalıptan çıkarılarak 3.5 saat sıcak suda kaynatılıp, 28 gün suda kür yapıldıktan sonra dayanım değerlerinin kaynatılmamış numunelerle karşılaştırılmasıdır.

Tablo 3.14. %2 Na₂O oranındaki harçların karışım miktarları (g)

Numune (%2 Na ₂ O)	Standart kum	CEM I	YFC	Su	Na ₂ SiO ₃	NaOH
%40YFC	1350	270	180	225	-	-
%40 M _S =0		270	180	225	-	4.65
%40 M _S =0.75		270	180	218.65	9.93	3.51
%60YFC		180	270	225	-	-
%60 M _S =0		180	270	225	-	6.97
%60 M _S =0.75		180	270	215.48	14.89	5.27
%80YFC		90	360	225	-	-
%80 M _S =0		90	360	225	-	9.29
%80 M _S =0.75		90	360	212.31	19.85	7.02

Tablo 3.15. %2 Na₂O oranlı, AAYFC içerikli kaynatılmış numunelerin 28 günlük dayanımlarının kaynatılmamış numunelerle karşılaştırılması

Numune (%2 Na ₂ O)	Dayanım tayini (MPa) 28 Gün			
	Eğilme	Eğilme K**	Basınç	Basınç K**
%60YFC*	3.53	3.60	13.94	14.01
%60YFC M _S =0	6.90	7.48	22.05	26.10
%60YFC M _S =0.75	6.02	6.93	19.27	25.00
%80YFC*	3.06	3.06	11.20	11.40
%80YFC M _S =0	4.87	6.31	12.01	18.58
%80YFC M _S =0.75	4.41	6.30	12.54	20.00

*Referans numuneler.

**Kaynatılmış numuneler.

Tablo 3.15’de %80 YFC MS=0.75 kaynatılmış olan numune 20 MPa değeriyle diğer numunelerden daha fazla basınç dayanım değerine ulaşmıştır.

Tablo 3.16’da %2 Na₂O oranında AAYFC içerikli numunelerin, eğilme dayanım değerleri referans numunelerle kıyaslandığında %60 YFC Ms=0 olan numune %8,

%60 YFC $M_s=0.75$ olan numune %15, %80 YFC $M_s=0$ olan numune %30, %60 YFC $M_s=0.75$ olan numune %43, oranlarında artış sağlamıştır.

Tablo 3.16'da %2 Na_2O oranında AAYFC içerikli numunelerin, basınç dayanım değerleri referans numunelerle kıyaslandığında %60 YFC $M_s=0$ olan numune %18, %60 YFC $M_s=0.75$ olan numune %30, %80 YFC $M_s=0$ olan numune %55, %60 YFC $M_s=0.75$ olan numune %59, oranlarında artış sağlamıştır.

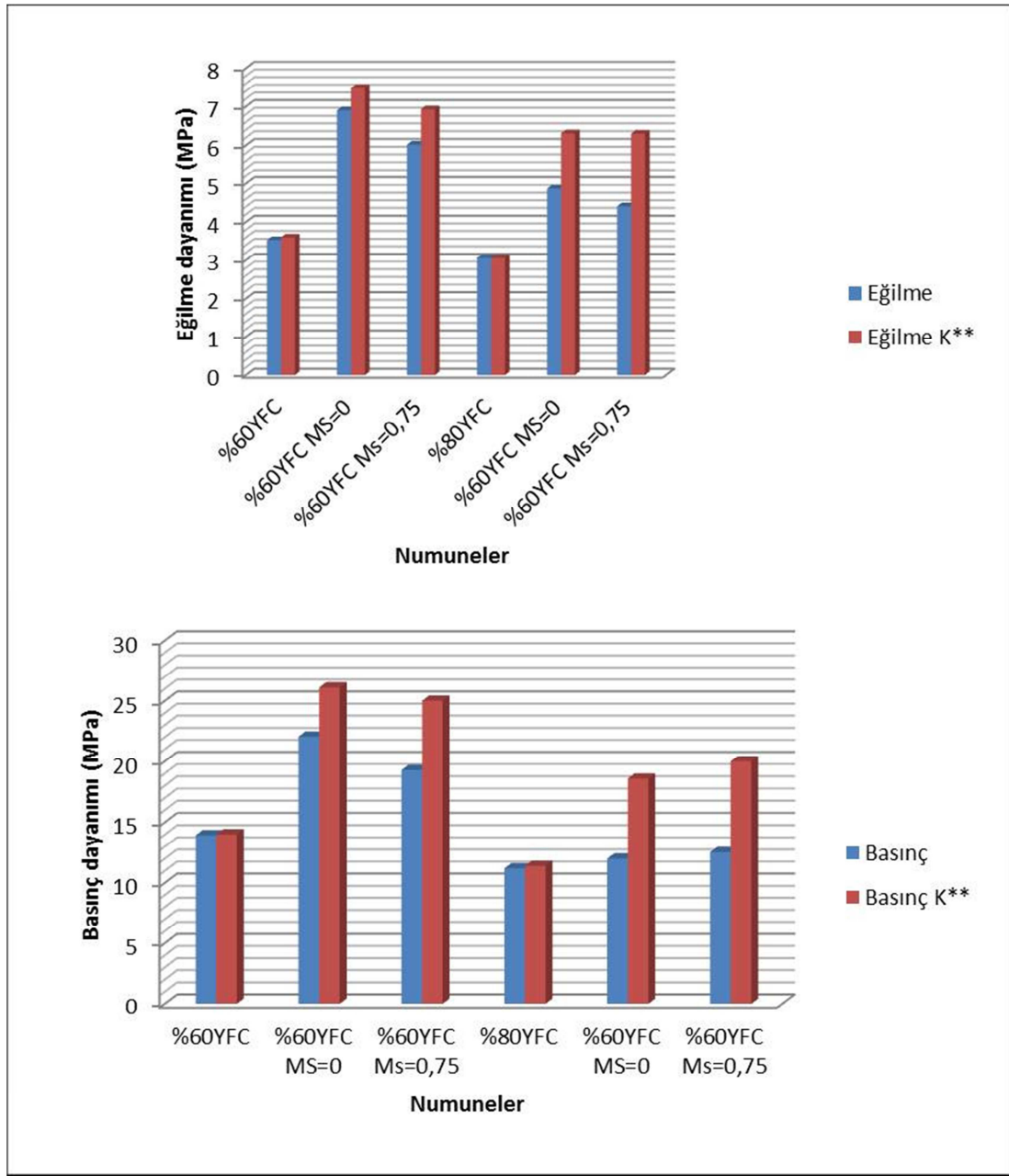
Tablo 3.16. %2 Na_2O oranlı, AAYFC içerikli kaynatılmış numunelerin 28 günlük dayanımlarını, kaynatılmamış numuneleri referans kabul ederek karşılaştırılması

Numune Cinsi (%2 Na_2O)	Dayanım tayini (MPa)	
	Eğilme K^{**}	Basınç K^{**}
%60YFC*	1.02	1.01
%60YFC $M_s=0$	1.08	1.18
%60YFC $M_s=0.75$	1.15	1.30
%80YFC*	1.00	1.02
%80YFC $M_s=0$	1.30	1.55
%80YFC $M_s=0.75$	1.43	1.59

*Referans numuneler

**Kaynatılmış numuneler

Şekil 3.22'de hem eğilme hem de basınç dayanım değerlerinin kaynatılmamış olan şahit numunelere kıyasla daha iyi neticeler verdiği görülmektedir. Özellikle alkali içerikli numunelerin değerleri alkali içermeyen numunelere oranla daha iyi olması alkalili malzemelerin sıcakta daha iyi aktive oldukları anlaşılmaktadır. Kullanılan Na_2O oranı düşük olduğu için YFC'yi aktive edebilme kapasitesi daha düşmüştür. Alkali oranının artması aktivasyon etkisini de doğru orantılı bir şekilde artıracığı düşünülebilir. Bu duruma bağlı olarak yüksek Na_2O oranlarıyla kür sıcaklığı artırılarak ya da kür yöntemi değiştirilerek (suda kür olmasını beklemek yerine) etüvde belirli sıcaklıklarda bekleterek ya da otoklav kür, buhar kürü gibi alternatif çalışmalar yapıp dayanım ve dayanıklılık değerleri incelenebilir.



Şekil 3.22. %2 Na₂O oranlı, AAYFC içerikli kaynatılmış numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanımlarının kaynatılmamış numunelerle karşılaştırılması (MPa)

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda otoklav küre tabi tutulan AAYFC'li numunelerin dayanım değerlerinden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Fakat yerinde beton dökümü için uygun kür şartları olmamakla birlikte prefabrike yapılar için alternatif kür şartları oluşturup AAYFC'li prefabrike yapılar inşa edilebilir.

3.5.2. Belirli sodyum oksit oranlarındaki (%4 Na₂O) harç karışımlarının farklı silikat modülü (M_S) ile çalışılması

%4 Na₂O oranındaki numunelerin karışım miktarları Tablo 3.17’de verilmektedir. 2, 7 ve 28 günlük dayanım değerleri şahit numunelerle (%60YFC oranlarında) kıyaslanarak incelenmiştir.

Tablo 3.17. %4 Na₂O oranındaki harçların karışım miktarları (g)

Numune (%4 Na ₂ O)	Standart kum	CEM I	YFC	Su	Na ₂ SiO ₃	NaOH
%60YFC*	1350	180	270	225.00	-	-
%60 M _S =0.75		180	270	205.96	29.78	10.53
%60 M _S =1.00		180	270	199.61	39.71	9.40
%60 M _S =1.25		180	270	193.27	49.63	8.26
%60 M _S =1.50		180	270	186.92	59.56	7.13

*Referans numuneler

Bu bölümdeki deneysel çalışmada sadece %60 YFC oranı sabit tutularak farklı silikat modülleri ile çalışılmış ancak kullanılan Na₂O oranı yüksek fırın cürufunu aktive etmek için yeterli miktarda olmadığı, çıkan dayanım değerlerinden anlaşılmaktadır. Bu duruma istinaden ilerleyen çalışmalarda optimum Na₂O oranını belirlemek için Na₂O oranını artırarak deneysel çalışmalar sürdürülmüştür.

Tablo 3.18.’de, %4 Na₂O oranında AAYFC içerikli numunelerin %60 YFC M_S=0.75, M_S=1.00, M_S=1.25 ve M_S=1.50 olan numunelerin 2 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %15, %43, %23 ve %14 oranlarında düşüş göstermiştir. 7 günlük değerler ise sırasıyla %42, %46 oranlarında düşmüş, %14 ve %14 oranlarında artış sağlamıştır. 28 günlük değerler ise sırasıyla %19, %3, %11 oranlarında düşmüş ve %4 oranında artış sağlamıştır.

Tablo 3.18. %4 Na₂O oranlı, AAYFC içerikli numunelerin farklı silikat modülleri ile 2, 7 ve 28 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)

Numune (%4 Na ₂ O)	2 Gün	Bağlı değer **	7 Gün	Bağlı değer **	28 Gün	Bağlı değer **
%60YFC*	2.36	1.00	3.53	1.00	5.7	1.00
%60 M _S =0.75	2.01	0.85	2.05	0.58	4.64	0.81
%60 M _S =1.00	1.11	0.57	1.89	0.54	5.52	0.97
%60 M _S =1.25	1.81	0.77	4.04	1.14	5.10	0.89
%60 M _S =1.50	2.02	0.86	4.03	1.14	5.92	1.04

* Referans numuneler

** Referans numunelerin değerlerini 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

Tablo 3.19’da %4 Na₂O oranında AAYFC içerikli numunelerin %60 YFC M_S=0.75, M_S=1.00, M_S=1.25 ve M_S=1.50 olan numunelerin 2 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %21, %45, %46 ve %48 oranlarında, 7 günlük değerler ise sırasıyla %43, %49, %21 ve %23 oranlarında, 28 günlük değerler ise sırasıyla %29, %25 %43 ve %40 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.19. %4 Na₂O oranlı, AAYFC içerikli numunelerin farklı silikat modülleri ile 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)

Numune (%4 Na ₂ O)	2 Gün	Bağlı değer **	7 Gün	Bağlı değer **	28 Gün	Bağlı değer **
%60YFC*	9.32	1.00	13.94	1.00	32.25	1.00
%60 M _S =0.75	7.00	0.79	7.93	0.57	22.80	0.71
%60 M _S =1.00	5.11	0.55	7.15	0.51	24.25	0.75
%60 M _S =1.25	5.03	0.54	10.97	0.79	18.34	0.57
%60 M _S =1.50	4.85	0.52	10.74	0.77	19.5	0.60

* Referans numuneler

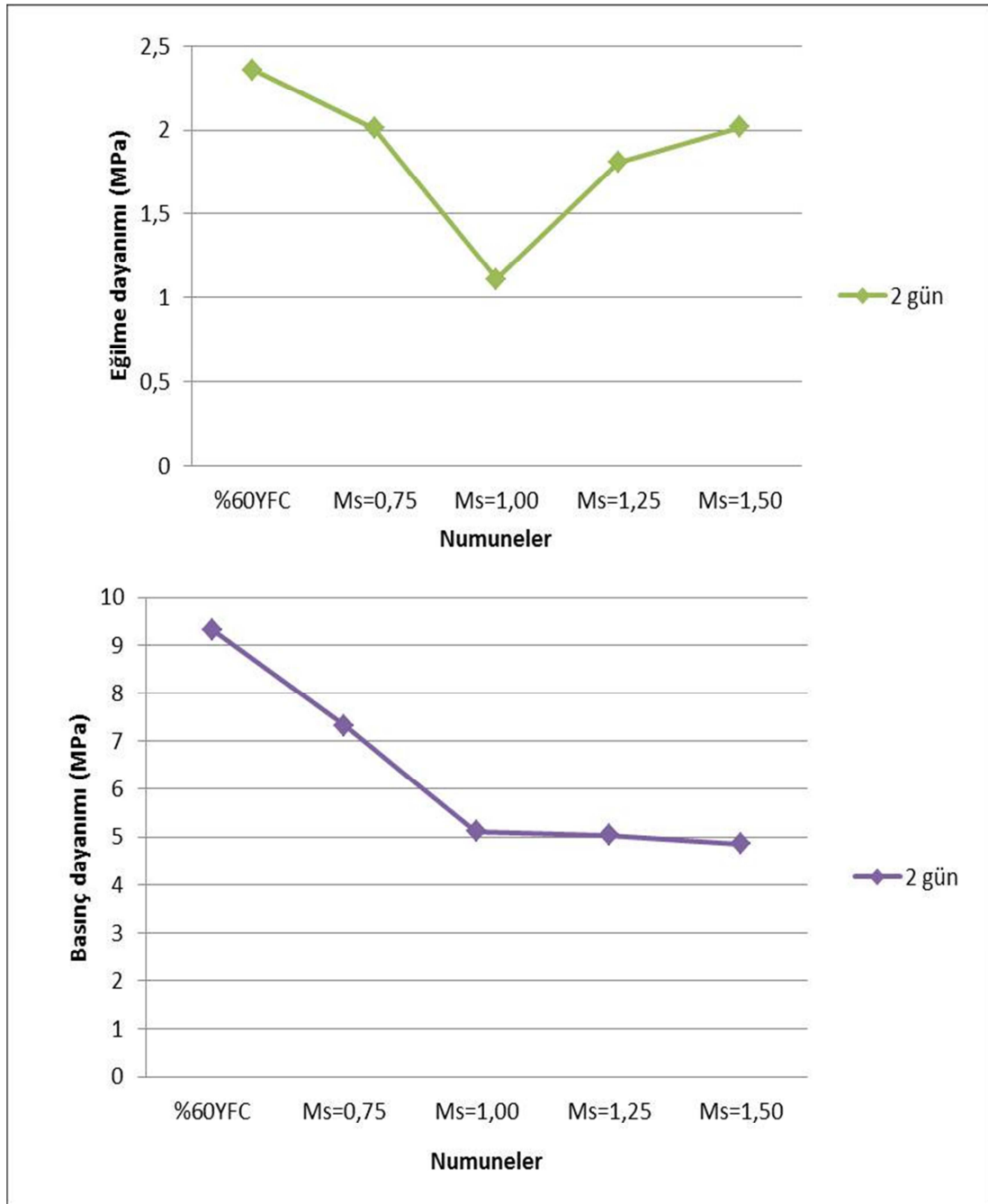
**Referans numunelerin değerlerini 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

2 günlük değerlerde, Şekil 3.23’deki grafikte en düşük eğilme dayanımı M_S=1.00 olan numunede, M_S=1.25 ve 1.50 olan numunelerde ise bir artış gözlenmiş ancak

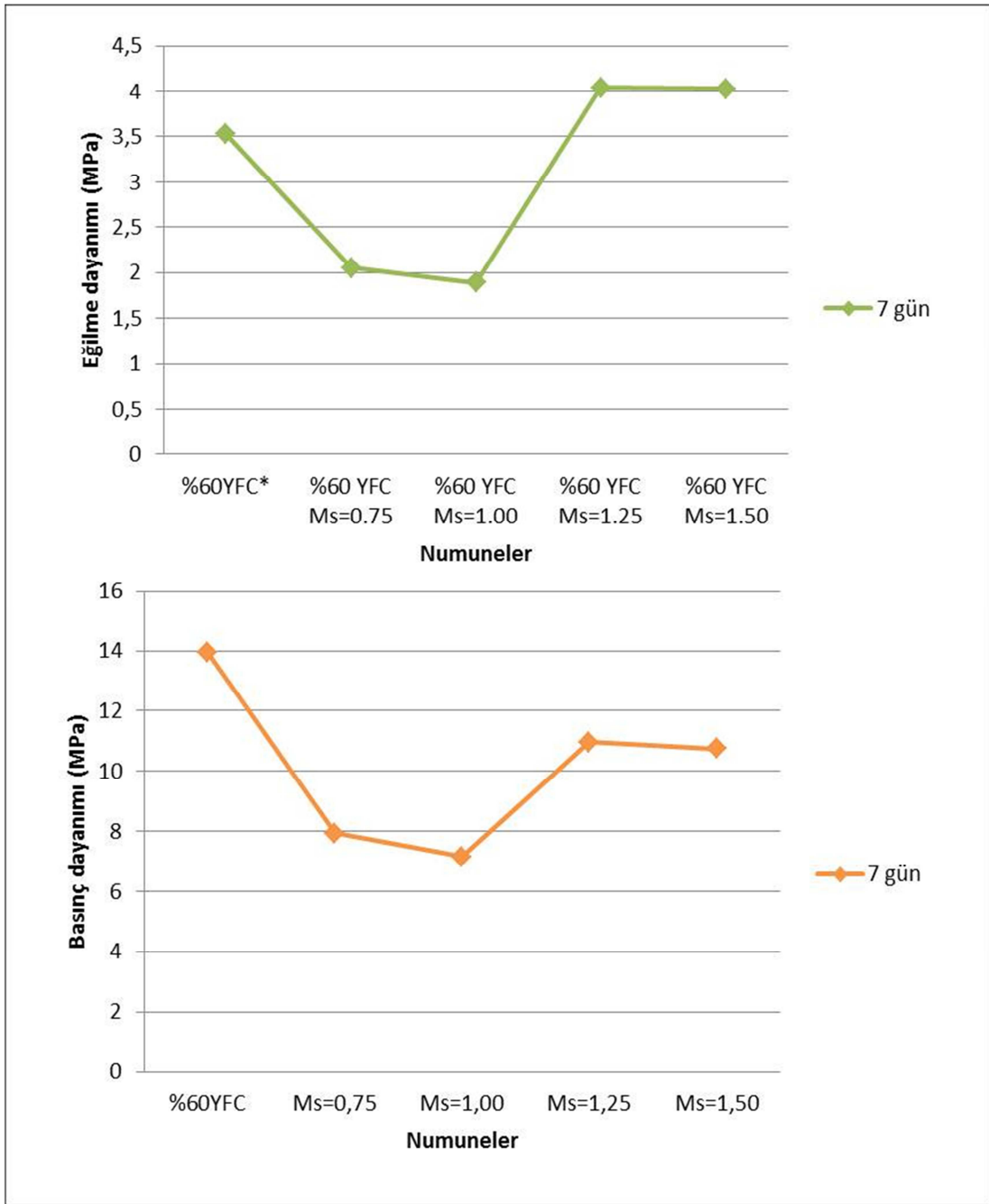
%60 YFC olan şahit numuneyi yakalayamamıştır. Basınç dayanımı grafiğinde ise $M_s=1.00$, 1.25 ve 1.50 olan değerlerde de lineer bir düşüş gözlenmiştir.

7 günlük değerlerde, Şekil 3.24'deki grafikte en düşük eğilme dayanımını $M_s=1.00$ olan numunede, $M_s=1.25$ olan numunede ise ani bir artış oluşmuş $M_s=1.50$ olan numune ise neredeyse $M_s=1.25$ olan numune ile aynı değerlerde kalmıştır. Basınç dayanımı grafiğinde ise eğilme dayanımı grafiğindeki gibi benzer sonuçlar elde edilmiştir.

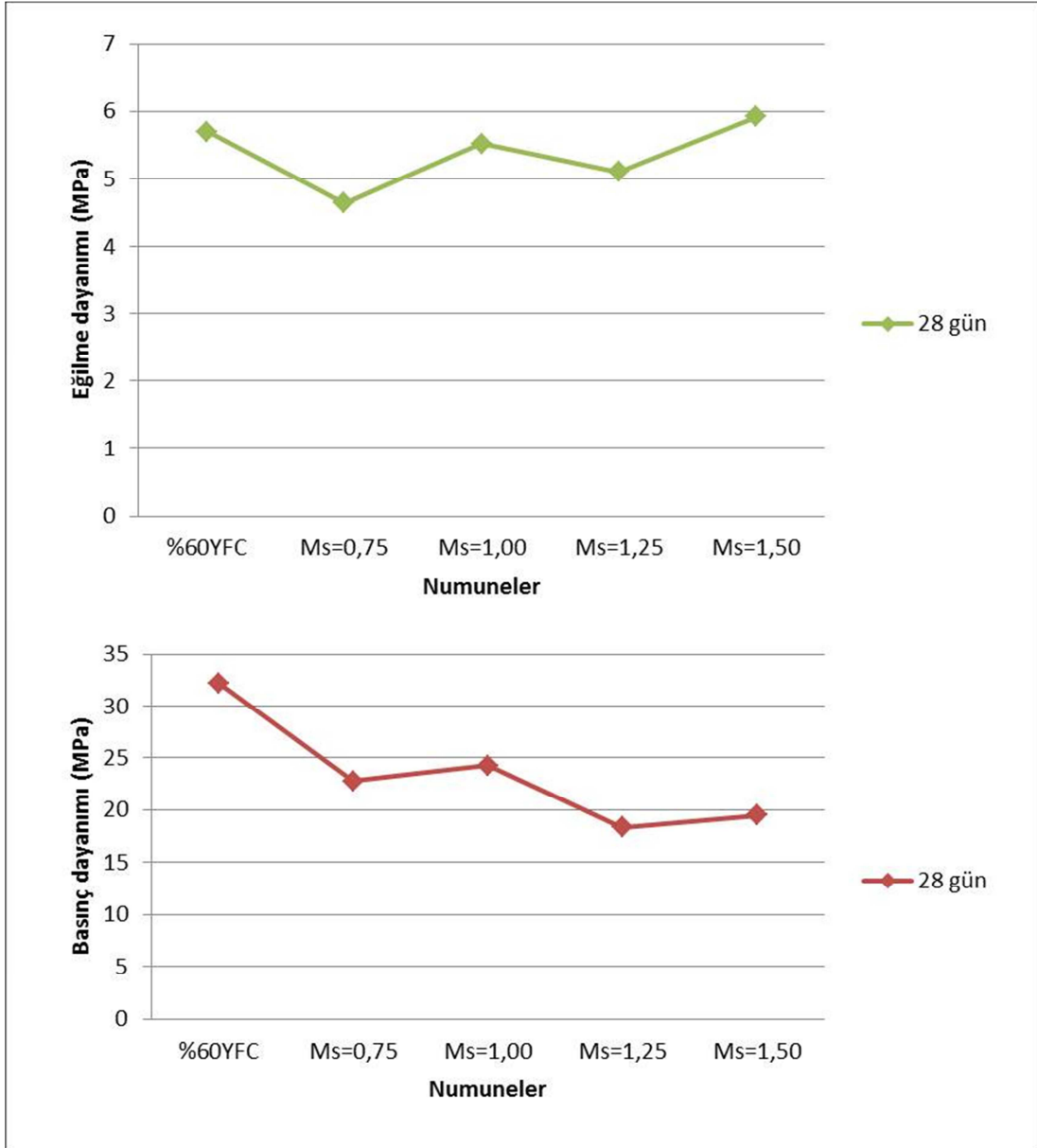
28 günlük değerlerde, Şekil 3.25'deki grafikte en yüksek eğilme dayanımını $M_s=1.50$ olan numuneden elde edilmiştir. Elde edilen bu değer %60 YFC olan şahit numunenin biraz üzerinde bir değer yakalamıştır. Basınç dayanımı grafiğinde ise elde edilen bütün değerler %60 YFC olan şahit numuneyi yakalayamamış bilakis lineer bir düşüş gözlenmiştir.



Şekil 3.23. %4 Na₂O oranlı, AAYFC içerikli numunelerin 2 günlük eğilme ve basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

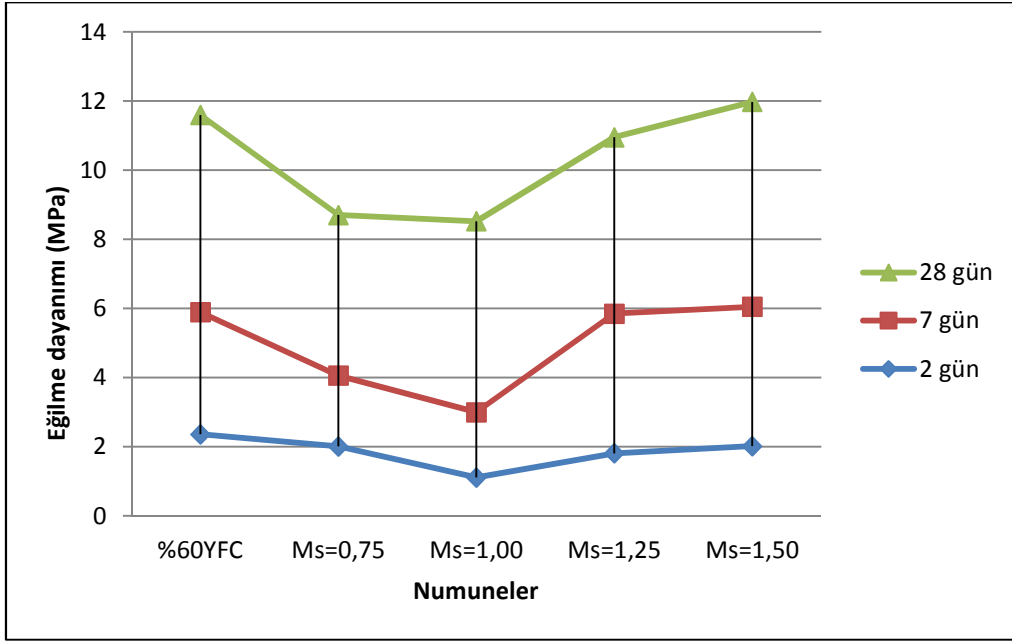


Şekil 3.24. %4 Na₂O oranlı, AAYFC içerikli numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

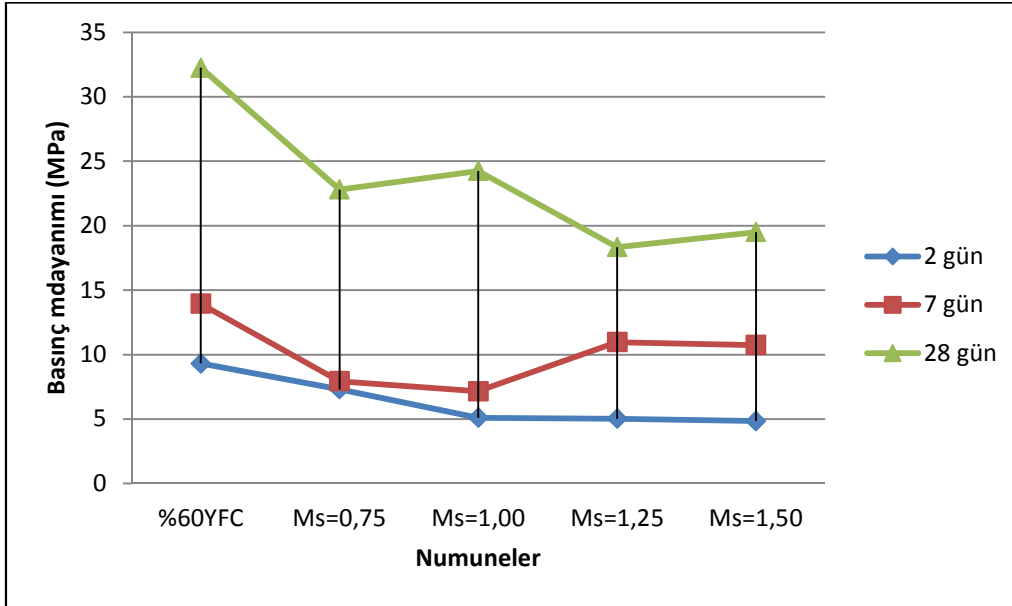


Şekil 3.25. %4 Na₂O oranlı, AAYFC içerikli numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

Şekil 3.26 ve 3.27’de ise 28 günlük değerlerden elde edilen sonuçları irdelemek gerekirse %4 Na₂O içeriğinin, %60 YFC olan şahit numuneyi gerek eğilme gerekse basınç dayanım değerleri yakalayamamıştır.



Şekil 3.26. %4 Na₂O oranlı, AAYFC içerikli numunelerin numunelerde 2, 7 ve 28 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.27. %4 Na₂O oranlı, AAYFC içerikli numunelerin numunelerde 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)

3.5.3. Belirli sodyum oksit oranlarındaki (%4 Na₂O) harç karışımları

%4 Na₂O oranındaki numunelerin karışım miktarları Tablo 3.20’de verilmektedir. 7, 28 ve 90 günlük dayanım değerlerinin şahit numunelerle (%60, 80, 90 ve 100 YFC oranlarında) kıyaslanarak incelenmiştir.

Tablo 3.20. %4 Na₂O oranındaki harçların karışım miktarları (g)

Numune (%4 Na ₂ O)	Standart kum	CEM I	YFC	Su	Na ₂ SiO ₃	NaOH
%60YFC*	1350	180	270	225.00	-	-
%60 M _S =0.75		180	270	212.31	19.85	11.67
%60 M _S =1.00		180	270	205.96	29.78	10.53
%80YFC*		90	270	225.00	-	-
%80 M _S =0.75		90	270	208.07	26.47	15.55
%80 M _S =1.00		90	270	199.61	39.71	14.04
%90YFC*		45	360	225.00	-	-
%90 M _S =0.75		45	360	205.96	29.78	17.50
%90 M _S =1.00		45	360	196.44	44.67	15.80
%100 YFC*		Numune elde edilemedi				
%100YFC M _S =0.75		Numune elde edilemedi				
%100YFC M _S =1.00		Numune elde edilemedi				

*=Referans numuneler

%100 YFC içerikli harçlarda alkali içermemesi ve çimento gibi bir bağlayıcı kullanılmadığı için numune kalıp süresinin sonunda priz almadığı görülmüştür. %100 YFC M_S=0.50 ve 0.75 alkali içerikli numunelerde ise alkali kullanılmasının da bağlayıcılık özelliğine olumlu bir katkısının olmadığı anlaşılmıştır.

Tablo 3.21’de %4 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin %80 YFC M_S=0.75 ve M_S=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %31 ve %42 oranlarında, 28 günlük

değerler ise sırasıyla %39 ve %26 oranlarında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %21 ve %9 oranlarında azalmıştır.

Tablo 3.21'de %4 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin, %90 YFC M_s=0.75 ve M_s=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %90 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %125 ve %150 oranlarında, 28 günlük değerler ise sırasıyla %3 ve %5 oranlarında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %11 oranında düşmüş ve %4 oranında artış sağlamıştır.

Tablo 3.21. %4 Na₂O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

Numune (%4 Na ₂ O)	7 Gün	Bağlı değer **	28 Gün	Bağlı değer **	90 Gün	Bağlı değer **
%60YFC*	3.53	1.00	5.70	1.00	7.28	1.00
%60 M _s =0.75	2.05	0.58	4.64	0.81	5.07	0.70
%60 M _s =1.00	1.89	0.54	5.52	0.97	4.21	0.58
%80YFC*	3.06	1.00	4.58	1.00	7.44	1.00
%80 M _s =0.75	4.02	1.31	6.38	1.39	5.87	0.79
%80 M _s =1.00	4.33	1.42	5.75	1.26	6.74	0.91
%90YFC*	1.81	1.00	5.26	1.00	5.46	1.00
%90 M _s =0.75	4.07	2.25	5.42	1.03	4.86	0.89
%90 M _s =1.00	4.52	2.50	5.52	1.05	5.66	1.04

* Referans numuneler

** Referans numunelerin değerlerini 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

Tablo 3.22'de %4 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin %80 YFC M_s=0.75 ve M_s=1.00 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %9 ve %7 oranlarında azalmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %27 ve %10 oranlarında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %40 ve %28 oranlarında azalmıştır.

Tablo 3.22’de %90 YFC $M_s=0.75$ ve $M_s=1.00$ olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %90 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %38 ve %130 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %8 ve %16 oranlarında azalmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %24 oranında düşmüş ve %10 oranında artış sağlamıştır.

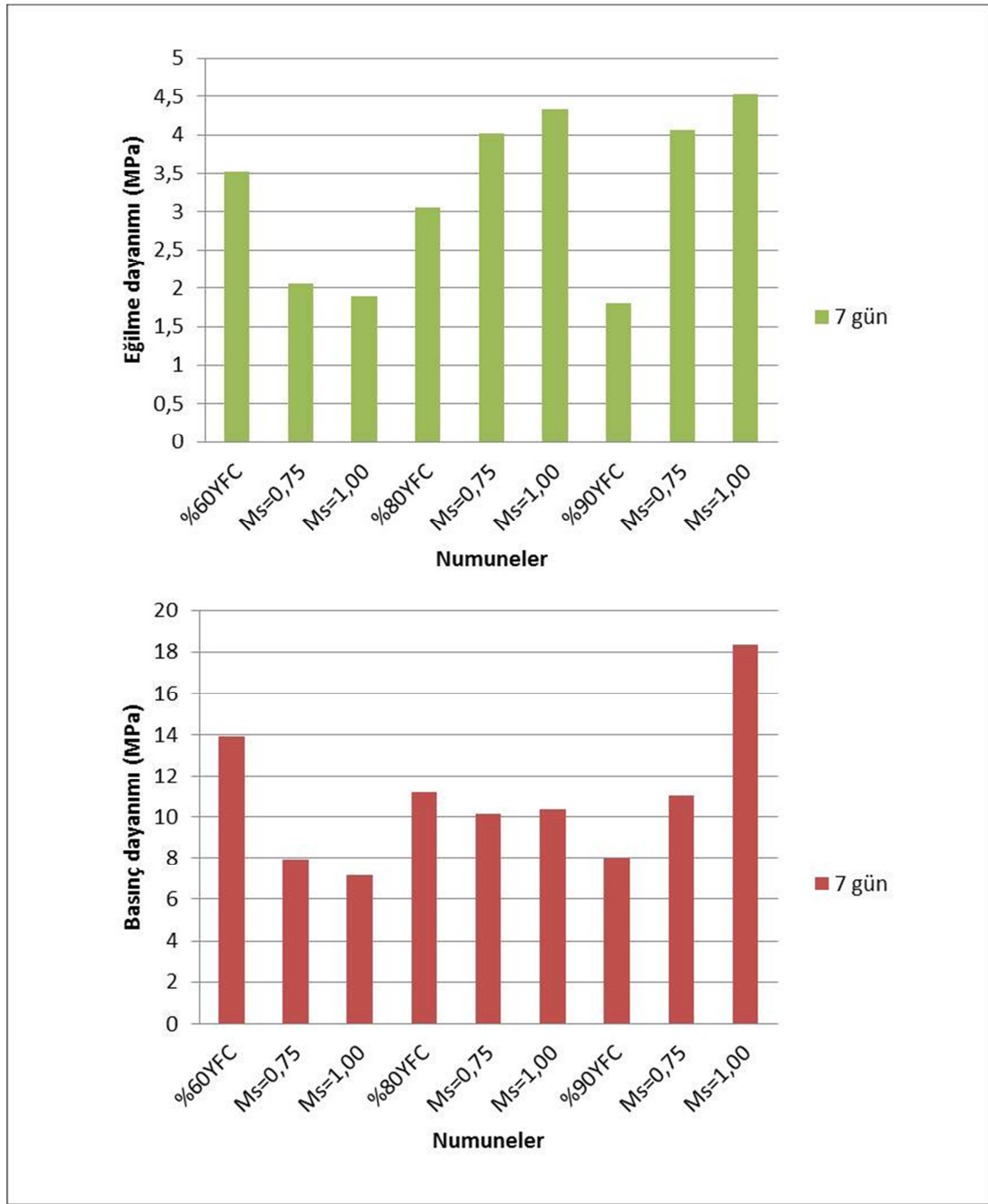
Tablo 3.22. %4 Na_2O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

Numune (%4 Na_2O)	7 Gün	Bağlı değer **	28 Gün	Bağlı değer **	90 Gün	Bağlı değer **
%60YFC*	13.94	1.00	32.25	1.00	40.70	1.00
%60 $M_s=0.75$	7.93	0.57	22.80	0.71	17.09	0.42
%60 $M_s=1.00$	7.15	0.51	24.25	0.75	15.71	0.39
%80YFC*	11.20	1.00	17.88	1.00	32.05	1.00
%80 $M_s=0.75$	10.15	0.91	22.65	1.27	19.35	0.60
%80 $M_s=1.00$	10.36	0.93	19.70	1.10	23.20	0.72
%90YFC*	7.99	1.00	22.90	1.00	24.00	1.00
%90 $M_s=0.75$	11.03	1.38	21.00	0.92	18.34	0.76
%90 $M_s=1.00$	18.35	2.30	19.35	0.84	26.50	1.10

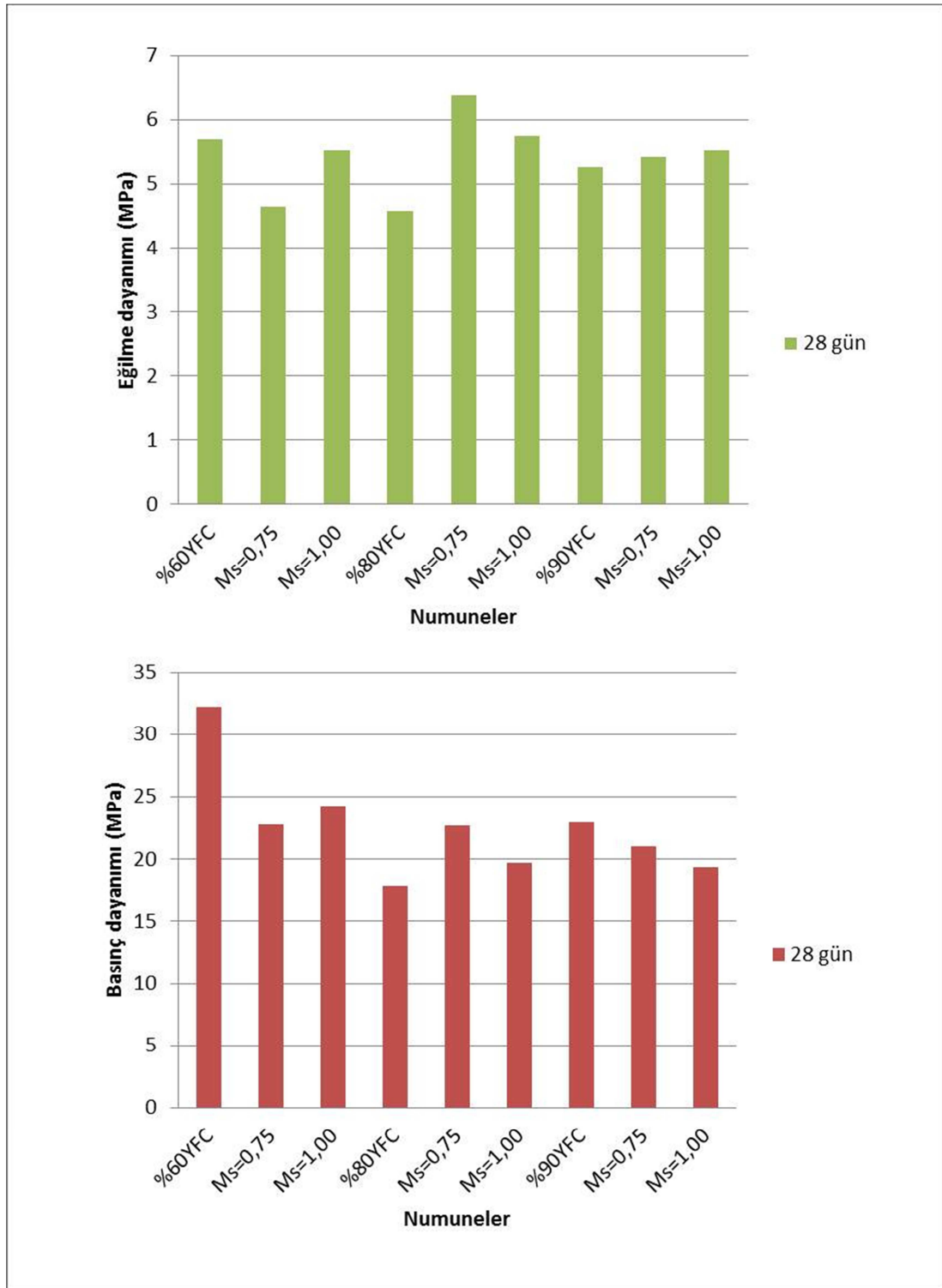
* Referans numuneler

**Referans numunelerin değerlerini 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

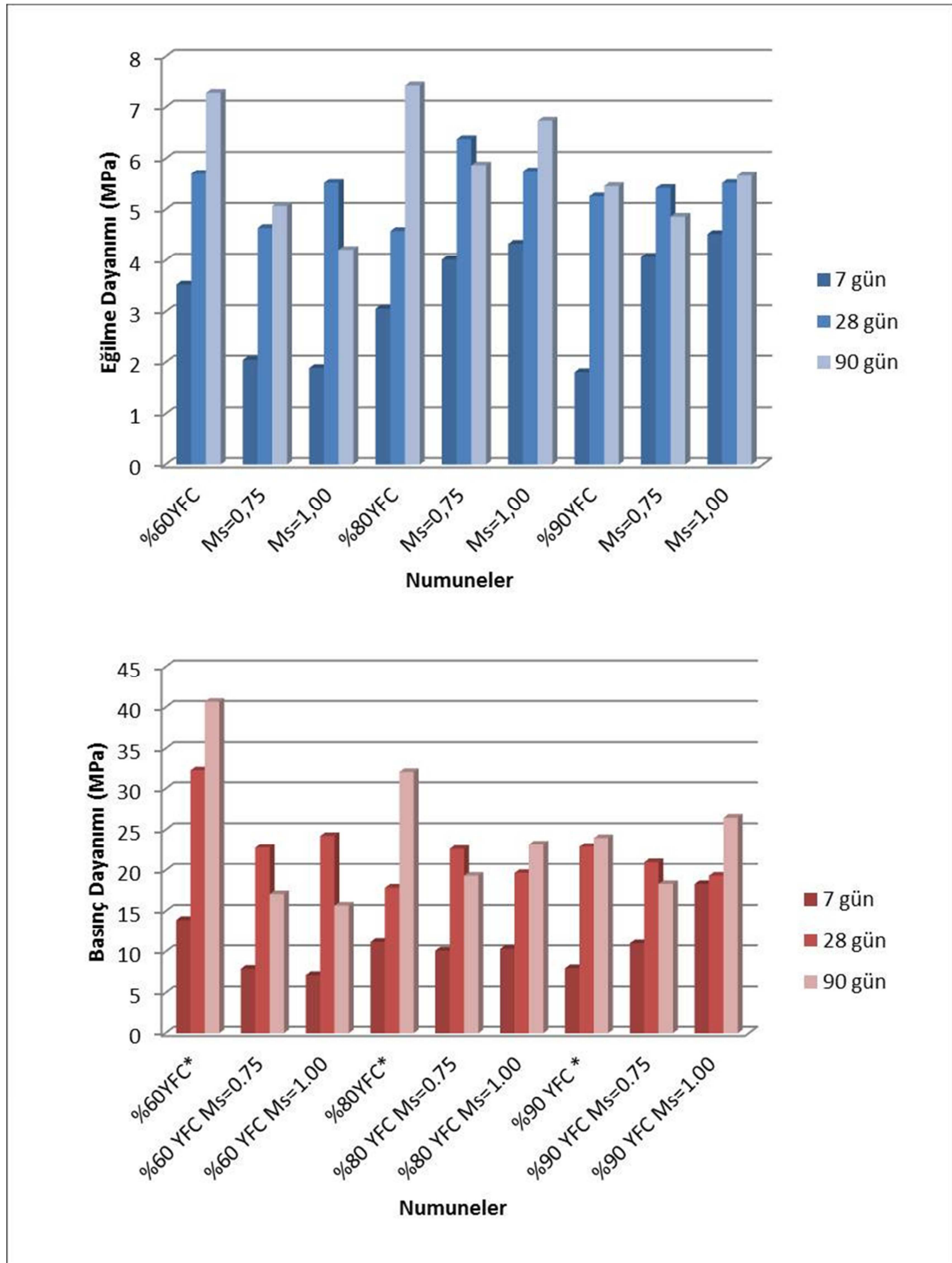
Şekil 3.28’de 7 günlük en yüksek elde edilen eğilme ve basınç dayanım değerleri %90 YFC $M_s=1.00$ olan numunelerden elde edilmiştir. Şekil 3.29’da 28 günlük eğilme dayanım değerlerinde 80 YFC $M_s=0.75$ olan numunelerden elde edilmiştir. Basınç dayanım değerlerinde ise %60 YFC olan şahit numuneyi hiçbiri yakalayamamıştır.



Şekil 3.28. %4 Na₂O içerikli numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.29. %4 Na₂O içerikli numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.30. %4 Na₂O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri

Ancak bu çalışmada %4 Na₂O oranının cürufun aktivesinde yetersiz olduğu anlaşılmaktadır. Bu noktadan sonra Na₂O oranları artırılarak optimum oran yakalanmaya çalışılmıştır (Şekil 3.30).

3.5.4. Belirli sodyum oksit oranlarındaki (%6 Na₂O) harç karışımları

%6 Na₂O oranındaki numunelerin karışım miktarları Tablo 3.2.3’de verilmektedir. 7, 28, 90 günlük dayanım değerlerinin şahit numunelerle (%40, 60 ve 80 YFC oranlarında) kıyaslanarak incelenmiştir.

Tablo 3.23. %6 Na₂O oranındaki harçların karışım miktarları (g)

Numune (%6 Na ₂ O)	Standart kum	CEM I	YFC	Su	Na ₂ SiO ₃	NaOH
%40YFC*	1350	270	180	225.00	-	-
%40 M _S =0.50		270	180	212.31	19.85	11.67
%40 M _S =0.75		270	180	205.96	29.78	10.53
%40 M _S =1.00		270	180	199.61	39.71	9.40
%60YFC*		180	270	225.00	-	-
%60 M _S =0.50		180	270	205.96	29.78	17.50
%60 M _S =0.75		180	270	196.44	44.67	15.80
%60 M _S =1.00		180	270	186.92	59.56	14.09
%80YFC*		90	360	225.00	-	-
%80 M _S =0.50		90	360	199.61	39.71	23.33
%80 M _S =0.75		90	360	186.92	59.56	21.06
%80 M _S =1.00		90	360	174.22	79.41	18.79

*=Referans numuneler

Tablo 3.24’ de %6 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin %40 YFC M_S=0.5, M_S=0.75 ve M_S=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %40 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %27, %36 ve %11 oranlarında, 28 günlük değerler ise sırasıyla %11, %8 ve %18 oranlarında, 90 günlük değerler ise sırasıyla %22, %20 ve %29 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.24’ de %6 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin, %60 YFC M_S=0.5, M_S=0.75 ve M_S=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %7 oranında artmış, %23 ve %40

oranlarında azalmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %10, %1 ve %4 oranlarında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %12, %13 ve %1 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.24' de %6 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin, %80 YFC Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %51, %67 ve %94 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %13, %43 ve %37 oranlarında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %31, %16 ve %5 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.24. %6 Na₂O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

Numune (%6 Na ₂ O)	7 Gün	Bağlı değer **	28 Gün	Bağlı değer **	90 Gün	Bağlı değer **
%40YFC*	4.86	1.00	5.93	1.00	7.73	1.00
%40 M _S =0.50	3.57	0.73	5.30	0.89	6.06	0.78
%40 M _S =0.75	3.13	0.64	5.48	0.92	6.22	0.80
%40 M _S =1.00	4.33	0.89	4.84	0.82	5.45	0.71
%60YFC*	3.53	1.00	5.70	1.00	7.28	1.00
%60 M _S =0.50	3.77	1.07	6.28	1.10	6.38	0.88
%60 M _S =0.75	2.72	0.77	5.74	1.01	6.33	0.87
%60 M _S =1.00	2.12	0.60	5.95	1.04	7.23	0.99
%80YFC*	3.06	1.00	4.58	1.00	7.44	1.00
%80 M _S =0.50	4.63	1.51	5.17	1.13	5.13	0.69
%80 M _S =0.75	5.11	1.67	6.55	1.43	6.22	0.84
%80 M _S =1.00	5.94	1.94	6.27	1.37	7.08	0.95

* Referans numuneler

**Referans numunelerin değerlerini 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

Tablo 3.25' de %6 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin, %40 YFC Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %40 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %48, %54 ve %51

oranlarında, 28 günlük değerler ise sırasıyla %43, %40 ve %45 oranlarında, 90 günlük değerler ise sırasıyla %46, %44 ve %45 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.25' de %6 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin, %60 YFC Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %23, %19 ve %33 oranlarında azalmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %20, %27 ve %21 oranlarında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %16, %21 ve %14 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.25' de %6 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin, %80 YFC Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %22, %38 ve %66 oranlarında artmış, , 28 günlük değerler ise sırasıyla %8, %24 ve %55 oranlarında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %20, %6 oranlarında düşmüş, %15 oranında artış göstermiştir.

%6 Na₂O içerikli numunelerde 7 günlük dayanım değerleri YFC oranı arttıkça alkalinlerin aktivasyon etkisi artmış ve referans (%40 YFC referans numunesi hariç) numunelerden de daha iyi neticeler vermiştir.

Tablo 3.25. %6 Na₂O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

Numune (%6 Na ₂ O)	7 Gün	Bağlı değer **	28 Gün	Bağlı değer **	90 Gün	Bağlı değer **
%40YFC*	21.50	1.00	35.50	1.00	48.15	1.00
%40 M _S =0.50	11.08	0.52	20.25	0.57	26.20	0.54
%40 M _S =0.75	9.80	0.46	21.40	0.60	27.05	0.56
%40 M _S =1.00	10.47	0.49	19.70	0.55	26.35	0.55
%60YFC*	13.94	1.00	32.25	1.00	40.70	1.00
%60 M _S =0.50	10.74	0.77	25.70	0.80	34.25	0.84
%60 M _S =0.75	11.27	0.81	23.70	0.73	32.00	0.79

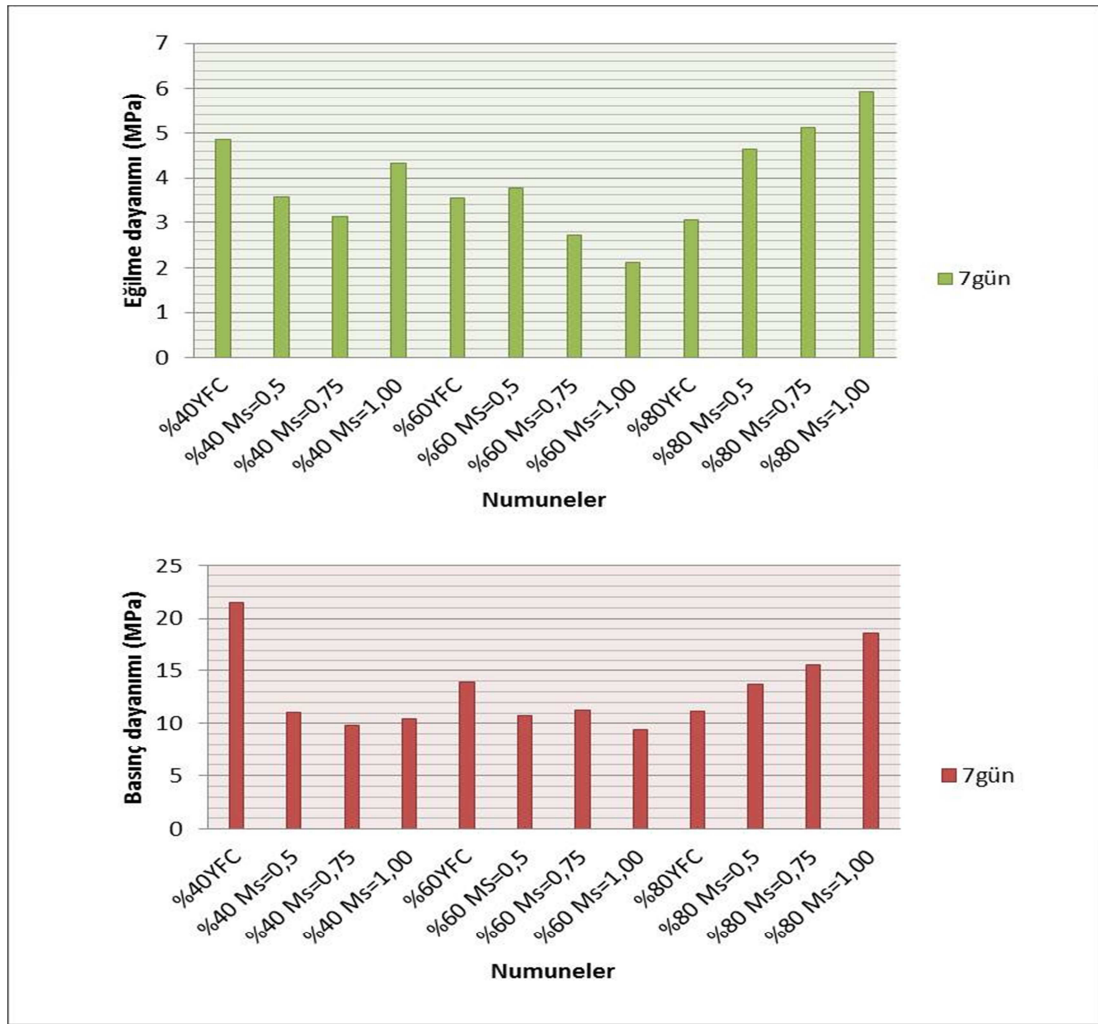
Tablo 3.25. %6 Na₂O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)'nın (devamı)

%60 M _S =1.00	9.40	0.67	25.35	0.79	35.10	0.86
%80YFC*	11.20	1.00	17.88	1.00	32.05	1.00
%80 M _S =0.50	13.68	1.22	19.25	1.08	25.65	0.80
%80 M _S =0.75	15.51	1.38	22.25	1.24	30.20	0.94
%80 M _S =1.00	18.62	1.66	27.80	1.55	36.90	1.15

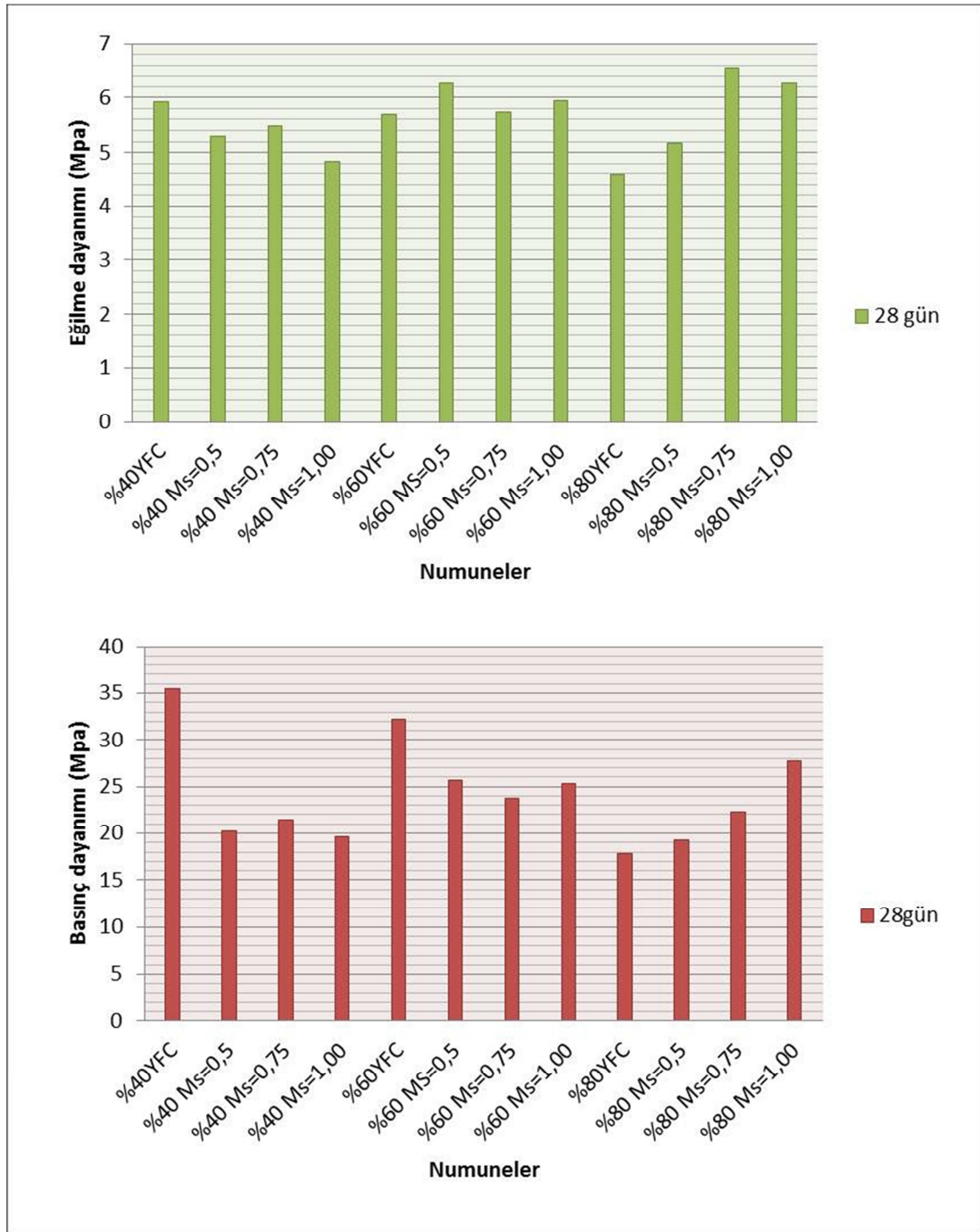
* Referans numuneler

**Referans numunelerin değerlerini 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

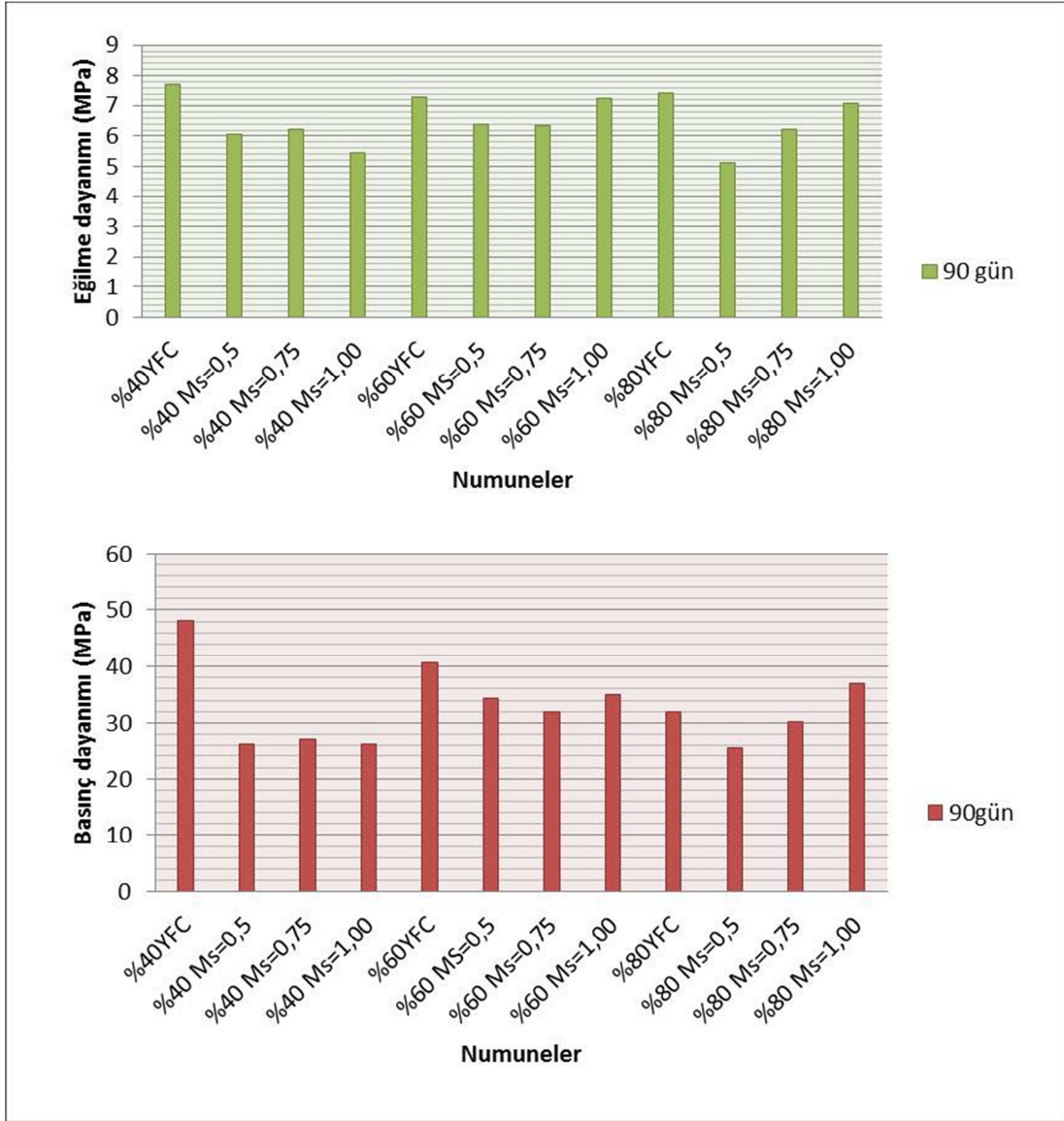
Şekil 3.31'de 7 günlük elde edilen en yüksek eğilme dayanım değerini %80 YFC M_S=1.00 olan numune vermiştir. Basınç dayanım değerlerinden elde edilen bütün numuneler %40 YFC olan şahit numunenin altında kalmıştır. 28 ve 90 günlük değerler içinde aynı durum söz konusu olmuştur (Şekil 3.32 ve Şekil 3.33).



Şekil 3.31. %6 Na₂O içerikli numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)

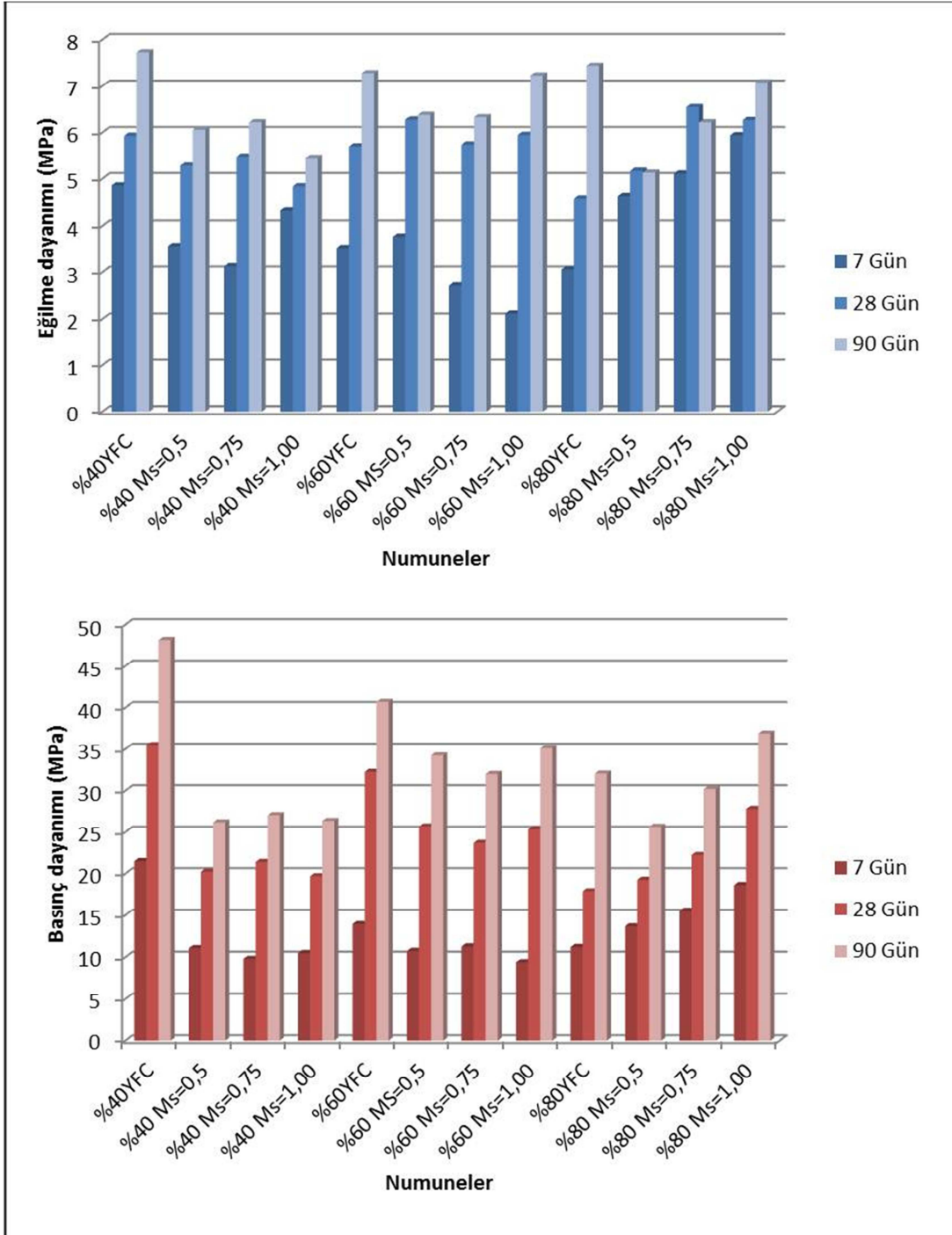


Şekil 3.32. %6 Na₂O içerikli numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri



Şekil 3.33. %6 Na₂O içerikli numunelerin 90 günlük basınç dayanım değerleri

Şekil 3.34’de 90 günlük dayanım değerlerinden çok iyi sonuçlar elde edilememiş, %40, 60 ve 80 YFC referans numunelerinin değerlerini geçememiştir. Silikat modülünün fazla olması basınç dayanım değerini artırmıştır. Ancak silikat modüllerinin değerini artırmak ani prize yol açmış ve buna bağlı olarak harcın işlenebilirliğini düşürmüştür.



Şekil 3.34. %6 Na₂O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri

3.5.5. Belirli sodyum oksit oranlarındaki (%7 Na₂O) harç karışımları

%7 Na₂O oranındaki numunelerin karışım miktarları ve 7, 28 ve 90 günlük dayanım değerlerinin şahit numunelerle (%40, 60 ve 80 YFC oranlarında) kıyaslanarak incelenmiştir.

Tablo 3.26. %7 Na₂O oranındaki harçların karışım miktarları (g)

Numune (%7 Na ₂ O)	Standart kum	CEM I	YFC	Su	Na ₂ SiO ₃	NaOH
%40YFC*	1350	270	180	225.00	-	-
%40 M _S =0.50		270	180	210.19	23.16	13.61
%40 M _S =0.75		270	180	202.79	34.74	12.29
%40 M _S =1.00		270	180	195.38	46.32	10.96
%60YFC*		180	270	225.00	-	-
%60 M _S =0.50		180	270	202.79	34.74	20.42
%60 M _S =0.75		180	270	191.68	52.11	18.43
%60 M _S =1.00		180	270	180.57	69.48	16.44
%80YFC*		90	360	225.00	-	-
%80 M _S =0.50		90	360	195.38	46.32	27.22
%80 M _S =0.75		90	360	180.57	69.48	24.57
%80 M _S =1.00		90	360	165.76	92.65	21.92

*Referans numuneler

Tablo 3.27' de %7 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin %40 YFC M_S=0.5, M_S=0.75 ve M_S=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %40 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %15, %32 ve %41 oranlarında, 28 günlük değerler ise sırasıyla %7 oranında artmış, %3 ve %11 oranlarında, 90 günlük değerler ise sırasıyla %17, %9 ve %12 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.27' de %7 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin, %60 YFC M_S=0.5, M_S=0.75 ve M_S=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %24, %25 ve %34 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %34, %5 ve %11 oranlarında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %1 oranında azalmış, %7 oranında artmış ve %11 oranında azalmıştır.

Tablo 3.27' de %7 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin, %80 YFC M_S=0.5, M_S=0.75 ve M_S=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %56, %83 ve %134 oranlarında artmış,

28 günlük değerler ise sırasıyla %24, %50 ve %57 oranlarında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %17, %19 ve %6 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.27. %7 Na₂O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

Numune (%7 Na ₂ O)	7 Gün	Bağlı değer**	28 Gün	Bağlı değer**	90 Gün	Bağlı değer**
%40YFC*	4.86	1.00	5.93	1.00	7.73	1.00
%40 M _S =0.50	4.14	0.85	6.35	1.07	6.44	0.83
%40 M _S =0.75	3.29	0.68	5.75	0.97	7.07	0.91
%40 M _S =1.00	2.89	0.59	5.27	0.89	6.84	0.88
%60YFC*	3.53	1.00	5.70	1.00	7.28	1.00
%60 M _S =0.50	4.37	1.24	7.64	1.34	7.24	0.99
%60 M _S =0.75	4.41	1.25	5.96	1.05	7.76	1.07
%60 M _S =1.00	4.72	1.34	6.33	1.11	6.47	0.89
%80YFC*	3.06	1.00	4.58	1.00	7.44	1.00
%80 M _S =0.50	4.76	1.56	5.69	1.24	6.21	0.83
%80 M _S =0.75	5.61	1.83	6.86	1.50	5.99	0.81
%80 M _S =1.00	7.15	2.34	7.17	1.57	6.97	0.94

* Referans numuneler.

**Referans numuneleri 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

Tablo 3.28. %7 Na₂O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması

Numune (%7 Na ₂ O)	7 Gün	Bağlı değer **	28 Gün	Bağlı değer **	90 Gün	Bağlı değer **
%40YFC*	21.50	1.00	35.50	1.00	48.15	1.00
%40 M _S =0.50	12.22	0.57	22.00	0.62	27.60	0.57
%40 M _S =0.75	14.27	0.66	24.80	0.70	31.20	0.65
%40 M _S =1.00	11.23	0.52	20.70	0.58	27.80	0.58
%60YFC*	13.94	1.00	32.25	1.00	40.70	1.00
%60 M _S =0.50	13.45	0.96	28.35	0.88	38.30	0.94
%60 M _S =0.75	13.94	1.00	25.20	0.78	38.40	0.94

Tablo 3.28. %7 Na₂O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması'nın (devamı)

%60 M _s =1.00	16.09	1.15	25.05	0.78	38.90	0.96
%80YFC*	11.20	1.00	17.88	1.00	32.05	1.00
%80 M _s =0.50	14.74	1.32	22.75	1.27	28.80	0.90
%80 M _s =0.75	19.35	1.73	29.50	1.65	35.40	1.10
%80 M _s =1.00	34.25	3.06	49.00	2.74	54.90	1.71

* Referans numuneler.

**Referans numuneleri 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

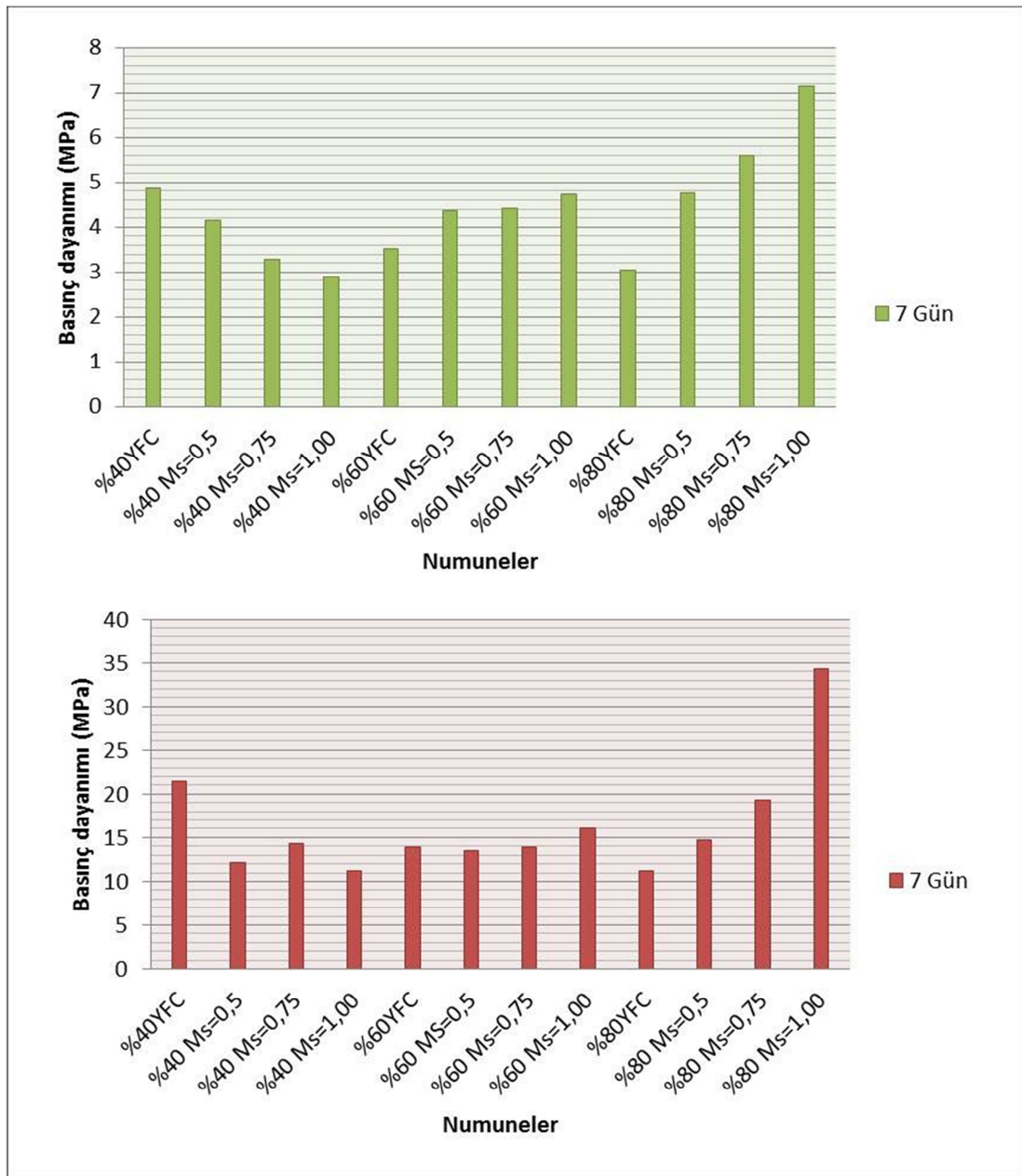
Tablo 3.28' de %7 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin %40 YFC M_s=0.5, M_s=0.75 ve M_s=1.00 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %40 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %43, %34 ve %48 oranlarında, 28 günlük değerler ise sırasıyla %38, %30 ve %42 oranlarında, 90 günlük değerler ise sırasıyla %43, %35 ve %42 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.28' de %7 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin, %60 YFC M_s=0.5, M_s=0.75 ve M_s=1.00 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %4 oranında azalmış, referans numunesi ile aynı değerde çıkmış ve %15 oranında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %12, %22 ve %22 oranlarında, 90 günlük değerler ise sırasıyla %6, %6 ve %4 oranlarında azalmıştır.

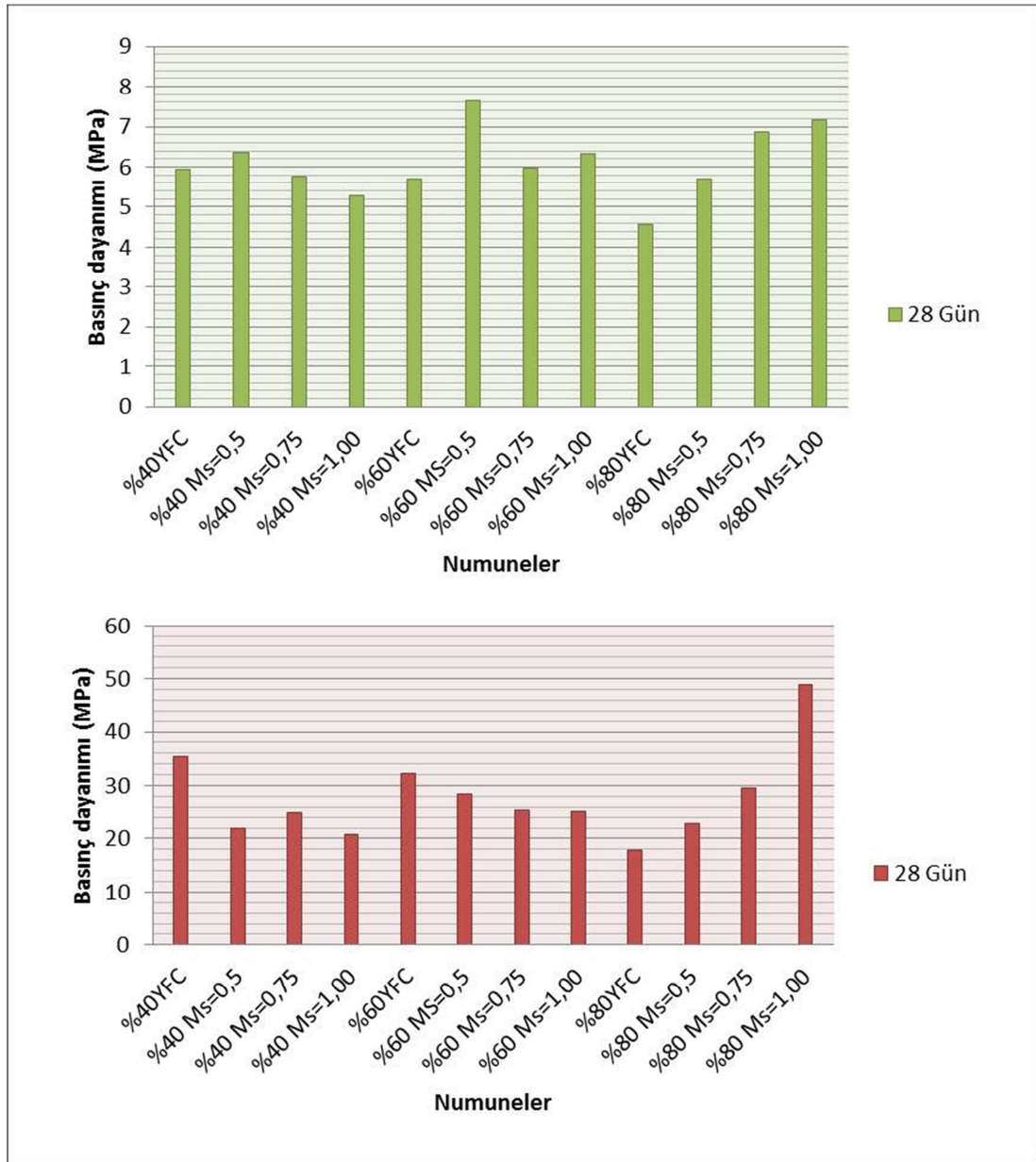
Tablo 3.28' de %7 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin, %80 YFC M_s=0.5, M_s=0.75 ve M_s=1.00 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %32, %73 ve %206 oranlarında, 28 günlük değerler ise sırasıyla %27, %65 ve %174 oranlarında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %10 oranında azalmış, %10 ve %71 oranlarında artmıştır.

%7 Na₂O içerikli numunelerin 28 günlüklerinde ise %80 YFC M_s=1.00 olan numunelerin hem basınç hem eğilme dayanım değerleri diğer numunelerden yüksek çıkmıştır. %60 M_s=0.50 olan numunenin eğilme dayanımı değerleri ise diğer bütün numunelerden daha iyi çıkmıştır. Ancak %6 ve 7 Na₂O değerleri tam bir istikrar sağlayamamıştır. Alkalilerin aktivasyonunda bu oranlar istenilen sonucu tam anlamıyla verememiştir. Bu durumda kullanılan alkali oranını artırmaya gidilir.

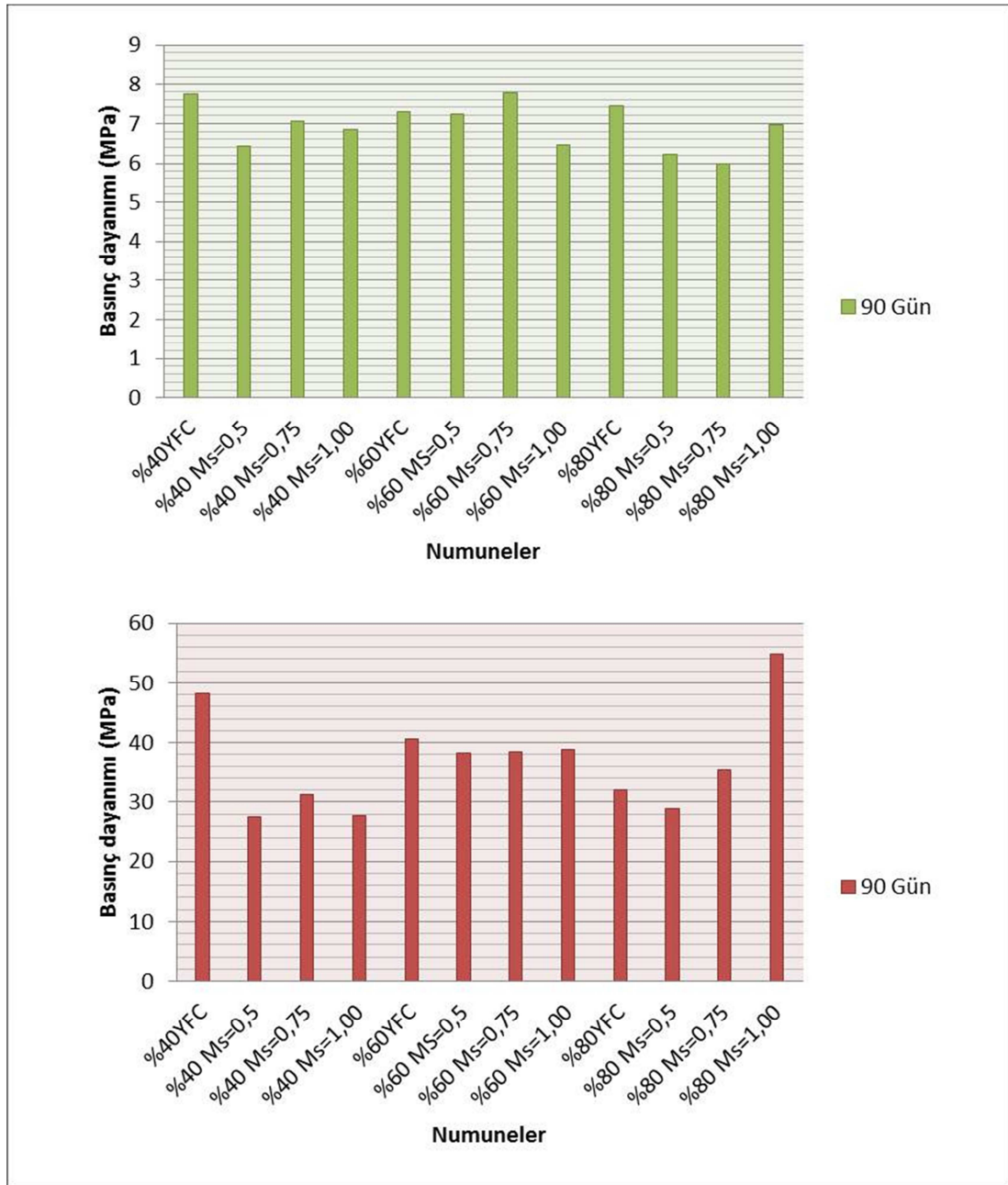
Şekil 3.35’de 7 günlük en yüksek eğilme ve basınç dayanım değerlerini %80 YFC $M_S=1.00$ olan numuneler sağlamaktadır. Şekil 3.36’da 28 günlük en yüksek eğilme dayanım değerini %60 YFC $M_S=0.5$ olan numuneler, basınç dayanım değerini ise %80 YFC $M_S=1.00$ olan numuneler sağlamaktadır. Şekil 3.37’de 90 günlük eğilme ve basınç dayanım değerlerinde ise benzer grafikler elde edilmiştir. Şekil 3.38’de en yüksek elde edilen basınç dayanım değerleri ise %80 YFC $M_S=1.00$ olan numuneler sağlamaktadır.



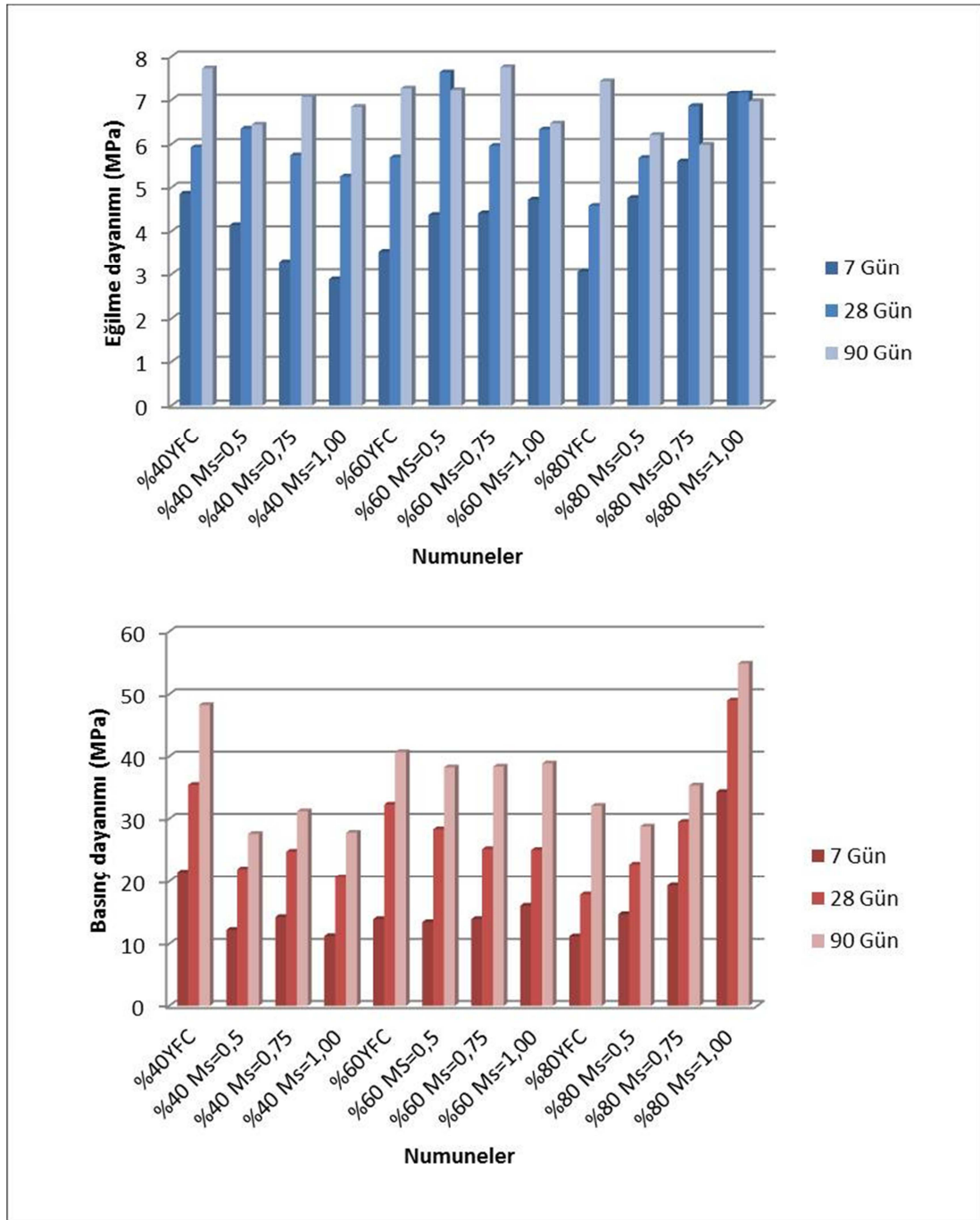
Şekil 3.35. %7 Na_2O içerikli numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.36. %7 Na₂O içerikli numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.37. %7 Na₂O içerikli numunelerin 90 günlük basınç dayanım değerleri



Şekil 3.38. %7 Na₂O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)

3.5.6. Belirli sodyum oksit oranlarındaki (%8 Na₂O) harç karışımları

%8 Na₂O oranındaki numunelerin karışım miktarları Tablo 3.29’da verilmektedir. 7, 28 ve 90 günlük dayanım değerlerinin şahit numunelerle (%40, 60 ve 80 YFC oranlarında) kıyaslanarak incelenmiştir.

Tablo 3.29. %8 Na₂O oranındaki harçların karışım miktarları (g)

Numune (%8 Na ₂ O)	Standart kum (g)	CEM I	YFC	Su	Na ₂ SiO ₃	NaOH
%40YFC*	1350	270	180	225.00	-	-
%40 M _S =0.50		270	180	208.07	26.47	15.55
%40 M _S =0.75		270	180	199.61	39.71	14.04
%40 M _S =1.00		270	180	191.15	52.94	12.53
%60YFC*		180	270	225.00	-	-
%60 M _S =0.50		180	270	199.61	39.71	23.33
%60 M _S =0.75		180	270	186.92	59.56	21.06
%60 M _S =1.00		180	270	174.22	79.41	18.79
%80YFC*		90	360	225.00	-	-
%80 M _S =0.50		90	360	191.15	52.94	31.11
%80 M _S =0.75		90	360	174.22	79.41	28.08
%80 M _S =1.00		90	360	157.30	105.88	25.06

*=Referans numuneler

Tablo 3.30’ da %8 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin %40 YFC M_S=0.5, M_S=0.75 ve M_S=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %40 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %5, %10 ve %30 oranlarında azalmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %8 oranında artmış, %12 ve %21 oranlarında azalmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %18, %18 ve %30 oranlarında azalmıştır.

Tablo 3.30’ da %8 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin, %60 YFC M_S=0.5, M_S=0.75 ve M_S=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %29, %75 ve %67 oranlarında artmış, 28

günlük değerler ise sırasıyla %11, %16 ve %39 oranlarında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %4, %6 ve %5 oranlarında azalmıştır.

Tablo 3.30' da %8 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin, %80 YFC Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %82, %97 ve %10 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %31, %42 oranlarında artmış ve %38 oranında azalmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %8, %48 oranlarında artmış ve %50 oranında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.30. %8 Na₂O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

Numune (%8 Na ₂ O)	7 Gün	Bağlı değer**	28 Gün	Bağlı değer**	90 Gün	Bağlı değer**
%40YFC*	4.86	1.00	5.93	1.00	7.73	1.00
%40 Ms=0.50	4.64	0.95	6.41	1.08	6.35	0.82
%40 Ms=0.75	4.36	0.90	5.22	0.88	6.34	0.82
%40 Ms=1.00	3.39	0.70	4.67	0.79	5.4	0.70
%60YFC*	3.53	1.00	5.7	1.00	7.28	1.00
%60 Ms=0.50	4.56	1.29	6.34	1.11	6.97	0.96
%60 Ms=0.75	6.17	1.75	6.63	1.16	6.81	0.94
%60 Ms=1.00	5.89	1.67	7.9	1.39	6.92	0.95
%80YFC*	3.06	1.00	4.58	1.00	7.44	1.00
%80 Ms=0.50	5.57	1.82	5.99	1.31	8.02	1.08
%80 Ms=0.75	6.02	1.97	6.52	1.42	11.02	1.48
%80 Ms=1.00	3.38	1.10	2.82	0.62	3.71	0.50

* Referans numuneler.

**Referans numunelerin değerlerini 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

Tablo 3.31' de %8 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin %40 YFC Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %40 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %37, %34 ve %51 oranlarında, 28

günlük değerler ise sırasıyla %32, %31, %35 oranlarına, 90 günlük değerler ise sırasıyla %36, %34 ve %38 oranlarında azalmıştır.

Tablo 3.31' de %8 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin, %60 YFC M_s=0.5, M_s=0.75 ve M_s=1.00 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %6, %23 ve %30 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %22, %10 ve %9 oranlarında, 90 günlük değerler ise sırasıyla %17, %8 ve %4 oranlarında düşüş göstermiştir.

Tablo 3.31' de %8 Na₂O oranlı AAYFC numunelerinin, %80 YFC M_s=0.5, M_s=0.75 ve M_s=1.00 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %55, %159 ve %29 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %46, %126 oranlarında artmış ve %2 oranında azalmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %14, %58 oranlarında artmış ve %48 oranında azalmıştır.

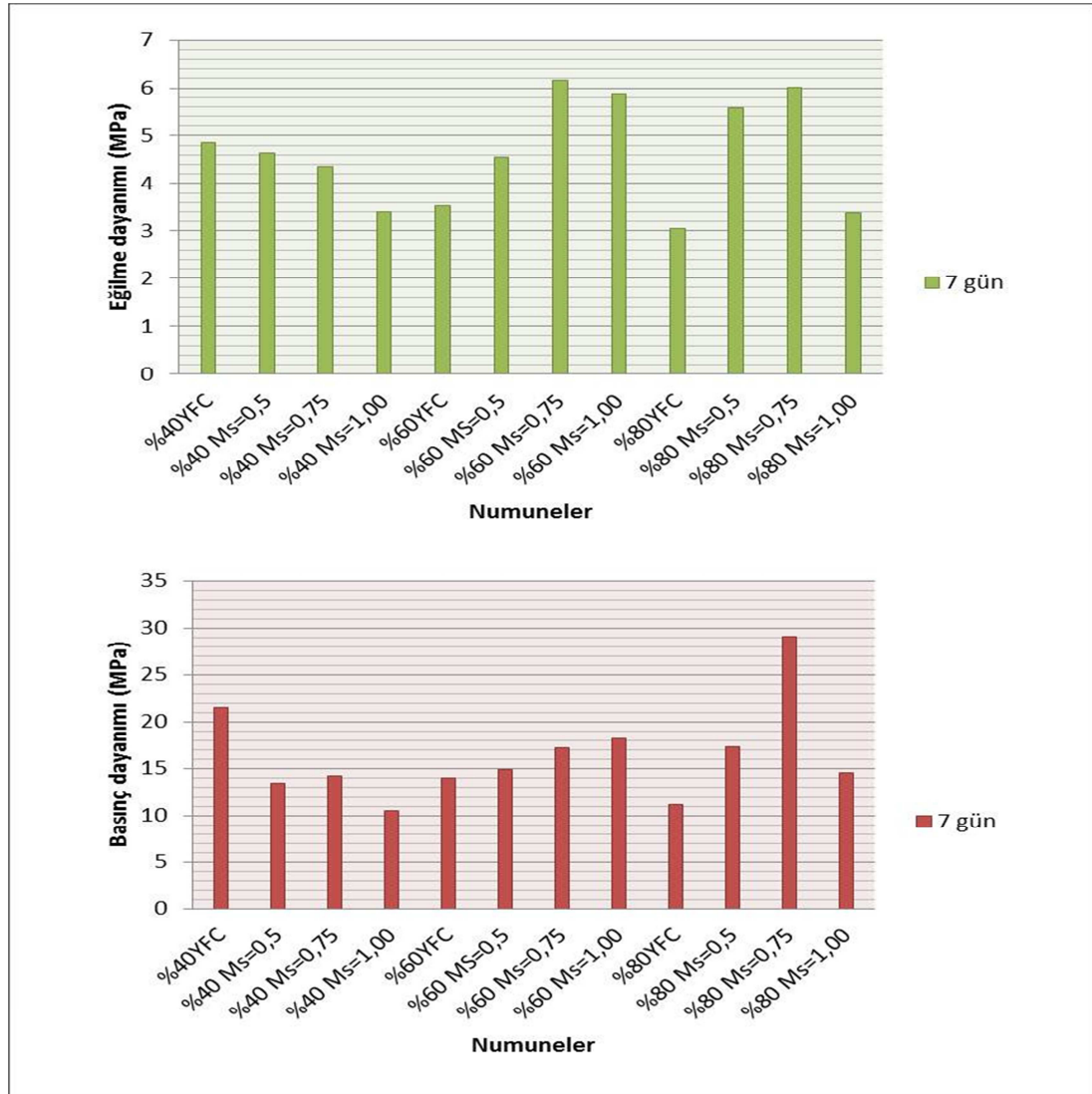
Tablo 3.31. %8 Na₂O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerlerinin referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

Numune (%8 Na ₂ O)	7 Gün	Bağlı değer**	28 Gün	Bağlı değer **	90 Gün	Bağlı değer **
%40YFC*	21.5	1.00	35.5	1.00	48.15	1.00
%40 M _s =0.50	13.47	0.63	24.1	0.68	30.9	0.64
%40 M _s =0.75	14.17	0.66	24.45	0.69	31.9	0.66
%40 M _s =1.00	10.5	0.49	23	0.65	29.9	0.62
%60YFC*	13.94	1.00	32.25	1.00	40.7	1.00
%60 M _s =0.50	14.82	1.06	25.3	0.78	33.9	0.83
%60 M _s =0.75	17.15	1.23	28.9	0.90	37.6	0.92
%60 M _s =1.00	18.14	1.30	29.35	0.91	38.9	0.96
%80YFC*	11.2	1.00	17.88	1.00	32.05	1.00
%80 M _s =0.50	17.32	1.55	26.15	1.46	36.4	1.14
%80 M _s =0.75	29.05	2.59	40.4	2.26	50.7	1.58
%80 M _s =1.00	14.5	1.29	17.44	0.98	16.61	0.52

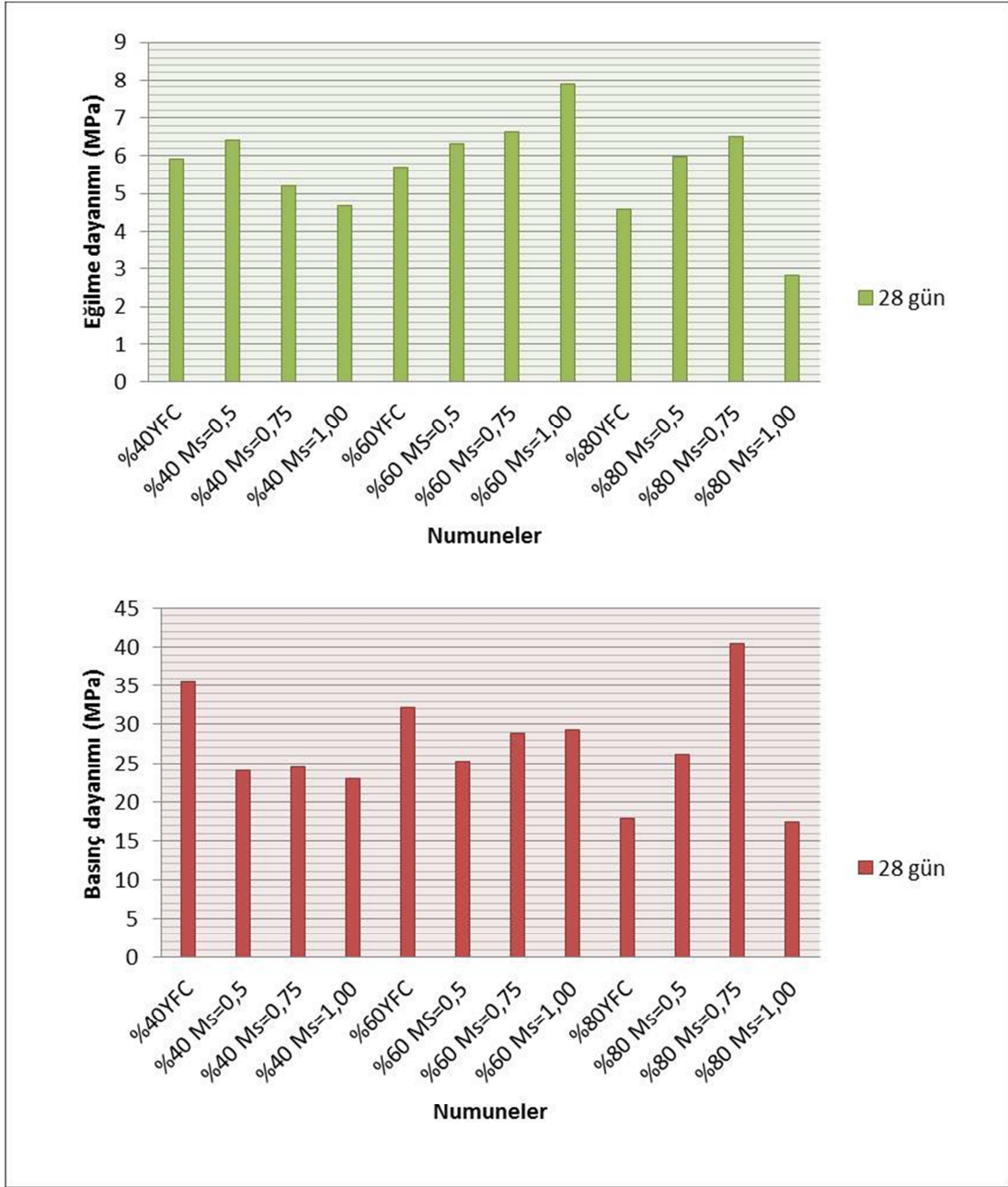
* Referans numuneler.

**Referans numunelerin değerlerini 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

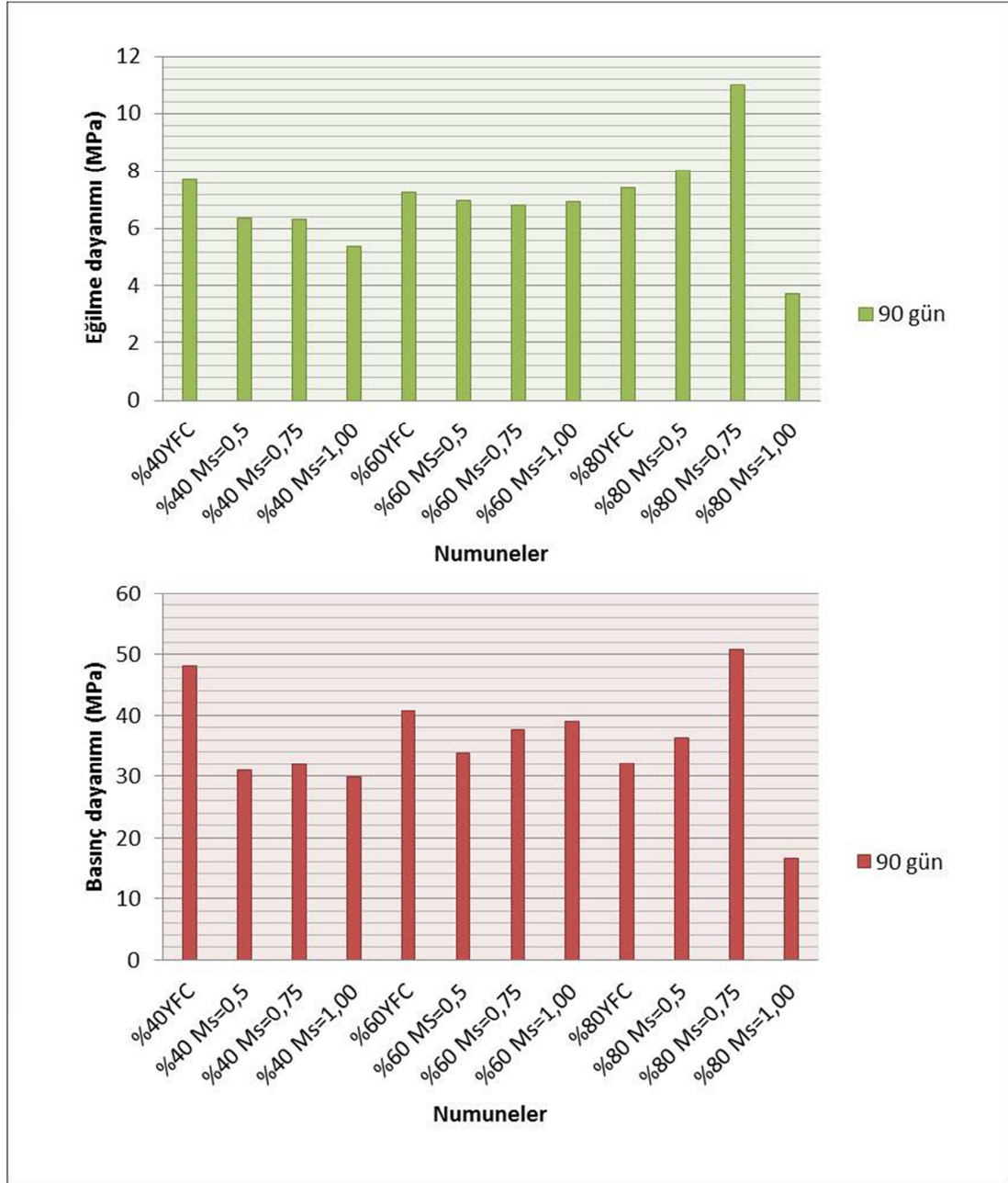
Şekil 3.39’da 7 günlük en yüksek eğilme dayanım değerlerini %60 YFC $M_S=0.75$ olan numuneler, en yüksek basınç değerlerini ise %80 YFC $M_S=0.75$ olan numuneler vermiştir. Şekil 3.40’da 28 günlük en yüksek eğilme dayanım değerlerini %60 YFC $M_S=1.00$ olan numuneler, en yüksek basınç değerlerini ise %80 YFC $M_S=0.75$ olan numuneler vermiştir. Şekil 3.41’de 90 günlük en yüksek eğilme ve basınç dayanım değerlerini Şekil 3.40’da 28 günlük en yüksek eğilme dayanım değerlerini %60 YFC $M_S=1.00$ olan numuneler, en yüksek basınç değerlerini ise %80 YFC $M_S=0.75$ olan numuneler vermiştir. Şekil 3.42’de 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanım değerlerini birbirleriyle kıyaslandığında en iyi değerleri veren %80 YFC $M_S=0.75$ olan numunelerdir.



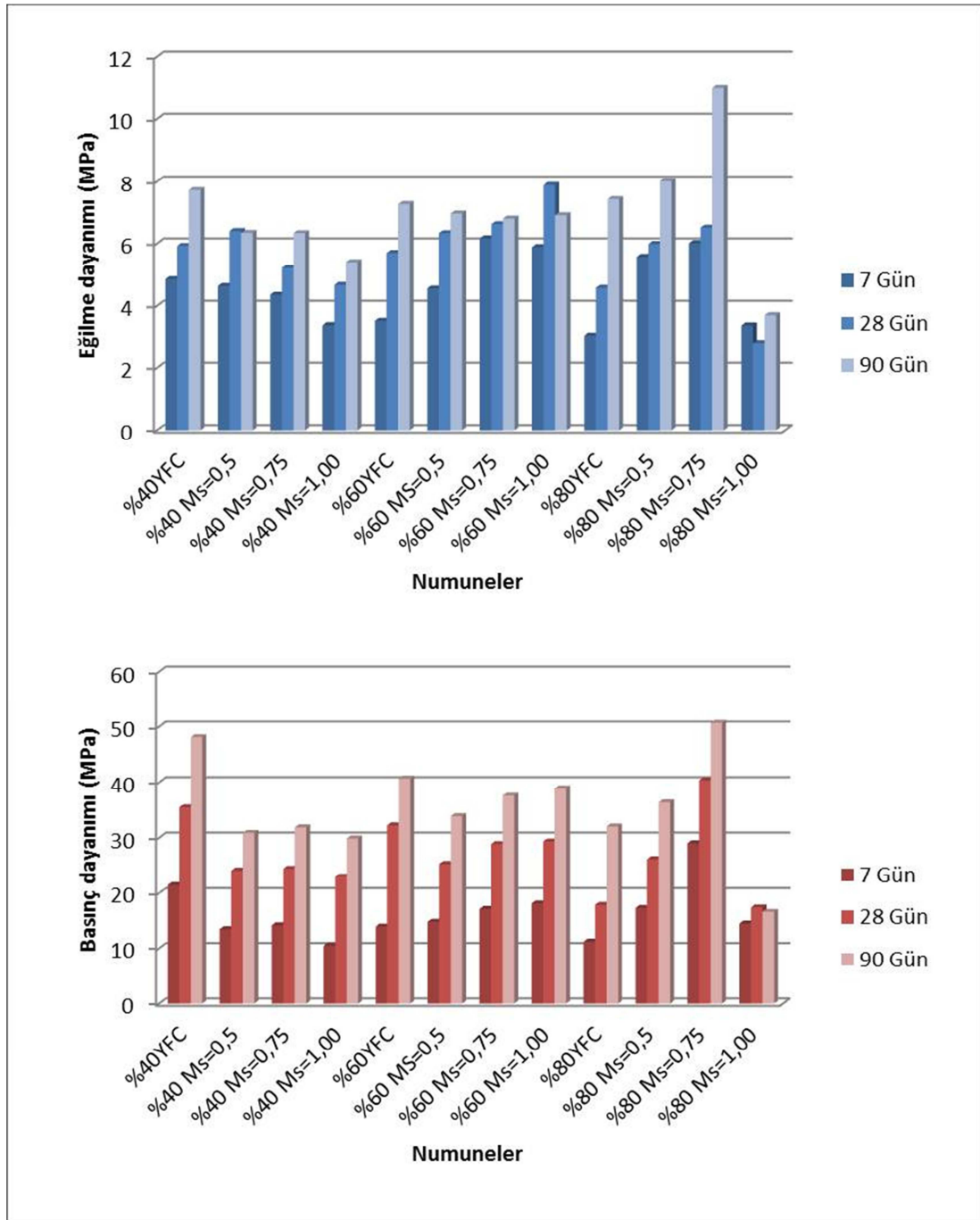
Şekil 3.39. %8 Na_2O içerikli numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.40. %8 Na₂O içerikli numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.41. %8 Na₂O içerikli numunelerin 90 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.42. %8 Na₂O içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri (MPa)

3.6. Deneysel Çalışmalarda Üçüncü Aşama

En uygun değer olarak alınan %8 Na₂O içerikli numunelerin basınç ve eğilme dayanım değerleri diğer numunelerden daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu (AAYFC) betonların en büyük dezavantajının kuruma büzülmesi olduğu bilinmektedir. Kuruma büzülmesi beton içindeki alkali oranının yükselmesiyle artış göstermektedir. Türkiye'deki ponza rezervlerinin çok olması, uçucu külün termik atık olması nedeniyle bu malzemelerin %5 ve 10 oranlarında yüksek fırın cürufu (YFC) ile ikame edilerek, AAYFC harçlarına eklenmiş olup dayanım ve dayanıklılık değerleri incelenmiştir.

3.6.1. Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçlar ile uçucu kül içerikli harç karışımları

AAYFC+UK içerikli numunelerin karışım miktarları tablo 3.32'de verilmektedir. 7, 28 ve 90 günlük dayanım değerleri şahit numunelerle (%40, 60 ve 80 YFC oranlarında) kıyaslanarak incelenmiştir.

Tablo 3.32. %8 Na₂O+UK oranındaki harçların karışım miktarları (g)

Numune (AAYFC+UK)	Standart kum (g)	CEM I	YFC	Su	Na ₂ SiO ₃	NaOH	UK
%60YFC*	1350	180	270	225	-	-	-
%55YFC+%5UK**		180	247.5	225	-	-	22.5
%55YFC +%5UK M _S =0.50		180	247.5	199.61	39.71	23.33	22.5
%55YFC +%5UK M _S =0.75		180	247.5	186.92	59.56	21.06	22.5
%55YFC +%5UK M _S =1.00		180	247.5	174.22	79.41	18.79	22.5
%50YFC+%10UK**		180	225	225	-	-	45
%50YFC+%10UK M _S =0.50		180	225	199.61	39.71	23.33	45
%50YFC+%10UK M _S =0.75		180	225	186.92	59.56	21.06	45
%50YFC+%10UK M _S =1.00		180	225	174.22	79.41	18.79	45
%40YFC+%20UK**		180	180	225	-	-	90
%40YFC+%20UK M _S =0.50		180	180	208.07	26.47	15.55	90

Tablo 3.32. %8 Na₂O+UK oranındaki harçların karışım miktarları (g)'nın (devamı)

%40YFC+%20UK M _s =0.75	180	180	199.61	39.71	14.04	90
%40YFC+%20UK M _s =1.00	180	180	186.92	52.94	12.53	90
%80YFC*	90	360	174.22	-	-	-
%75YFC+%5UK	90	337.5	225	-	-	22.5
%75YFC+%5UK M _s =0.50	90	337.5	208.07	52.94	31.11	22.5
%75YFC+%5UK M _s =0.75	90	337.5	191.15	79.41	28.08	22.5
%75YFC +%5UK M _s =1.00	90	337.5	225	105.88	25.06	22.5
%70YFC+%10UK**	90	315	225	-	-	45
%70YFC+%10UK M _s =0.50	90	315	191.15	52.94	31.11	45
%70YFC+%10UK M _s =0.75	90	315	174.22	79.41	28.08	45
%70YFC+%10UK M _s =1.00	90	315	157.3	105.88	25.06	45

* = Referans numuneler

**= Alkali aktive edilmemiş uçucu kül içerikli referans numuneler.

Tablo 3.33'de %8 Na₂O oranlı uçucu kül içerikli AAYFC numunelerinin, %55 YFC + %5 UK numunesi ve %55 YFC + %5UK M_s=0.5, M_s=0.75 ve M_s=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %2, %29, %65 ve %69 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %12 oranında azalmış, %14, %36 ve %31 oranlarında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %4, %16 ve %2 oranlarında azalmış, %7 oranında artmıştır.

Tablo 3.33'de %8 Na₂O oranlı uçucu kül içerikli AAYFC numunelerinin, %50 YFC + %10 UK numunesi ve %50 YFC + %10 UK M_s=0.5, M_s=0.75 ve M_s=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %13, %30, %38 ve %75 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %4 oranında azalmış, %12, %10 ve %23 oranlarında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %1, oranında artmış %24 ve %8 oranlarında azalmış, %3 oranında artmıştır.

Tablo 3.33'de %8 Na₂O oranlı uçucu kül içerikli AAYFC numunelerinin, %40 YFC + %20 UK numunesi ve %40 YFC + %20 UK M_s=0.5, M_s=0.75 ve M_s=1.00 olan

numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %35 ve %49 oranlarında azalmış, %7 ve %23 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %13 oranında azalmış, %12 oranında artmış, %72 oranında azalmış, %11 oranında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %7, %73, %24 ve %4 oranlarında azalmıştır.

Tablo 3.33'de %8 Na₂O oranlı uçucu kül içerikli AAYFC numunelerinin, %75 YFC + %5 UK numunesi ve %75 YFC + %5 UK Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %25 oranında azalmış, %83, %86 ve %1 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %9 oranında azalmış, %38 ve %62 oranlarında artmış, %14 oranında azalmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %3 oranında artmış, %7, %10 ve %44 oranlarında azalmıştır.

Tablo 3.33'de %8 Na₂O oranlı uçucu kül içerikli AAYFC numunelerinin, %70 YFC + %10 UK numunesi ve %70 YFC + %10 UK Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %34 oranında azalmış, %105, %114 ve %13 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %20 oranında azalmış, %32 ve %50 oranlarında artmış, %15 oranında azalmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %2 oranında artmış, %13, %11 ve %50 oranlarında azalmıştır.

Tablo 3.33. AAYFC+UK içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

Numune (AAYFC+UK)	7 Gün	Bağlı değer**	28 Gün	Bağlı değer**	90 Gün	Bağlı değer**
%60YFC*	3.53	1.00	5.7	1.00	7.28	1.00
%55YFC+%5UK***	3.61	1.02	5.02	0.88	7	0.96
%55YFC+%5UK Ms=0.50	4.57	1.29	6.5	1.14	6.09	0.84
%55YFC+%5UK Ms=0.75	5.81	1.65	7.77	1.36	7.11	0.98
%55YFC+%5UK Ms=1.00	5.97	1.69	7.48	1.31	7.79	1.07
%50YFC+%10UK***	3.98	1.13	5.5	0.96	7.38	1.01
%50YFC+%10UK Ms=0.50	4.59	1.30	6.39	1.12	5.5	0.76

Tablo 3.33. AAYFC+UK içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)'nın (devamı)

%50YFC+%10UK $M_s=0.75$	4.88	1.38	6.28	1.10	6.72	0.92
%50YFC+%10UK $M_s=1.00$	6.16	1.75	7.02	1.23	7.5	1.03
%40YFC+%20UK***	2.29	0.65	4.97	0.87	6.75	0.93
%40YFC+%20UK $M_s=0.50$	1.79	0.51	6.41	1.12	2	0.27
%40YFC+%20UK $M_s=0.75$	3.79	1.07	1.62	0.28	5.54	0.76
%40YFC+%20UK $M_s=1.00$	4.34	1.23	6.3	1.11	7.02	0.96
%80YFC*	3.06	1.00	4.58	1.00	7.44	1.00
%75YFC+%5UK***	2.29	0.75	4.16	0.91	7.67	1.03
%75YFC+%5UK $M_s=0.50$	5.60	1.83	6.31	1.38	6.93	0.93
%75YFC+%5UK $M_s=0.75$	5.69	1.86	7.44	1.62	6.7	0.90
%75YFC+%5UK $M_s=1.00$	3.10	1.01	3.93	0.86	4.2	0.56
%70YFC+%10UK***	2.03	0.66	3.65	0.80	7.58	1.02
%70YFC+%10UK $M_s=0.50$	6.26	2.05	6.03	1.32	6.45	0.87
%70YFC+%10UK $M_s=0.75$	6.55	2.14	6.85	1.50	6.59	0.89
%70YFC+%10UK $M_s=1.00$	3.46	1.13	3.89	0.85	3.73	0.50

*Referans numuneler

**Referans numunelerin değerlerini 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

***Alkali aktive edilmemiş uçucu kül içerikli referans numuneler

Tablo 3.34'de %8 Na₂O oranlı uçucu kül içerikli AAYFC numunelerinin, %55 YFC + %5 UK numunesi ve %55 YFC + %5 UK $M_s=0.5$, $M_s=0.75$ ve $M_s=1.00$ olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %3, %9, %79 ve %36 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %12, %28, %9 ve %11 oranlarında azalmış, , 90 günlük değerler ise sırasıyla %3 oranında artmış, %46 ve %13 ve %2 oranlarında azalmıştır.

Tablo 3.34'de %8 Na₂O oranlı uçucu kül içerikli AAYFC numunelerinin, %50 YFC + %10 UK numunesi ve %50 YFC + %10 UK $M_s=0.5$, $M_s=0.75$ ve $M_s=1.00$ olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %13, %21, %5 ve %41 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %18, %25, %29 ve %14 oranlarında azalmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %3 oranında artmış %27, %19, %12 oranlarında azalmıştır.

Tablo 3.34'de %8 Na₂O oranlı uçucu kül içerikli AAYFC numunelerinin, %40 YFC + %20 UK numunesi ve %40 YFC + %20 UK Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %26, %61, %1 ve %6 oranlarında azalmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %20, %29, %81 ve %29 oranlarında azalmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %8, %83, %37 ve %30 oranlarında azalmıştır.

Tablo 3.34'de %8 Na₂O oranlı uçucu kül içerikli AAYFC numunelerinin, %75 YFC + %5 UK numunesi ve %75 YFC + %5 UK Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %29 oranında azalmış, %92, %161 ve %42 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %10 oranında azalmış, %64, %100 ve %10 oranlarında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %15, %22, %48 ve %10 oranlarında artmıştır.

Tablo 3.34'de %8 Na₂O oranlı uçucu kül içerikli AAYFC numunelerinin, %70 YFC + %10 UK numunesi ve %70 YFC + %10 UK Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %27 oranında azalmış, %77, %125 ve %67 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %10 oranında azalmış, %81, %121 ve %18 oranlarında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %9, %26, %49 oranlarında artmış ve %33 oranında azalmıştır.

Tablo 3.34. AAYFC+UK içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

Numune (AAYFC+UK)	7 Gün	Bağlı değer**	28 Gün	Bağlı değer**	90 Gün	Bağlı değer**
%60YFC*	13.94	1.00	32.25	1.00	40.7	1.00
%55YFC+%5UK***	14.39	1.03	24.9	0.77	41.9	1.03
%55YFC +%5UK Ms=0.50	15.22	1.09	23.35	0.72	21.9	0.54
%55YFC +%5UK Ms=0.75	24.91	1.79	29.35	0.91	35.5	0.87
%55YFC +%5UK Ms=1.00	19.01	1.36	28.75	0.89	39.9	0.98
%50YFC+%10UK***	15.69	1.13	26.6	0.82	41.90	1.03

Tablo 3.34. AAYFC+UK içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)'nın (devamı)

%50YFC +%10UK $M_S=0.50$	16.81	1.21	24.15	0.75	29.8	0.73
%50YFC+ %10UK $M_S=0.75$	14.7	1.05	22.9	0.71	32.9	0.81
%50YFC+ %10UK $M_S=1.00$	19.6	1.41	27.6	0.86	35.8	0.88
%40YFC+%20UK***	10.27	0.74	25.85	0.80	37.3	0.92
%40YFC+ %20UK $M_S=0.50$	5.48	0.39	22.9	0.71	7.03	0.17
%40YFC +%20UK $M_S=0.75$	13.74	0.99	6.08	0.19	25.6	0.63
%40YFC +%20UK $M_S=1.00$	13.17	0.94	22.8	0.71	28.3	0.70
%80YFC*	11.2	1.00	17.88	1.00	32.05	1.00
%75YFC+%5UK***	7.9	0.71	16.16	0.90	37	1.15
%75YFC +%5UK $M_S=0.50$	21.5	1.92	29.4	1.64	39.2	1.22
%75YFC +%5UK $M_S=0.75$	29.2	2.61	35.8	2.00	47.3	1.48
%75YFC +%5UK $M_S=1.00$	15.95	1.42	19.62	1.10	35.3	1.10
%70YFC+%10UK***	8.18	0.73	16.15	0.90	34.8	1.09
%70YFC +%10UK $M_S=0.50$	19.8	1.77	32.45	1.81	40.4	1.26
%70YFC+%10UK $M_S=0.75$	25.2	2.25	39.45	2.21	47.7	1.49
%70YFC+%10UK $M_S=1.00$	18.75	1.67	21.15	1.18	21.5	0.67

* Referans numuneler

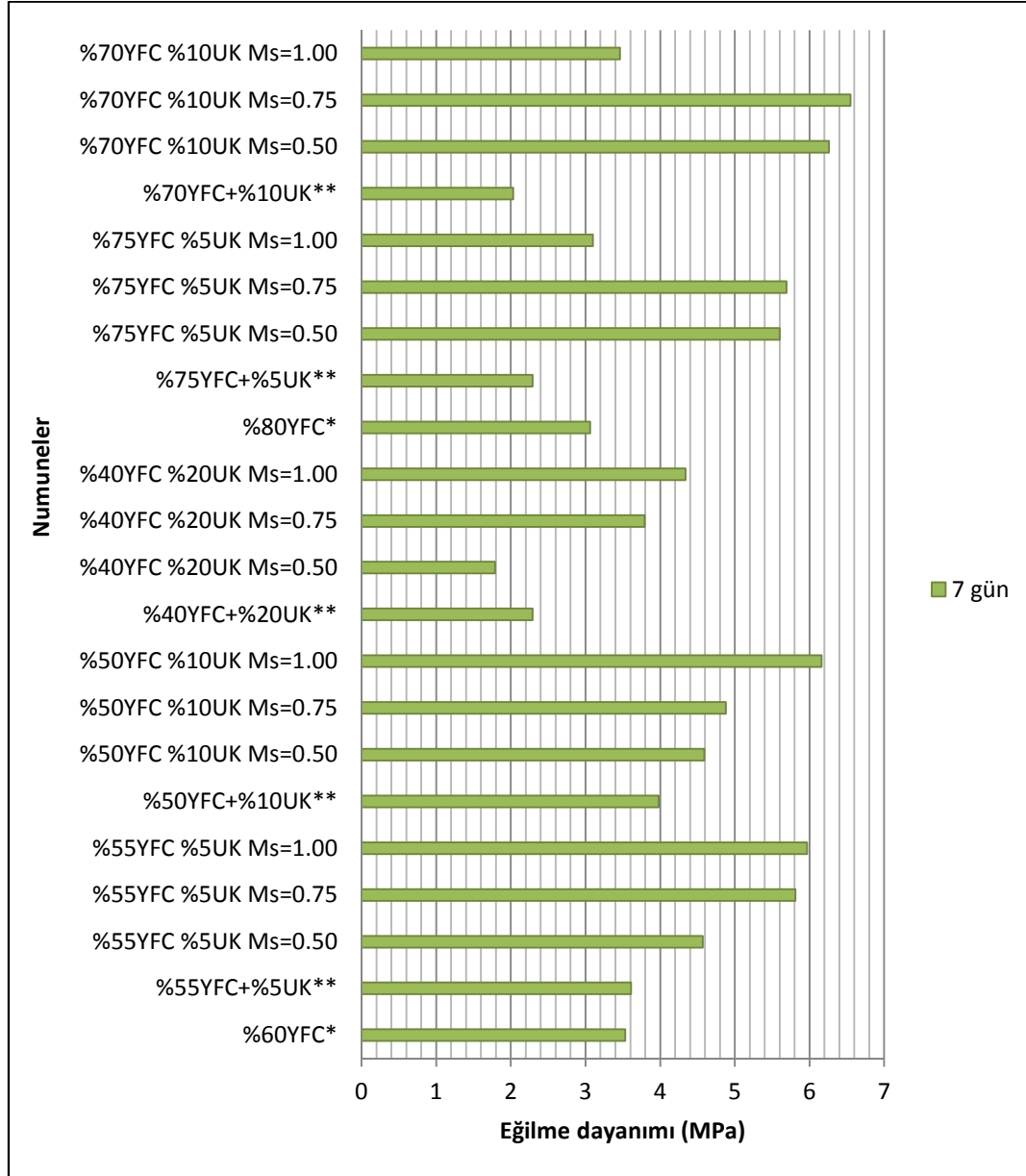
**Referans numunelerin değerlerini 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

***Alkali aktive edilmemiş uçucu kül içerikli referans numuneler

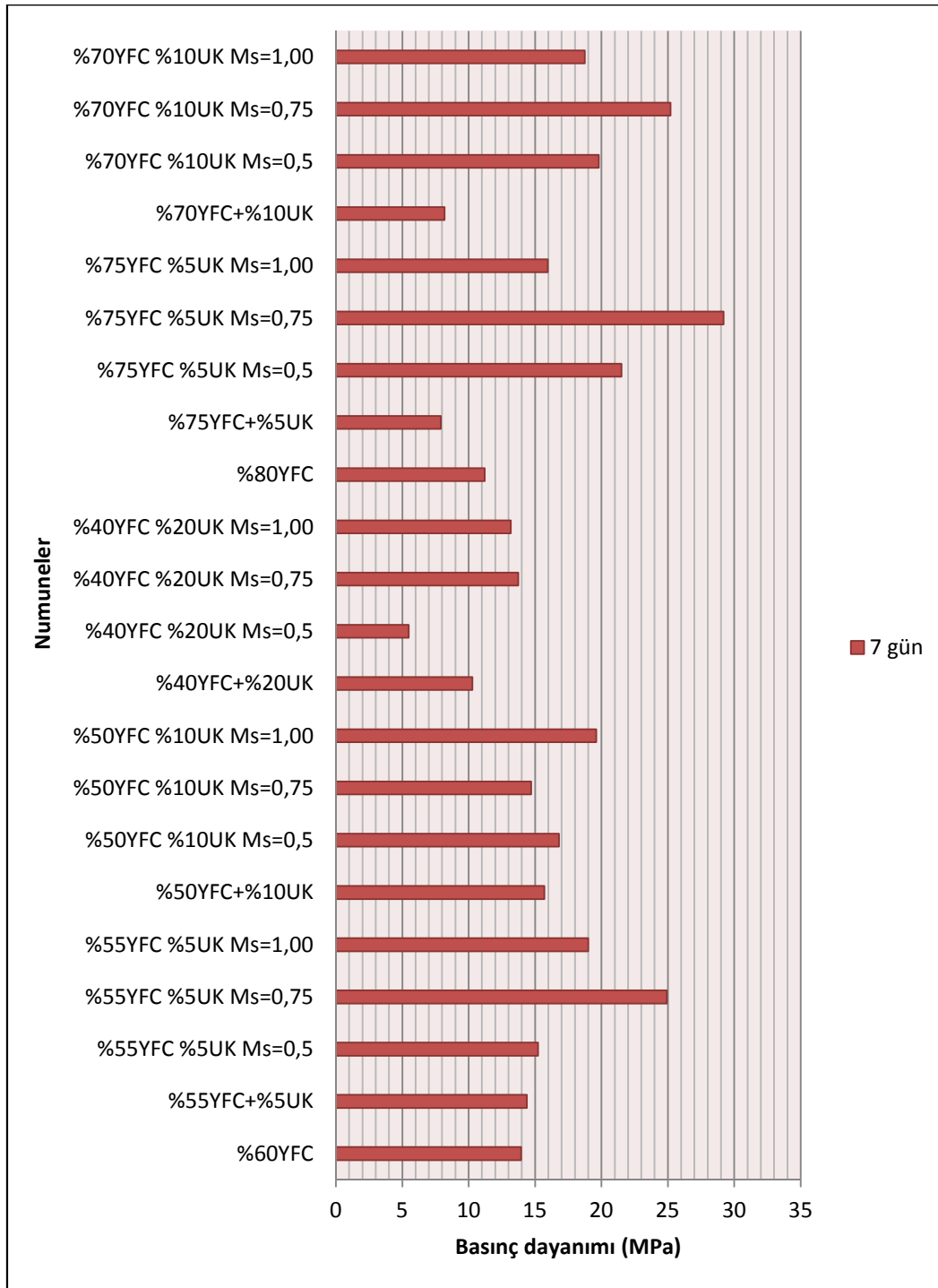
Uçucu kül içerikli numunelerinin dayanım değerleri, uçucu kül içermeyen (%8 Na₂O oranlı AAYFC) numunelerle kıyaslandığında hemen hemen aynı değerler elde edildiği ve UK'nın numunelere pozitif bir katkı sağlamadığı anlaşılmaktadır. Ancak negatif bir etkiside söz konusu olmadığı için aynı oranlarda yeniden elde edilen numuneler dayanıklılık deneyleri ile incelenmiştir.

Şekil 3.43'de 7 günlük en yüksek dayanım değerlerini %70 YFC + %10 UK, $M_S=0.75$ olan numunelerden elde edilmiştir. Şekil 3.44'de en yüksek basınç dayanım değerleri ise %75 YFC + %5 UK, $M_S=0.75$ olan numunelerden elde edilmiştir. Şekil 3.45'de 28 günlük en yüksek eğilme dayanım değerlerinde ise %75 YFC + %5 UK, $M_S=0.75$ olan numunelerden elde edilmiştir. Şekil 3.46'de 28 günlük en yüksek basınç dayanım değerlerinde ise %75 YFC + %5 UK, $M_S=0.75$ olan numunelerden elde edilmiştir. Şekil 3.47 ve Şekil 3.48'de 90 günlük en yüksek eğilme ve basınç dayanım değerlerinde ise %75 YFC + %5 UK, $M_S=0.75$ olan numunelerden elde

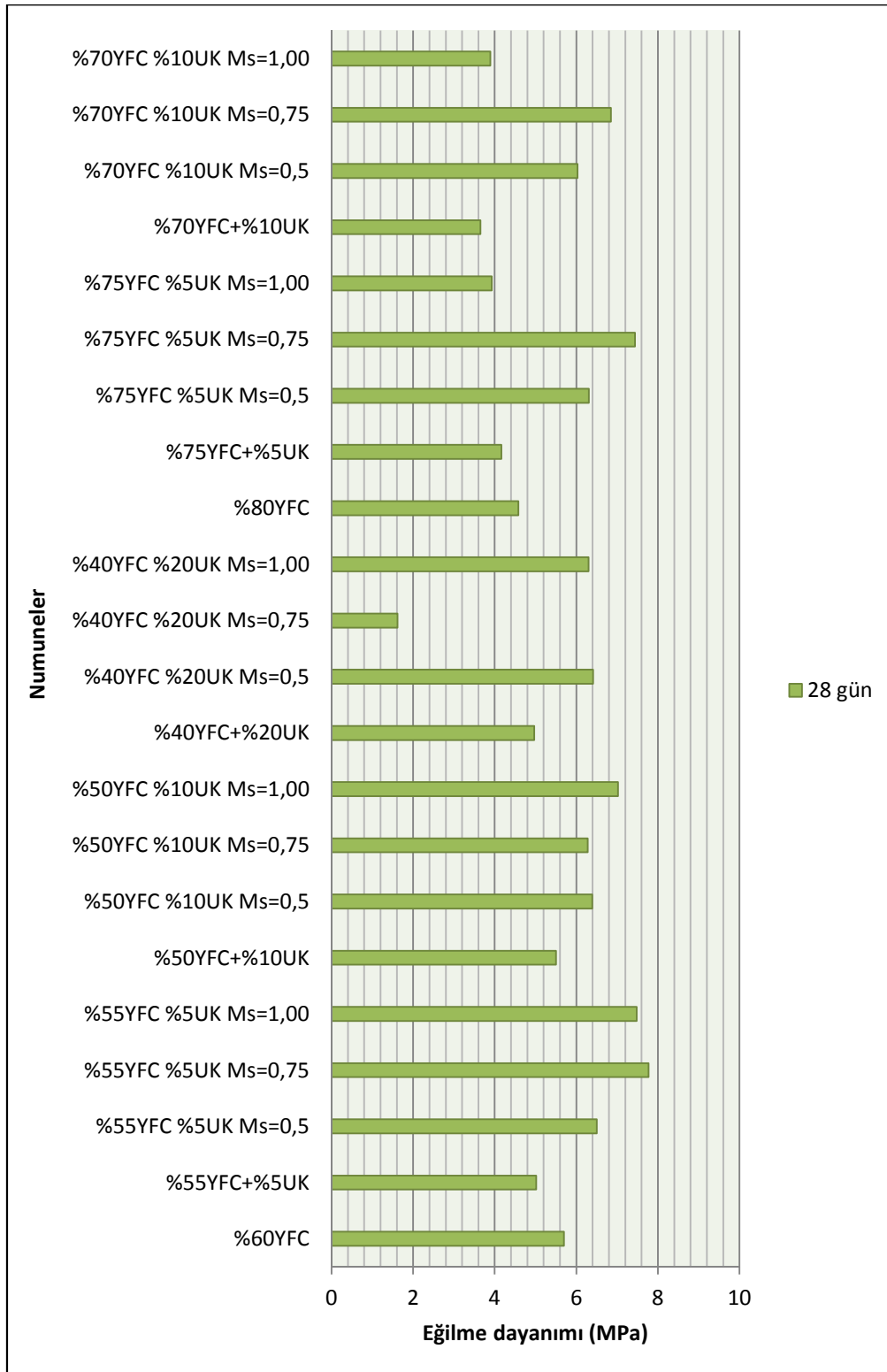
edilmiştir. Şekil 3.49 ve Şekil 3.50’de 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri grafik şeklinde gösterilerek mukayese edilmiştir.



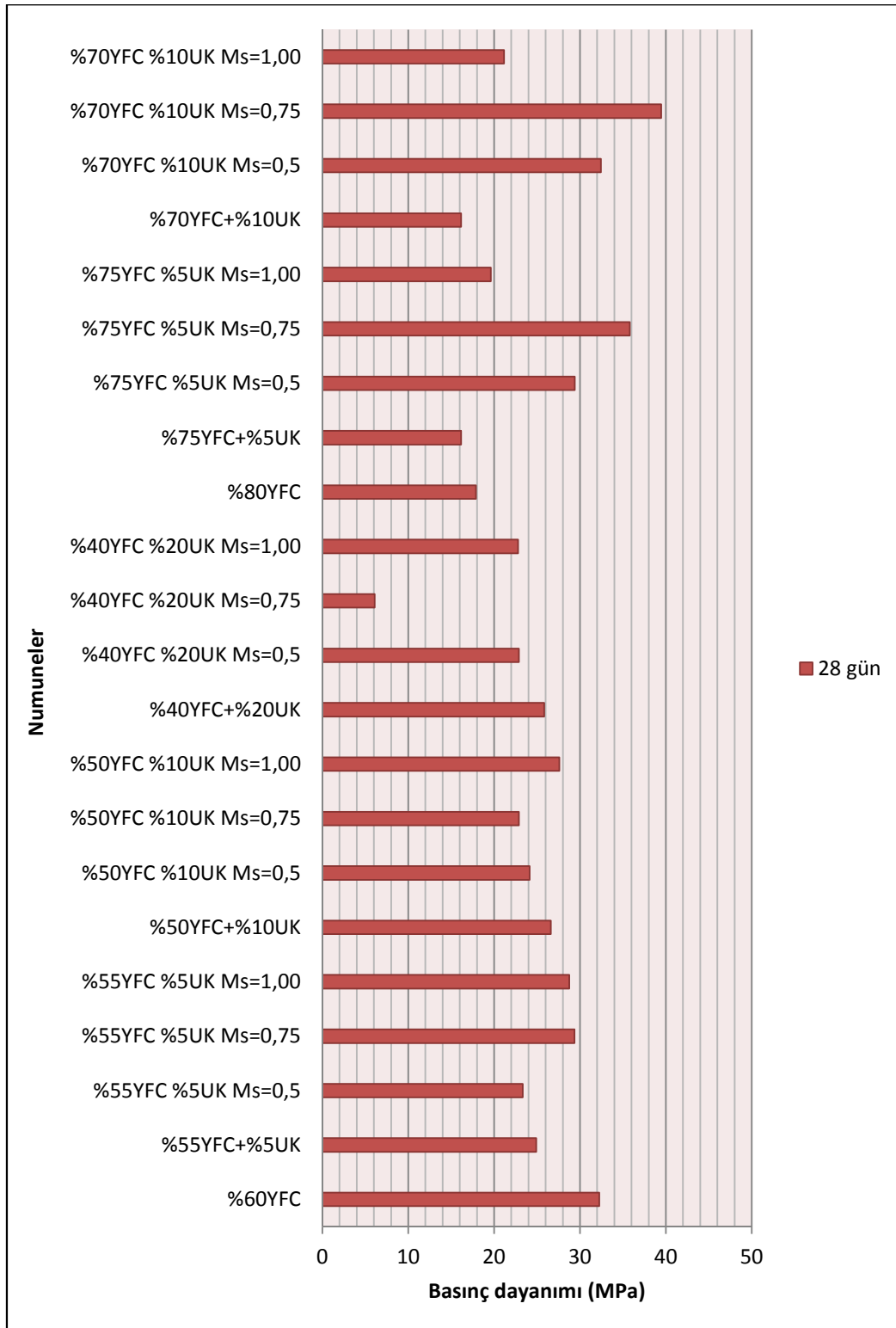
Şekil 3.43. AAYFC+UK içerikli numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)



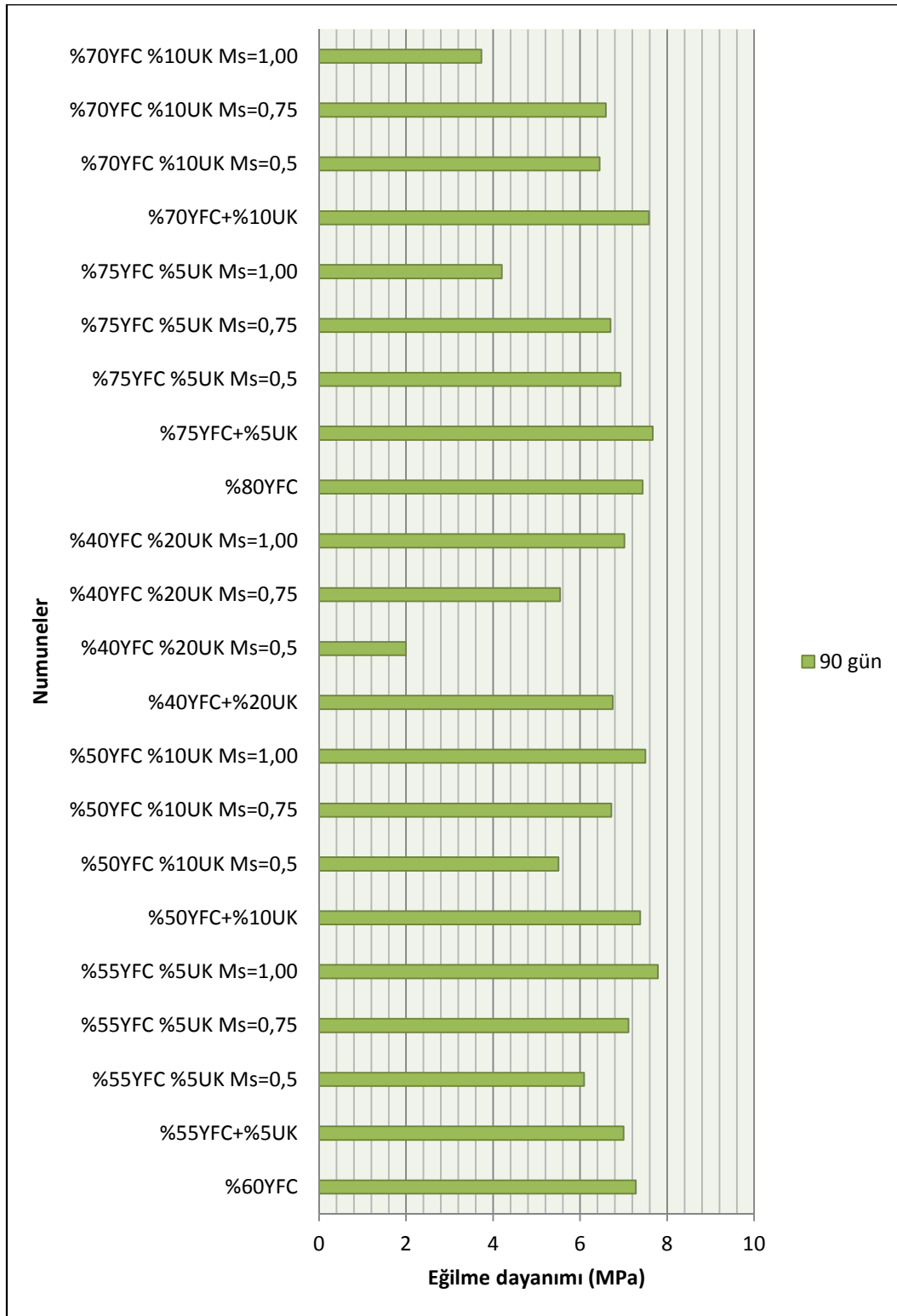
Şekil 3.44. AAYFC+UK içerikli numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)



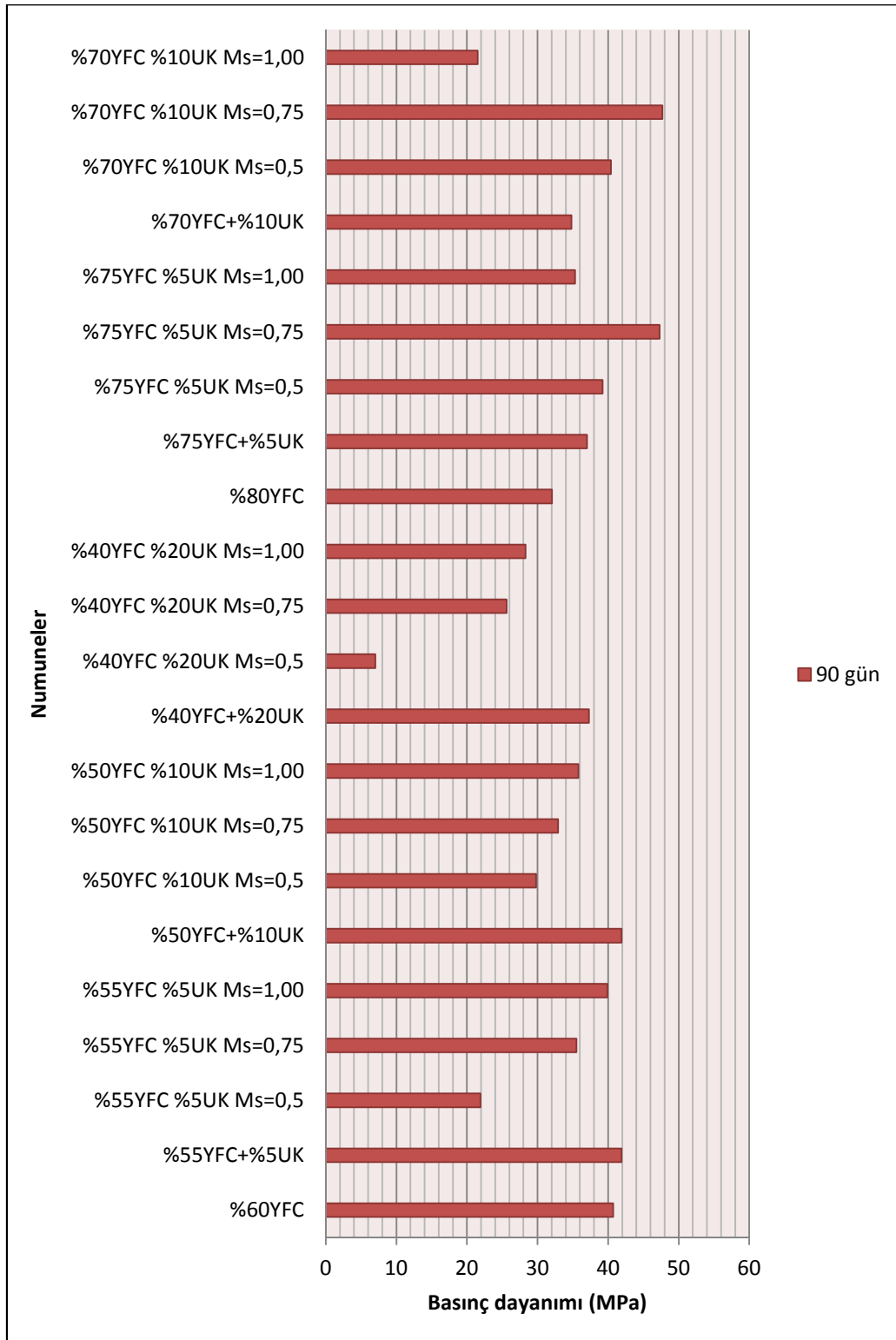
Şekil 3.45. AAYFC+UK içerikli numunelerin 28 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)



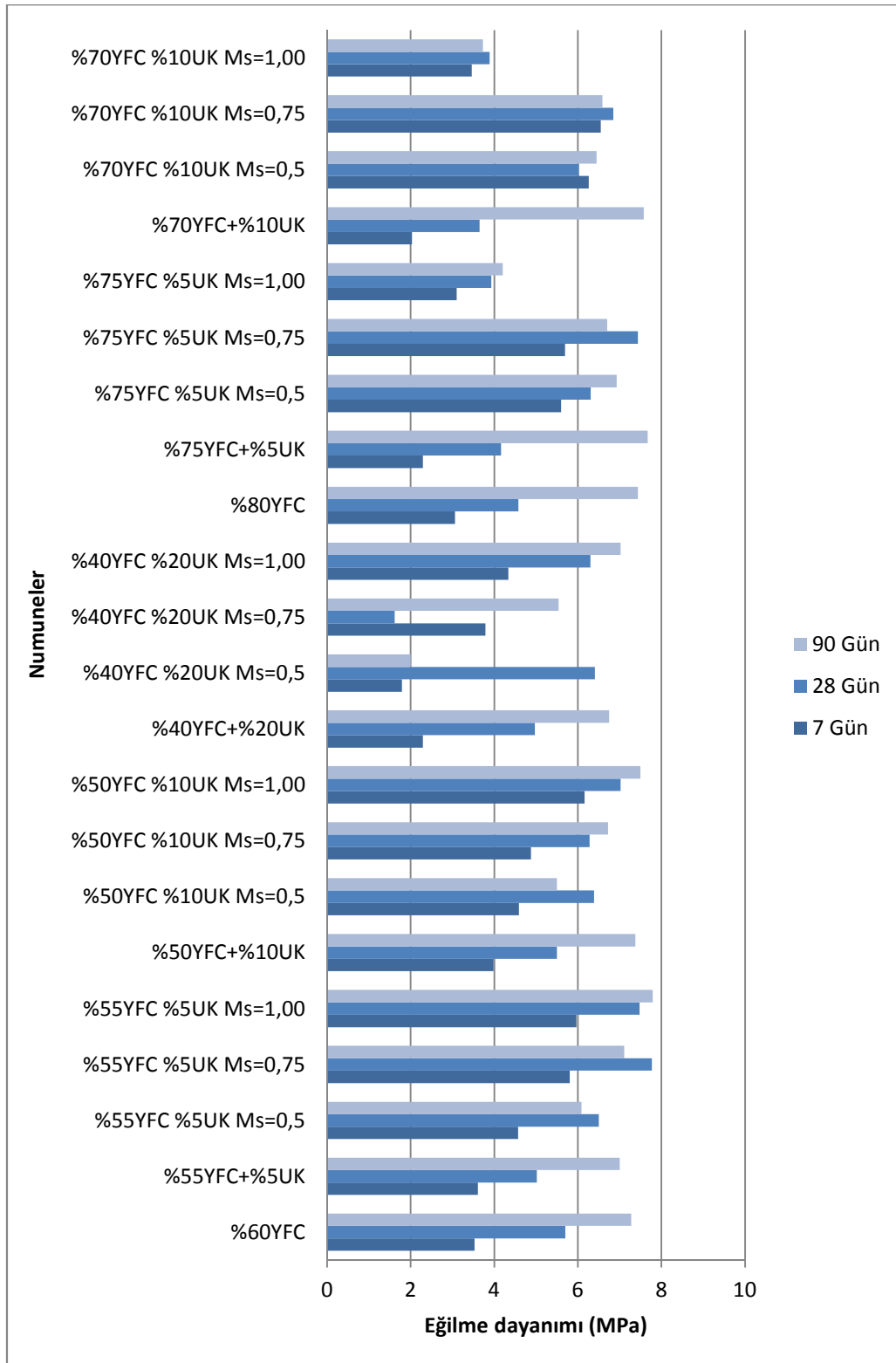
Şekil 3.46. AAYFC+UK içerikli numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)



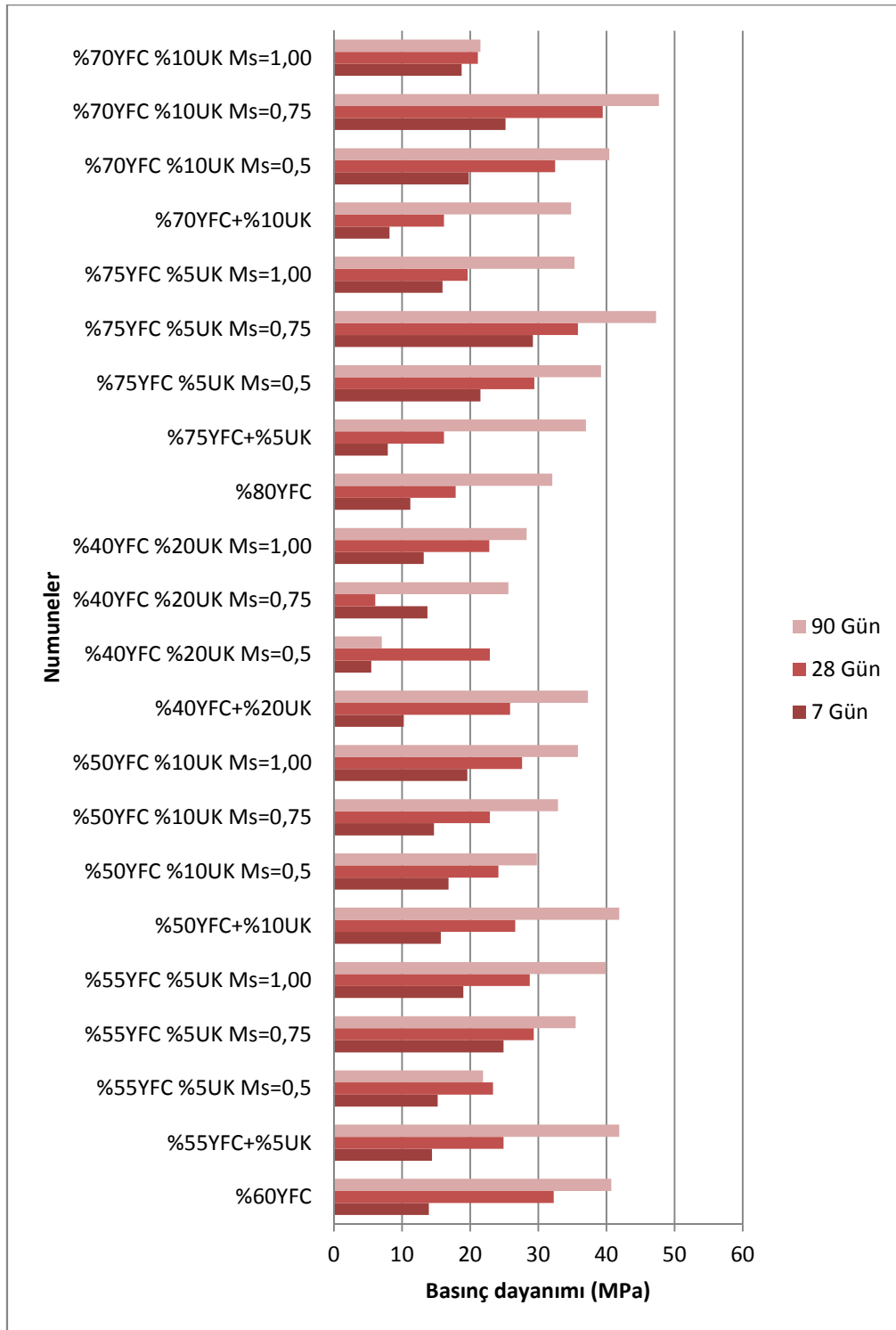
Şekil 3.47. AAYFC+UK içerikli numunelerin 90 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.48. AAYFC+UK içerikli numunelerin 90 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.49. AAYFC+UK içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.50. AAYFC+UK içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)

3.6.2. Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cüruf ile ponza içerikli harç karışımları

Aşağıdaki sayfalarda; Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cüruf ile ponza (AAYFC+P) içerikli numunelerin karışım miktarları Tablo 3.35’de verilmektedir. 7, 28, 90 günlük dayanım değerlerinin şahit numunelerle (%40, 60 ve 80 YFC oranlarında) kıyaslanarak tablo ve grafik olarak gösterilmiştir;

Tablo 3.35. %8 Na₂O+P oranındaki harçların karışım miktarları (g)

Numune (AAYFC+P)	Standart kum	CEM I	YFC	Su	Na ₂ Si O ₃	NaOH	Ponza
%60 YFC*	1350	180	270.0	225.00	-	-	-
%55YFC+%5P**		180	247.5	225.00	-	-	22.5
%55YFC+%5P M _S =0.50		180	247.5	199.61	39.71	23.33	22.5
%55YFC+%5P M _S =0.75		180	247.5	186.92	59.56	21.06	22.5
%55YFC+%5P M _S =1.00		180	247.5	174.22	79.41	18.79	22.5
%50YFC+%10P**		180	225.0	225.00	-	-	45.0
%50YFC+%10P M _S =0.50		180	225.0	199.61	39.71	23.33	45.0
%50YFC+%10P M _S =0.75		180	225.0	186.92	59.56	21.06	45.0
%50YFC+%10P M _S =1.00		180	225.0	174.22	79.41	18.79	45.0
%80YFC*		90	360.0	225.00	-	-	-
%55YFC+%5P**		90	337.5	225.00	-	-	22.5
%75YFC+%5P M _S =0.50		90	337.5	191.15	52.94	31.11	22.5
%75YFC+%5P M _S =0.75		90	337.5	174.22	79.41	28.08	22.5
%75YFC+%5P M _S =1.00		90	337.5	157.30	105.88	25.06	22.5
%70YFC+%10P**		90	315.0	225.00	-	-	45.0
%70YFC+%10P M _S =0.50		90	315.0	191.15	52.94	31.11	45.0
%70YFC+%10P M _S =0.75		90	315.0	174.22	79.41	28.08	45.0
%70YFC+%10P M _S =1.00		90	315.0	157.30	105.88	25.06	45.0

*Referans numuneler

** Alkali aktive edilmemiş ponza içerikli referans numuneler.

Tablo 3.36’de %8 Na₂O oranlı ponza içerikli AAYFC numunelerinin, %55 YFC + %5 P numunesi ve %55 YFC + %5 P M_S=0.5, M_S=0.75 ve M_S=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC

ile kıyaslandığında sırasıyla %18, %61, %86 ve %67 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %9, %7, %24 ve %35 oranlarında azalmış, , 90 günlük değerler ise sırasıyla %1 ve %9 oranlarında azalmış, referans değeri ile aynı kalmış, %3 oranlarında artmıştır.

Tablo 3.36'da %8 Na₂O oranlı ponza içerikli AAYFC numunelerinin, %50 YFC + %10 P numunesi ve %50 YFC + %10 P Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %20 oranında azalmış, %34, %46 ve %62 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %12 oranında azalmış, %8, %4 ve %16 oranında artmıştır. 90 günlük değerler ise sırasıyla %5 ve %13 oranlarında azalmış, %1 oranında artmış, %7 oranında azalmıştır.

Tablo 3.36'da %8 Na₂O oranlı ponza içerikli AAYFC numunelerinin, %75 YFC + %5 P numunesi ve %75 YFC + %5 P Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %30 oranında azalmış, %73, %91 ve %18 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %2 oranında azalmış, %29, %42 oranlarında artmış, %34 oranında azalmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %1, %12, %25 oranlarında artmış, %47 oranında azalmıştır.

Tablo 3.36'da %8 Na₂O oranlı ponza içerikli AAYFC numunelerinin, %70 YFC + %10 P numunesi ve %70 YFC + %10 P Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %40 oranında azalmış, %63, %86 oranlarında artmış, %37 oranında azalmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %2 oranında azalmış, %34, %52 oranlarında artmış, %61 oranında azalmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %26 oranında azalmış, %8 ve %21 oranlarında artmış, %66 oranında azalmıştır.

Tablo 3.36. AAYFC+P içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması

Numune (AAYFC+P)	7 Gün	Bağlı değer**	28 Gün	Bağlı değer**	90 Gün	Bağlı değer**
%60 YFC*	3.53	1.00	5.70	1.00	7.28	1.00
%55YFC+%5P***	4.18	1.18	6.22	1.09	7.21	0.99
%55YFC+%5P $M_S=0.50$	5.70	1.61	6.12	1.07	6.61	0.91
%55YFC+%5P $M_S=0.75$	6.58	1.86	7.08	1.24	7.26	1.00
%55YFC+%5P $M_S=1.00$	5.90	1.67	7.67	1.35	7.53	1.03
%50YFC+%10P***	2.83	0.80	5.03	0.88	6.89	0.95
%50YFC+%10P $M_S=0.50$	4.73	1.34	6.18	1.08	6.52	0.87
%50YFC+%10P $M_S=0.75$	5.14	1.46	5.95	1.04	7.3	1.01
%50YFC+%10P $M_S=1.00$	5.72	1.62	6.59	1.16	6.78	0.93
%80YFC*	3.06	1.00	4.58	1.00	7.44	1.00
%75YFC+%5P***	2.15	0.70	4.51	0.98	7.50	1.01
%75YFC+%5P $M_S=0.50$	5.28	1.73	5.93	1.29	8.32	1.12
%75YFC+%5P $M_S=0.75$	5.85	1.91	6.51	1.42	9.32	1.25
%75YFC+%5P $M_S=1.00$	3.62	1.18	3.01	0.66	3.98	0.53
%70YFC+%10P***	1.83	0.60	4.69	1.02	5.5	0.74
%70YFC+%10P $M_S=0.50$	4.99	1.63	6.15	1.34	8.02	1.08
%70YFC+%10P $M_S=0.75$	5.69	1.86	6.95	1.52	9.02	1.21
%70YFC+%10P $M_S=1.00$	1.93	0.63	1.77	0.39	2.50	0.34

*Referans numuneler

**Referans numunelerin değerlerini 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

***Alkali aktive edilmemiş ponza içerikli referans numuneler

Ponzalı numunelerin eğilme dayanım değerleri uçucu kül içeren numunelere göre daha iyi neticeler vermiştir. Özellikle %75 YFC + %5 P ve %70YFC + %10P, $M_S=0.50-0.75-1.00$ olan numunelerin 7, 28 ve 90 günlük dayanımları referans numunelere göre daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 3.37’de %8 Na_2O oranlı ponza içerikli AAYFC numunelerinin, %55 YFC + %5 P numunesi ve %55 YFC + %5 P $M_S=0.5$, $M_S=0.75$ ve $M_S=1.00$ olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile

kıyaslandığında sırasıyla %27 oranında artmış, %6 oranında azalmış, %7 ve %36 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %2 oranında artmış, %24, %7 ve %3 oranlarında azalmış, , 90 günlük değerler ise sırasıyla %10 oranında artmış, %21 ve %2 oranlarında azalmış, %4 oranında artmıştır.

Tablo 3.37'de %8 Na₂O oranlı ponza içerikli AAYFC numunelerinin, %50 YFC + %10 P numunesi ve %50 YFC + %10 P Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %60 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %16 oranında azalmış, %27, %35 ve %46 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %29, %18, %3 ve %3 oranlarında azalmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %15, %18, %4 ve %3 oranlarında azalmıştır.

Tablo 3.37'de %8 Na₂O oranlı ponza içerikli AAYFC numunelerinin, %75 YFC + %5 P numunesi ve %75 YFC + %5 P Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %37 oranında azalmış, %75, %153 ve %47 oranlarında artmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %7, %67, %134 ve %4 oranlarında artmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %3, %24, %60 oranlarında artmış, %33 oranında azalmıştır.

Tablo 3.37'de %8 Na₂O oranlı ponza içerikli AAYFC numunelerinin, %70 YFC + %10 P numunesi ve %70 YFC + %10 P Ms=0.5, Ms=0.75 ve Ms=1.00 olan numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi olan %80 YFC ile kıyaslandığında sırasıyla %41 oranında azalmış, %68, %164 oranlarında artmış, %27 oranında azalmış, 28 günlük değerler ise sırasıyla %2 oranında azalmış, %64, %135 oranlarında artmış, %47 oranında azalmış, 90 günlük değerler ise sırasıyla %6 oranında azalmış, %16 ve %60 oranlarında artmış, %64 oranında azalmıştır.

Tablo 3.37. AAYFC+P içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının referans numunelerle karşılaştırılması (MPa)

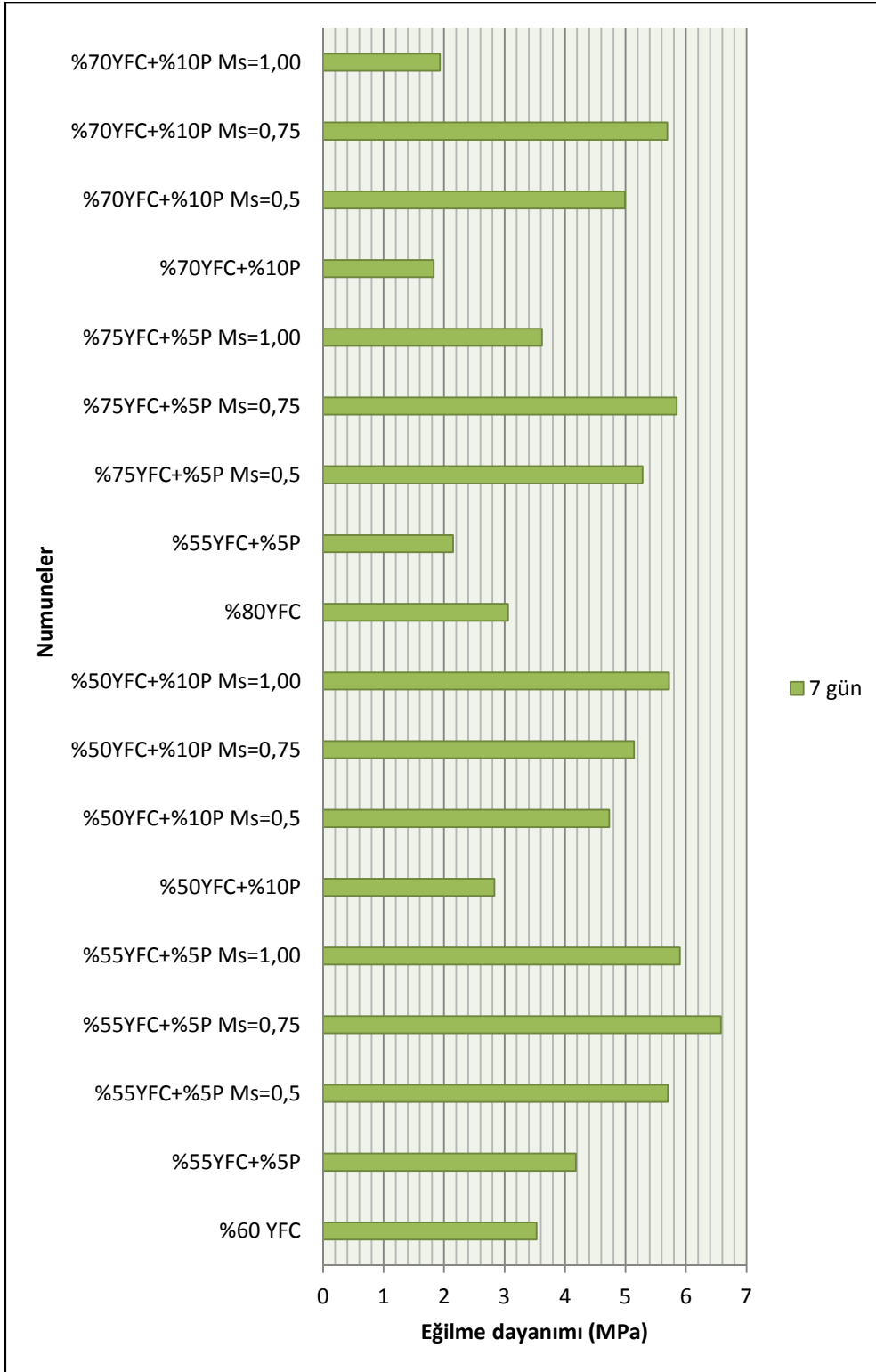
Numune (AAYFC+P)	7 Gün	Bağıl değer**	28 Gün	Bağıl değer**	90 Gün	Bağıl değer**
%60 YFC*	13.94	1.00	32.25	1.00	40.70	1.00
%55YFC+%5P***	17.65	1.27	33.00	1.02	44.90	1.10
%55YFC+%5P $M_S=0.50$	13.17	0.94	24.45	0.76	32.10	0.79
%55YFC+%5P $M_S=0.75$	14.98	1.07	30.00	0.93	39.75	0.98
%55YFC+%5P $M_S=1.00$	18.91	1.36	31.2	0.97	42.20	1.04
%50YFC+%10P***	11.74	0.84	23.05	0.71	34.55	0.85
%50YFC+%10P $M_S=0.50$	17.77	1.27	26.55	0.82	33.40	0.82
%50YFC+%10P $M_S=0.75$	18.80	1.35	31.15	0.97	38.90	0.96
%50YFC+%10P $M_S=1.00$	20.30	1.46	31.4	0.97	39.60	0.97
%80YFC*	11.2	1.00	17.88	1.00	32.05	1.00
%75YFC+%5P***	7.07	0.63	19.10	1.07	33.00	1.03
%75YFC+%5P $M_S=0.50$	19.65	1.75	29.85	1.67	39.80	1.24
%75YFC+%5P $M_S=0.75$	28.30	2.53	41.90	2.34	51.30	1.60
%75YFC+%5P $M_S=1.00$	16.50	1.47	18.52	1.04	21.50	0.67
%70YFC+%10P***	6.64	0.59	18.25	1.02	30.00	0.94
%70YFC+%10P $M_S=0.50$	18.87	1.68	29.25	1.64	37.20	1.16
%70YFC+%10P $M_S=0.75$	29.55	2.64	42.00	2.35	51.40	1.60
%70YFC+%10P $M_S=1.00$	8.15	0.73	9.45	0.53	11.41	0.36

* Referans numuneler

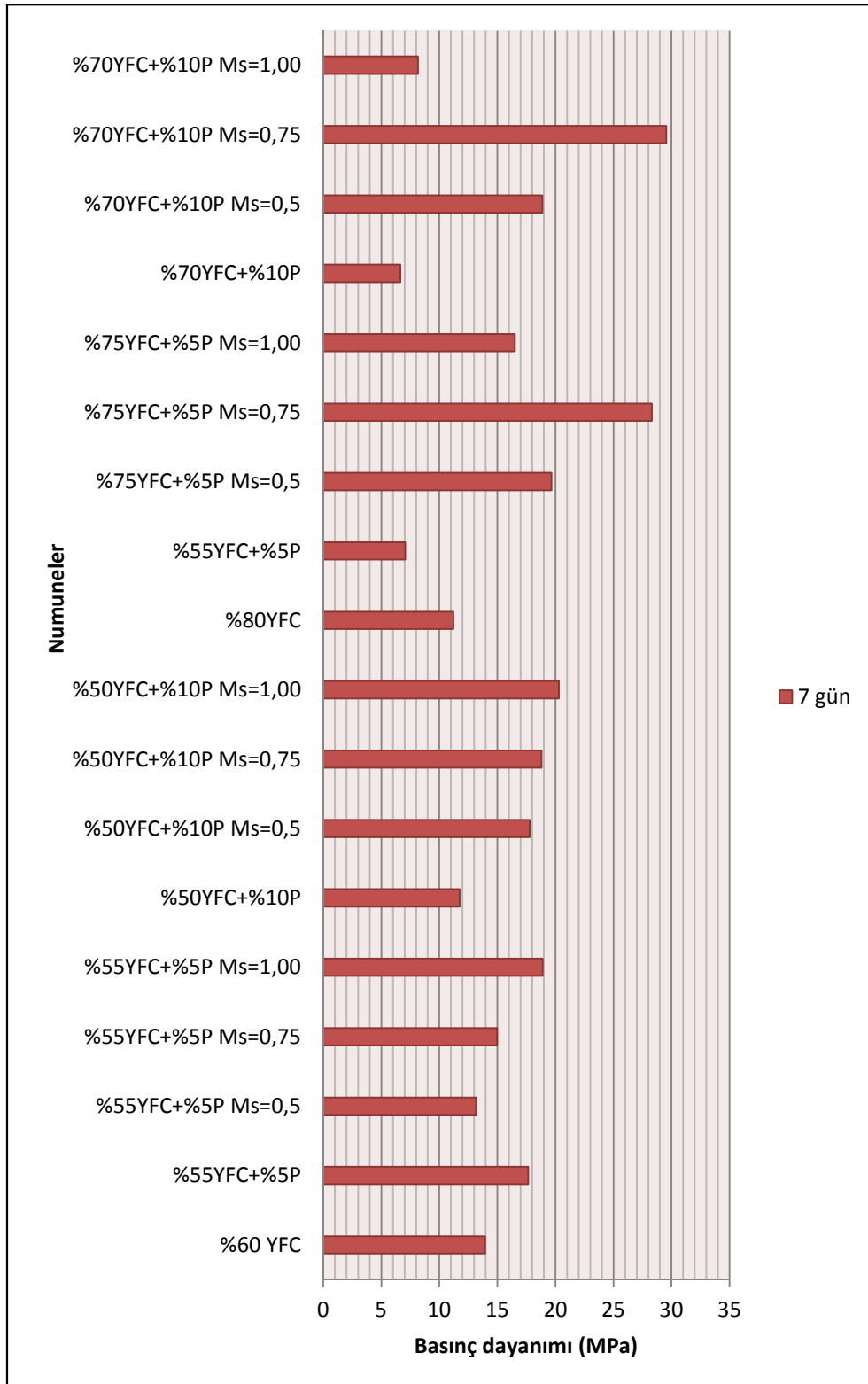
**Referans numunelerin değerlerini 1.00 kabul ederek birbirleriyle karşılaştırılması

***Alkali aktive edilmemiş ponza içerikli referans numuneler

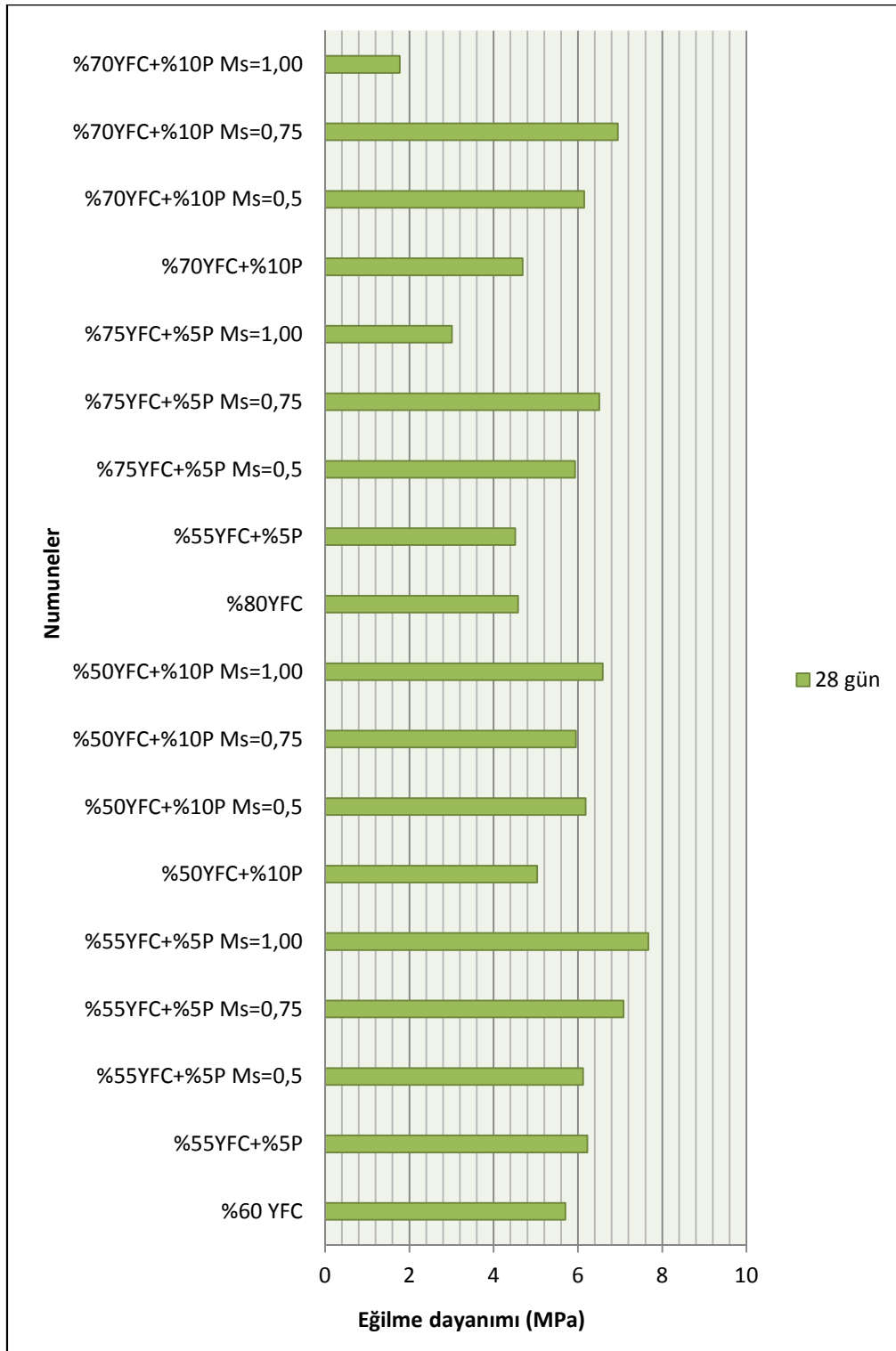
Şekil 3.51 ve Şekil 3.52’de 7 günlük en yüksek eğilme ve basınç dayanım değerleri %70 YFC + %10 UK, $M_S=0.75$ ve %75 YFC + %5 UK, $M_S=0.75$ olan numunelerden elde edilmiştir. Aynı durum Şekil 3.53, 3.54, 3.55 ve 3.56’da söz konusudur.



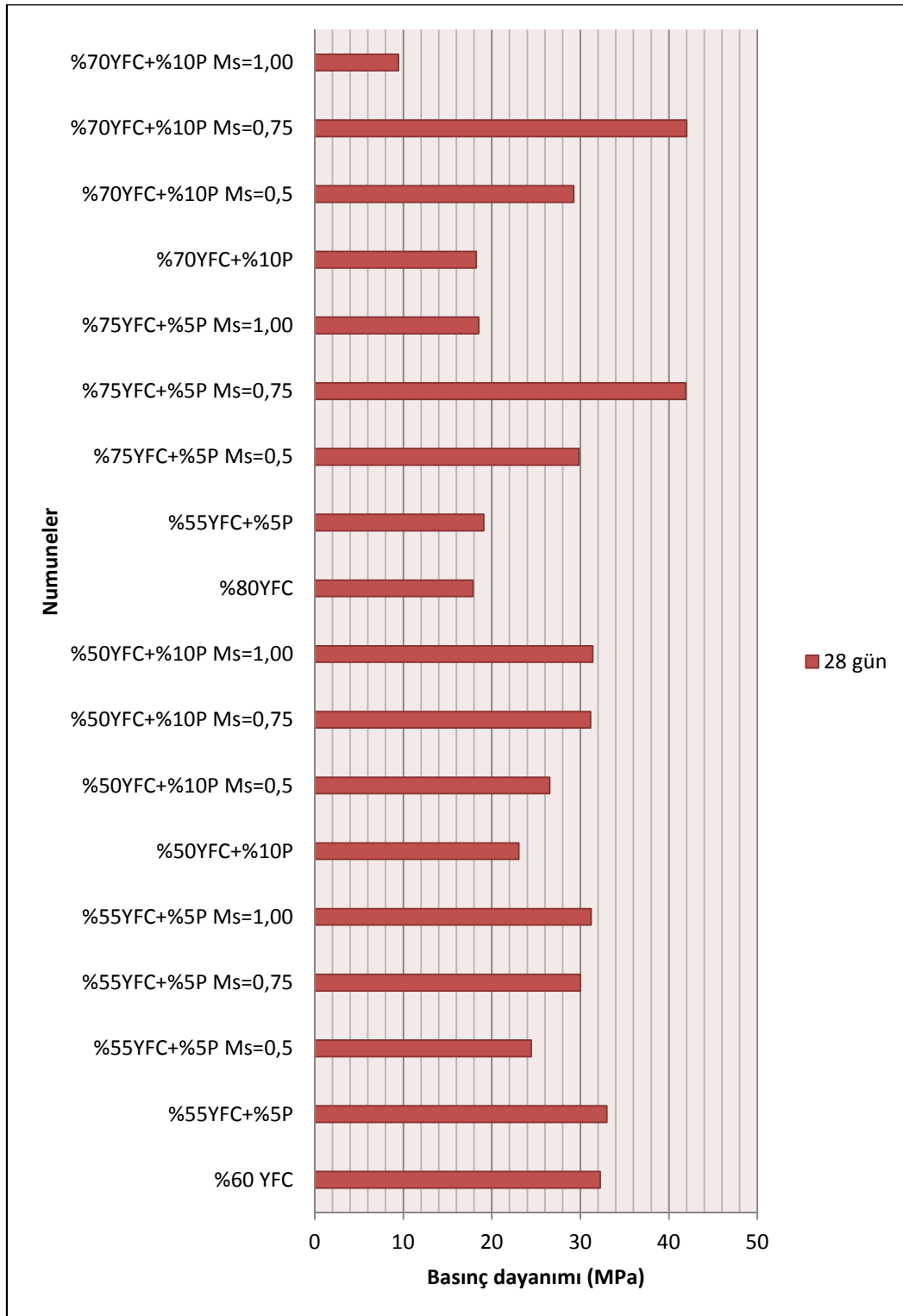
Şekil 3.51. AAYFC+P içerikli numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)



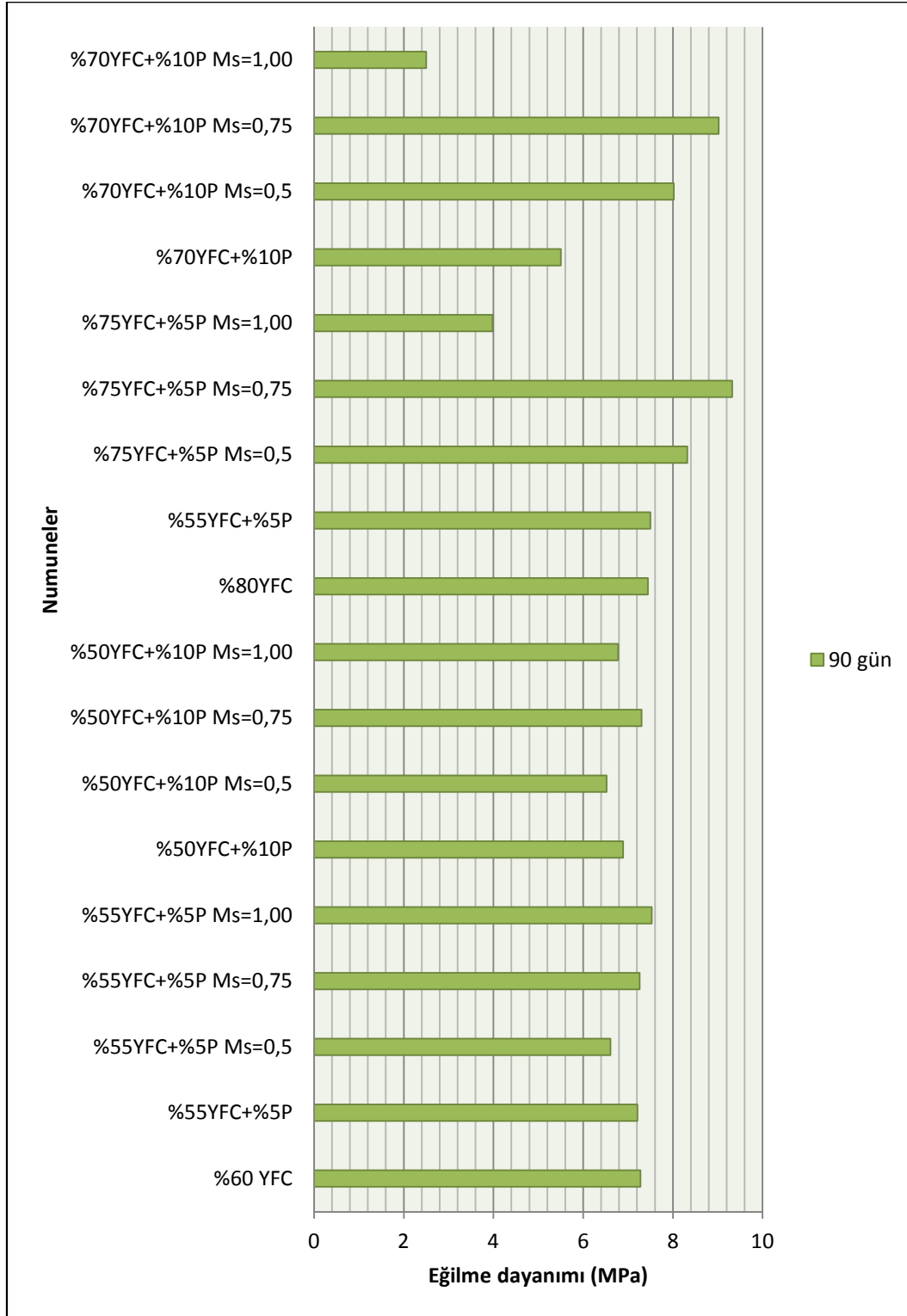
Şekil 3.52. AAYFC+P içerikli numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)



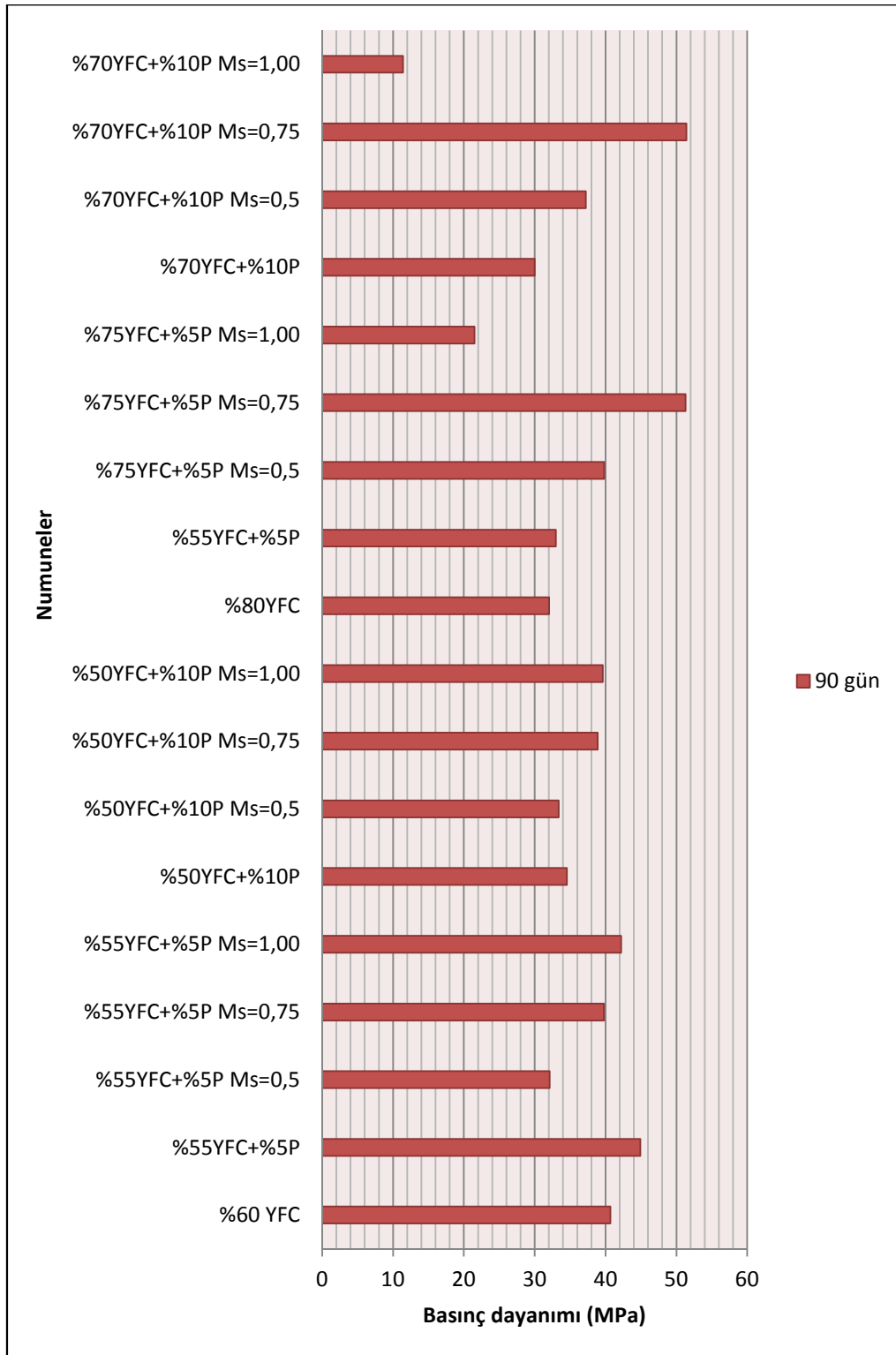
Şekil 3.53. AAYFC+P içerikli numunelerin 28 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)



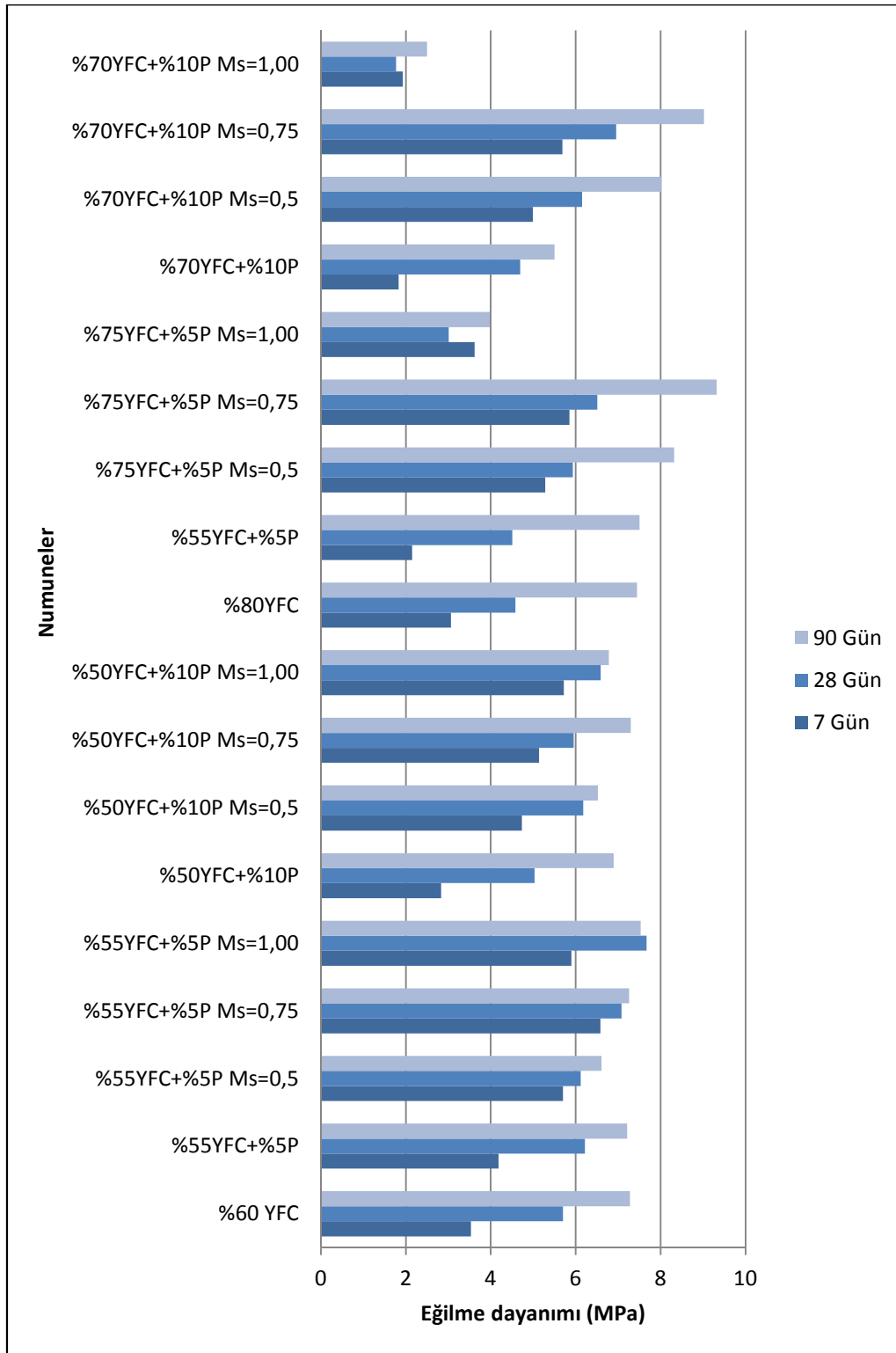
Şekil 3.54. AAYFC+P içerikli numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)



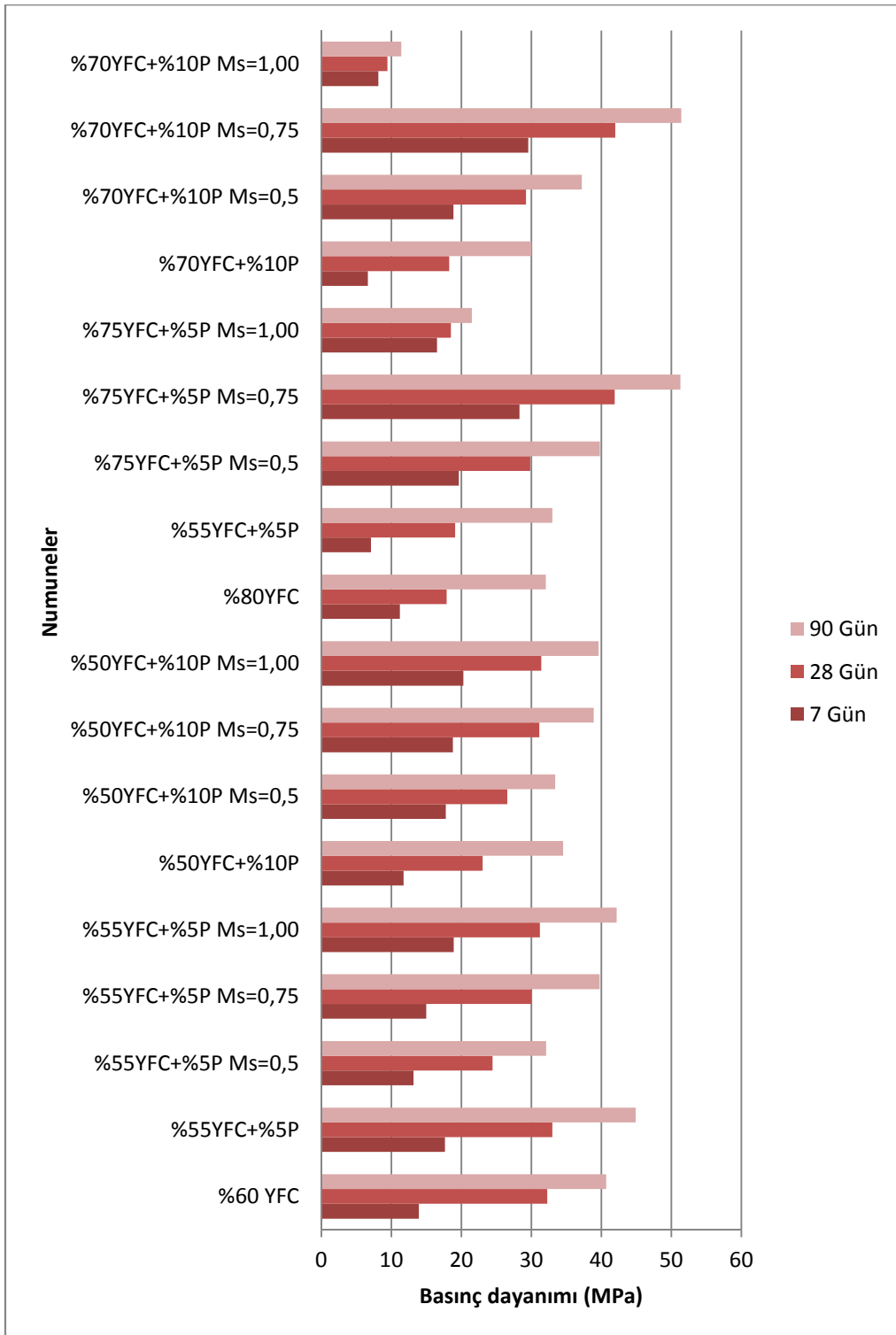
Şekil 3.55. AAYFC+P içerikli numunelerin 90 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.56. AAYFC+P içrikli numunelerin 90 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.57. AAYFC+P içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.58. AAYFC+P içerikli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri (MPa)

Şekil 3.57 ve Şekil 3.58'de 7, 28 ve 90 günlük elde edilen en iyi eğilme ve basınç dayanım değerleri kıyaslandığında %70 YFC + %10 UK, $M_s=0.75$ ve %75 YFC + %5 UK $M_s=0.75$ olan numunelerden elde edilmiştir

Ponza içerikli numunelerinin dayanım değerleri, ponza içermeyen (%8 Na₂O oranlı AAYFC) numunelerle kıyaslandığında hemen hemen aynı değerler elde edildiği ancak uçucu kül içerikli numunelerle kıyaslandığında ponza içerikli numunelerin biraz daha olumlu bir etki sağladığı anlaşılmış olup aynı oranlarda yeniden elde edilen numunelerde dayanıklılık deneyleri incelenmiştir.

3.7. Deneysel Çalışmalarda Dördüncü Aşama

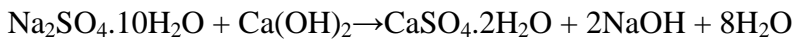
3.7.1. Sülfat etkisi

Türk standartlarında betonun sülfata karşı dayanıklılığının tespitine yönelik bir deney yöntemi bulunmamaktadır. Amerikan standartlarına göre çimento esaslı kompozitlerin sülfat direnci, çimento harcı örnekleri üzerinde deneyler yapılarak belirlenmektedir (ASTM C1012, ASTM C452, ASTM C1038). Beton için standartlaşmış bir deney yoktur. Betonun sülfata karşı dayanıklılığını tespit için kullanılan yöntemler, Na₂SO₄, MgSO₄, CaSO₄ çözeltilerinde veya bunların karıştırıldığı çözeltilerde bekletme prensibine dayanır.

Sülfat iyonları;



Alçıtaşı

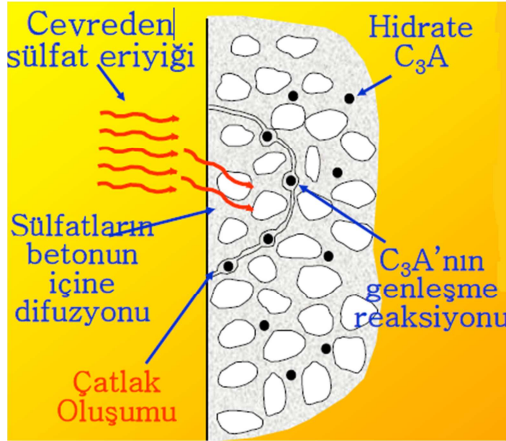


Alçıtaşı



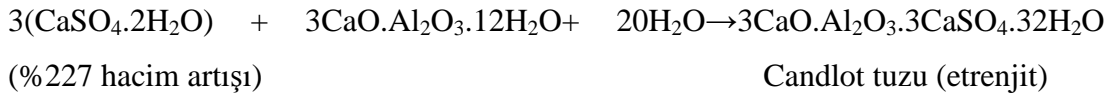
Alçıtaşı

Etrenjit oluşumu; alçıtaşının yanı sıra sülfat etkisiyle de meydana gelen kimyasal reaksiyonlar arasındadır (Şekil 3.59) [5].

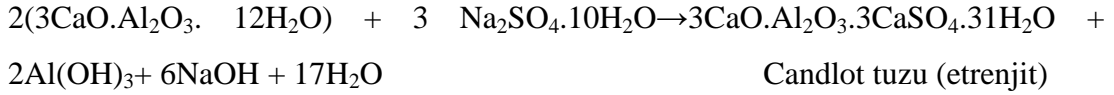


Şekil 3.59. Sülfat iyonlarının betona sızması sonucu C_3A 'nın genişmesi ile etrenjit oluşumu [5]
 C_3A ile oluşan reaksiyonlar;

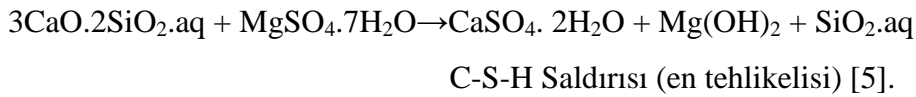
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$



Na_2SO_4



$MgSO_4$



Çimentoda kullanılan $SO_3 < \%3$, $C_3A < \%5$ olmalıdır.

Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü (AAYFC) betonları, CEM I'li betonlara göre daha geçirimsiz, boşluksuz, agrega ve matris ara yüzeyi daha iyi olduğu için sülfat gibi dış etkilere daha dayanıklıdır.

Ponza ve uçucu kül içerikli olarak üretilen harç numuneleri 90 günlük su kürüne tabi olup, en iyi basınç dayanımı değerlerini veren oranlar belirlenmiştir. Durabilite deneyleri; bu belirlenen oranlar kullanılarak aynı bileşenlerle yeniden üretilen harç

numuneleri üzerinde yapılmıştır. Harç karışımları %10 magnezyum sülfat ($MgSO_4$, $pH=7.44$) ve %10 sodyum sülfat (Na_2SO_4 , $pH=8.16$) içerikli hazırlanan bu çözeltiler içerisinde 90 ve 180 gün bekletildikten sonra basınç dayanım değerleri belirlenmiş olup aşağıdaki tablo ve grafiklerde gösterilmiştir. Çözeltiler 2-3 haftada bir yenilenecek tekrar hazırlanmıştır (Şekil 3.60).



Şekil 3.60. Sülfatlı sularda bekletilen numuneler

Tablo 3.38’de sülfatlı sularda bekletilen numunelerin 90 günlük basınç dayanım değerlerinin sodyum sülfat çözeltilerinin (Na_2SO_4), magnezyum sülfat çözeltileri ($MgSO_4$) ile kıyaslanması sonucu magnezyum sülfat çözeltisinin tahrip edici etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durumda magnezyum sülfat çözeltisinin dayanıma olumsuz etkisinin fazla olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 3.38. Sülfatlı çözeltiler içerisinde bekletilen 90 günlük numunelerin basınç dayanımları (Mpa)

Numune Cinsi	90 Gün su kürü	Na_2SO_4 Çözeltisi	$MgSO_4$ Çözeltisi	$Na_2SO_4/MgSO_4$
%60 YFC*	40.70	50.10	46.80	1.07
%80 YFC*	32.05	44.30	39.20	1.13
%6 Na_2O %80YFC $M_s=0.50$	25.65	23.80	23.50	1.01
%6 Na_2O %80YFC $M_s=0.75$	30.20	28.80	30.20	0.95
%6 Na_2O %80YFC $M_s=1.00$	36.90	35.50	35.30	1.01
%7 Na_2O %80YFC $M_s=0.50$	28.80	35.80	35.10	1.02

Tablo 3.38. Sülfatlı çözeltiler içerisinde bekletilen 90 günlük numunelerin basınç dayanımları (Mpa)'nın (devamı)

%7Na ₂ O %80YFC M _S =0.75	35.40	47.50	44.70	1.06
%7Na ₂ O %80YFC M _S =1.00	54.90	54.00	47.40	1.14
%8 Na ₂ O %60YFC M _S =0.50	33.90	37.10	35.20	1.05
%8 Na ₂ O %60YFC M _S =0.75	37.60	44.00	43.80	1.00
%8 Na ₂ O %60YFC M _S =1.00	38.90	42.60	38.90	1.10
%8 Na ₂ O %80YFC M _S =0.50	36.40	45.90	44.70	1.03
%8 Na ₂ O %80YFC M _S =0.75	50.70	44.60	39.90	1.12
%8 Na ₂ O %80YFC M _S =1.00	16.61	32.50	32.80	0.99
%8Na ₂ O, %75YFC+%5Ponza**	33.00	37.50	34.90	1.07
%8Na ₂ O, %75YFC+%5P M _S =0.50	39.80	44.90	45.00	1.00
%8Na ₂ O, %75YFC+%5P M _S =0.75	51.30	50.00	47.60	1.05
%8Na ₂ O, %75YFC+%5P M _S =1.00	21.50	40.60	12.04	3.37
%8Na ₂ O, %70YFC+%10Ponza**	30.00	37.10	34.20	1.08
%8Na ₂ O,%70YFC+%10P M _S =0.50	37.20	36.10	37.10	0.97
%8Na ₂ O,%70YFC+%10P M _S =0.75	51.40	52.80	44.10	1.20
%8Na ₂ O,%70YFC+%10P M _S =1.00	11.41	18.44	1.97	9.36
%8Na ₂ O,%75YFC+%5UçucuKül**	37.00	33.70	31.40	1.07
%8Na ₂ O,%75YFC+%5UK,M _S =0.50	39.20	39.70	37.60	1.06
%8Na ₂ O,%75YFC+%5UK,M _S =0.75	47.30	46.60	44.60	1.04
%8Na ₂ O,%75YFC+%5UK, M _S =1.00	35.30	28.50	7.89	3.61
%8Na ₂ O,%70YFC+%10UçucuKül**	34.80	32.40	28.70	1.13
%8Na ₂ O, %70YFC+%10UK M _S =0.50	40.40	36.30	33.40	1.09
%8Na ₂ O,%70YFC+%10UK M _S =0.75	47.40	45.00	42.20	1.07
%8Na ₂ O,%70YFC+%10UK M _S =1.00	21.50	16.72	1.89	8.85

*=Referans numuneler

**= Alkali aktive edilmemiş ponza veya uçucu kül içerikli referans numuneler.

Tablo 3.39'da Sodyum sülfatlı suda bekletilen %60 ve %80 YFC içerikli numunelerin basınç mukavemetleri, suda bekletilen şahit numunelerle kıyaslanması sonucunda sırasıyla %23 ve %38 oranlarında artmıştır. %6 Na₂O oranlı %80 YFC içerikli M_S=0.5-0.75-1.00 olan numunelerin basınç dayanım değerleri referans

numuneleri ile kıyaslandığında sırasıyla %7, %5 ve %4 oranlarında azalmıştır. %7 Na₂O oranlı %80 YFC içerikli M_S=0.5-0.75-1.00 olan numunelerin basınç dayanım değerleri sırasıyla %24, %34 oranlarında artmış ve %2 oranında azalmıştır. %8 Na₂O oranlı %60 YFC içerikli M_S=0.5-0.75-1.00 olan numunelerin basınç dayanım değerleri sırasıyla %9, %17 ve %10 oranlarında artmıştır. %8 Na₂O oranlı %80 YFC içerikli M_S=0.5-0.75-1.00 olan numunelerin basınç dayanım değerleri sırasıyla %26 artmış, %12 azalmış ve %96 oranlarında artmıştır. %8 Na₂O oranlı %75 YFC + %5 P içerikli referans numune %14 oranında artmıştır. M_S=0.5-0.75-1.00 olan numunelerin basınç dayanım değerleri sırasıyla %13 artmış, %3 azalmış ve %89 oranlarında artmıştır. %8 Na₂O oranlı %70 YFC + %10 P içerikli referans numune %24 oranında artmıştır. M_S=0.5-0.75-1.00 olan numunelerin basınç dayanım değerleri sırasıyla %3 azalmış, %3 ve %62 oranlarında artmıştır. %8 Na₂O oranlı %75 YFC + %5 UK içerikli referans numune %9 oranında azalmıştır. M_S=0.5-0.75-1.00 olan numunelerin basınç dayanım değerleri sırasıyla %1 artmış, %1 ve %19 oranlarında azalmıştır. %8 Na₂O oranlı %70 YFC + %10 UK içerikli referans numune %7 oranında azalmıştır. M_S=0.5-0.75-1.00 olan numunelerin basınç dayanım değerleri sırasıyla %10, %6 ve %22 oranlarında azalmıştır.

Tablo 3.39’da Magnezyum sülfatlı suda bekletilen %60 ve %80 YFC içerikli numunelerin basınç mukavemetleri, suda bekletilen şahit numunelerle kıyaslanması sonucunda sırasıyla %15 ve %22 oranlarında artmıştır. %6 Na₂O oranlı %80 YFC içerikli M_S=0.5-0.75-1.00 olan numunelerin basınç dayanım değerleri referans numuneleri ile kıyaslandığında sırasıyla %8 azalmış, bu numune referans numunesi ile aynı değerler yakalanmış, %4 oranlarında azalmıştır. %7 Na₂O oranlı %80 YFC içerikli M_S=0.5-0.75-1.00 olan numunelerin basınç dayanım değerleri sırasıyla %22, %26 oranlarında artmış ve %14 oranında azalmıştır. %8 Na₂O oranlı %60 YFC içerikli M_S=0.5-0.75-1.00 olan numunelerin basınç dayanım değerleri sırasıyla %4 ve %16 oranlarında artmış, bu numune referans numunesi ile aynı değerler yakalanmıştır. %8 Na₂O oranlı %80 YFC içerikli M_S=0.5-0.75-1.00 olan numunelerin basınç dayanım değerleri sırasıyla %23 artmış, %21 azalmış ve %97 oranlarında artmıştır. %8 Na₂O oranlı %75 YFC + %5 P içerikli referans numune %6 oranında artmıştır. M_S=0.5-0.75-1.00 olan numunelerin basınç dayanım değerleri

sırasıyla %13 artmış, %7 ve %44 oranlarında azalmıştır. %8 Na₂O oranlı %70 YFC + %10 P içerikli referans numune %14 oranında artmıştır. M_S=0.5-0.75-1.00 olan numunelerin basınç dayanım değerleri sırasıyla bu numune referans numunesi ile aynı değerler yakalanmıştır, %14 ve %83 oranlarında azalmıştır. %8 Na₂O oranlı %75 YFC + %5 UK içerikli referans numune %15 oranında azalmıştır. M_S=0.5-0.75-1.00 olan numunelerin basınç dayanım değerleri sırasıyla %4, %6 ve %78 oranlarında azalmıştır. %8 Na₂O oranlı %70 YFC + %10 UK içerikli referans numune %18 oranında azalmıştır. M_S=0.5-0.75-1.00 olan numunelerin basınç dayanım değerleri sırasıyla %17, %22 ve %99 oranlarında azalmıştır.

Bununla birlikte sülfatlı çözeltiler içinde bekletilen bazı numunelerin özellikle ponza içerikli numunelerin dayanım değerlerinin suda bekletilen referans numunelere göre değerleri fazla çıkmıştır. Bu durumu değerlendirmek gerekirse; AAYFC hamurları, CEM I hamurlarına kıyasla daha düşük boyutlu boşluklara sahiptir. Sonuç olarak AAYFC hamurlarının geçirimsizliği CEM I hamurlarına kıyasla daha düşüktür ve zararlı iyonların girişine karşı AAYFC'yi korur.

Tablo 3.39. Sülfatlı çözeltiler içerisinde bekletilen 90 günlük numunelerin basınç dayanımlarının referans numunelerle (90 gün su içinde bekletilen) karşılaştırılması (Mpa)

Numune Cinsi	Na ₂ SO ₄ Çözeltisi	MgSO ₄ Çözeltisi
%60 YFC*	1.23	1.15
%80 YFC*	1.38	1.22
%6Na ₂ O %80YFC M _S =0.50	0.93	0.92
%6Na ₂ O %80YFC M _S =0.75	0.95	1.00
%6 Na ₂ O%80YFC M _S =1.00	0.96	0.96
%7Na ₂ O %80YFC M _S =0.50	1.24	1.22
%7Na ₂ O %80YFC M _S =0.75	1.34	1.26
%7Na ₂ O %80YFC M _S =1.00	0.98	0.86
%8 Na ₂ O %60YFC M _S =0.50	1.09	1.04
%8 Na ₂ O %60YFC M _S =0.75	1.17	1.16
%8 Na ₂ O %60YFC M _S =1.00	1.10	1.00
%8 Na ₂ O %80YFC M _S =0.50	1.26	1.23

Tablo 3.39. Sülfatlı çözeltiler içerisinde bekletilen 90 günlük numunelerin basınç dayanımlarının referans numunelerle (90 gün su içinde bekletilen) karşılaştırılması (Mpa)'nın (devamı)

%8 Na ₂ O %80YFC M _S =0.75	0.88	0.79
%8 Na ₂ O %80YFC M _S =1.00	1.96	1.97
%8Na ₂ O, %75YFC+%5Ponza**	1.14	1.06
%8Na ₂ O, %75YFC+%5P M _S =0.50	1.13	1.13
%8Na ₂ O, %75YFC+%5P M _S =0.75	0.97	0.93
%8Na ₂ O, %75YFC+%5P M _S =1.00	1.89	0.56
%8Na ₂ O, %70YFC+%10Ponza**	1.24	1.14
%8Na ₂ O,%70YFC+%10P M _S =0.50	0.97	1.00
%8Na ₂ O,%70YFC+%10P M _S =0.75	1.03	0.86
%8Na ₂ O,%70YFC+%10P M _S =1.00	1.62	0.17
%8Na ₂ O,%75YFC+%5UçucuKül**	0.91	0.85
%8Na ₂ O,%75YFC+%5UK,M _S =0.50	1.01	0.96
%8Na ₂ O,%75YFC+%5UK,M _S =0.75	0.99	0.94
%8Na ₂ O,%75YFC+%5UK, M _S =1.00	0.81	0.22
%8Na ₂ O,%70YFC+%10UçucuKül**	0.93	0.82
%8Na ₂ O,%70YFC+%10UK,M _S =0.50	0.90	0.83
%8Na ₂ O,%70YFC+%10UK M _S =0.75	0.94	0.88
%8Na ₂ O,%70YFC+%10UK M _S =1.00	0.78	0.09

*=Referans numuneler

**= Alkali aktive edilmemiş ponza veya uçucu kül içerikli referans numuneler.

Tablo 3.40.' da ise; AAYFC+P ve alkali içermeyen ponzalı karışımlarda da Tablo 3.38' deki gibi iyi dayanımlar elde edilmiştir. Ponzanın da sülfatlı sularda iyi direnç sağladığı hatta AAYFC'li harçlar gibi basınç dayanım değerlerinin referans numunelerden daha fazla olduğu görülmüştür. Uçucu kül içeren numuneler ise sülfatlı sulara iyi direnç göstermiş ama referans numunelerden daha iyi sonuçlar vermemiştir.

Tablo 3.40. Sülfatlı çözeltiler içerisinde bekletilen 180 günlük numunelerin basınç dayanımlarının birbirleriyle kıyaslanması (Mpa)

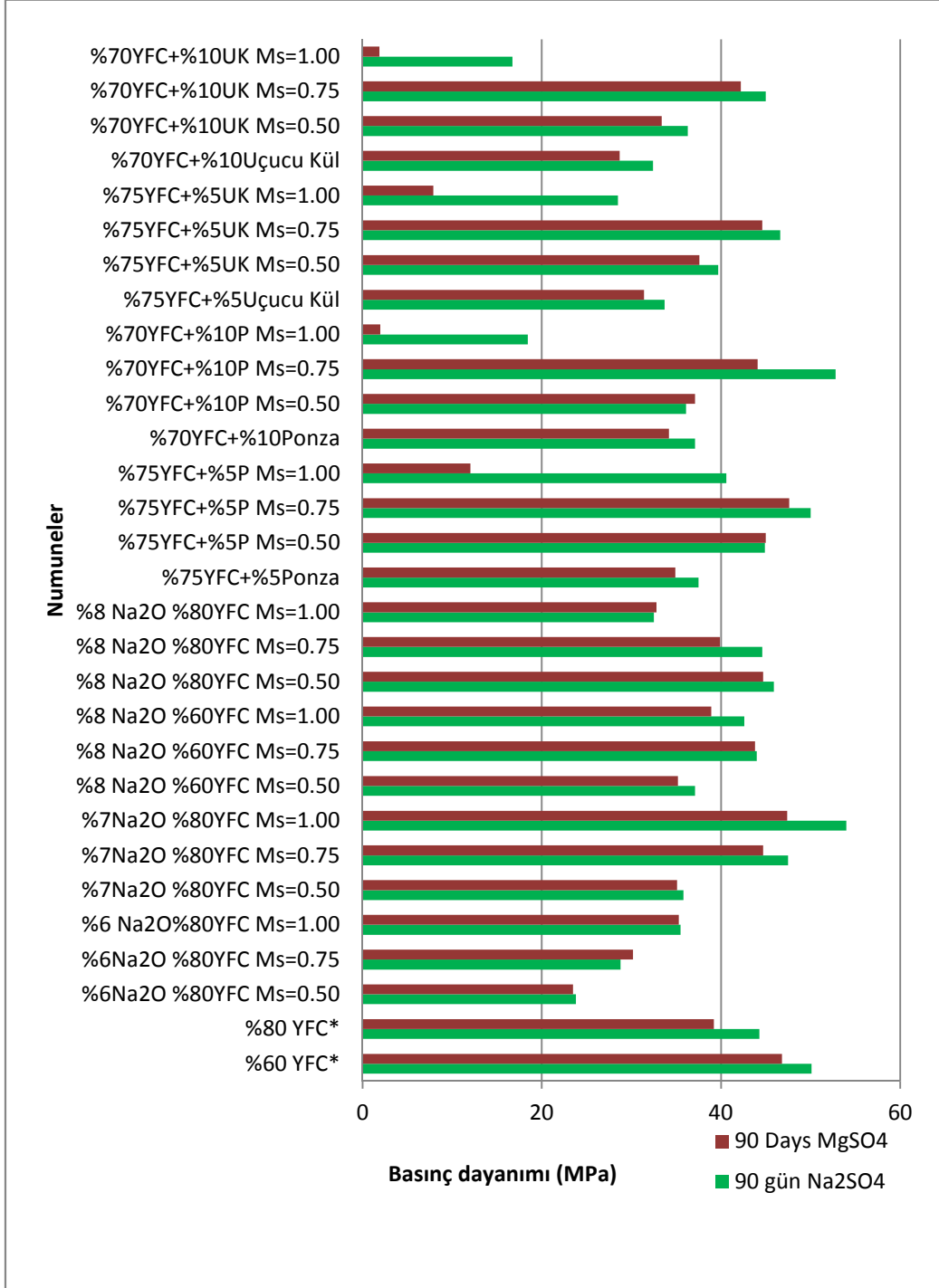
Numune Cinsi	Na ₂ SO ₄ Çözeltisi	MgSO ₄ Çözeltisi	Na ₂ SO ₄ /MgSO ₄
%60 YFC*	51.20	47.00	1.09
%80 YFC**	44.40	40.40	1.10
%6Na ₂ O %80YFC M _S =0.50	31.55	32.30	0.98
%6Na ₂ O %80YFC M _S =0.75	39.85	42.60	0.94
%6 Na ₂ O%80YFC M _S =1.00	45.75	40.65	1.13
%7Na ₂ O %80YFC M _S =0.50	42.25	45.90	0.92
%7Na ₂ O %80YFC M _S =0.75	53.30	40.80	1.31
%7Na ₂ O %80YFC M _S =1.00	60.50	46.35	1.31
%8 Na ₂ O %60YFC M _S =0.50	39.60	48.65	0.81
%8 Na ₂ O %60YFC M _S =0.75	50.15	49.35	1.02
%8 Na ₂ O %60YFC M _S =1.00	48.40	38.40	1.26
%8 Na ₂ O %80YFC M _S =0.50	52.45	33.90	1.55
%8 Na ₂ O %80YFC M _S =0.75	51.40	30.90	1.66
%8 Na ₂ O %80YFC M _S =1.00	42.90	41.70	1.03
%75YFC+%5Ponza**	41.00	36.00	1.14
%75YFC+%5P M _S =0.50	49.50	47.60	1.04
%75YFC+%5P M _S =0.75	54.50	38.70	1.41
%75YFC+%5P M _S =1.00	38.50	11.16	3.45
%70YFC+%10Ponza**	34.20	35.00	0.98
%70YFC+%10P M _S =0.50	17.90	40.30	0.44
%70YFC+%10P M _S =0.75	58.40	43.30	1.35
%70YFC+%10P M _S =1.00	44.80	Parçalandı	-
%75YFC+%5Uçucu Kül**	39.10	37.00	1.05
%75YFC+%5UK M _S =0.50	45.00	42.20	1.07
%75YFC+%5UK M _S =0.75	48.60	47.01	1.03
%75YFC+%5UK M _S =1.00	22.00	Parçalandı	-
%70YFC+%10Uçucu Kül**	35.10	34.40	1.02
%70YFC+%10UK M _S =0.50	42.20	35.45	1.19
%70YFC+%10UK M _S =0.75	50.40	43.24	1.16
%70YFC+%10UK M _S =1.00	19.60	Parçalandı	-

*=Referans numuneler

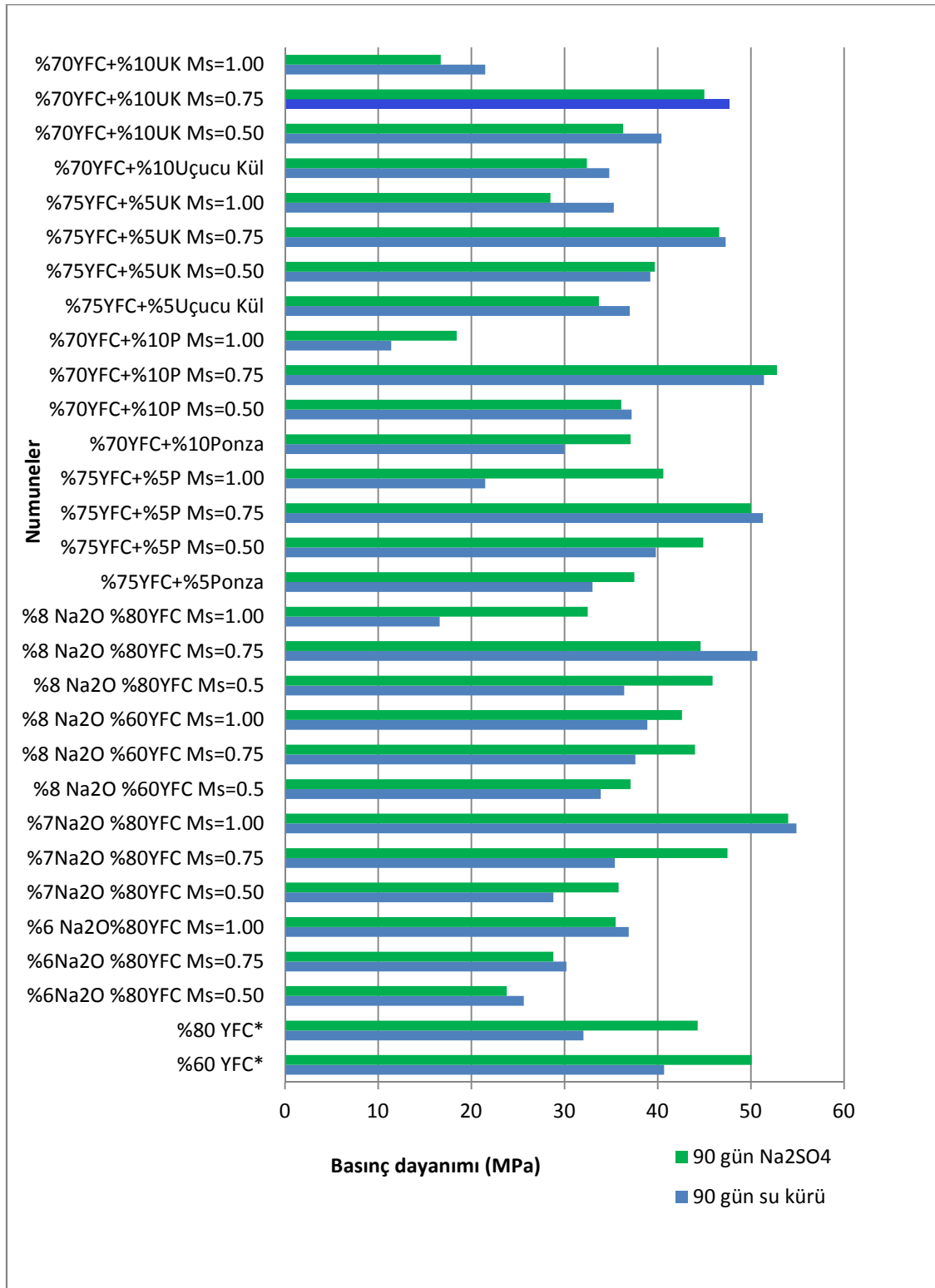
**= Alkali aktive edilmemiş ponza veya uçucu kül içerikli referans numuneler

Şekil 3.61’de 90 gün sülfatlı sularda bekletilen numuneler arasında en iyi basınç dayanım değerlerini %7 Na₂O %80 YFC M_S=1.00 ve %8 Na₂O %70 YFC + %10 P M_S=0.75 olan numuneler sağlamıştır. Şekil 3.62’de 90 gün su içinde ve sodyum

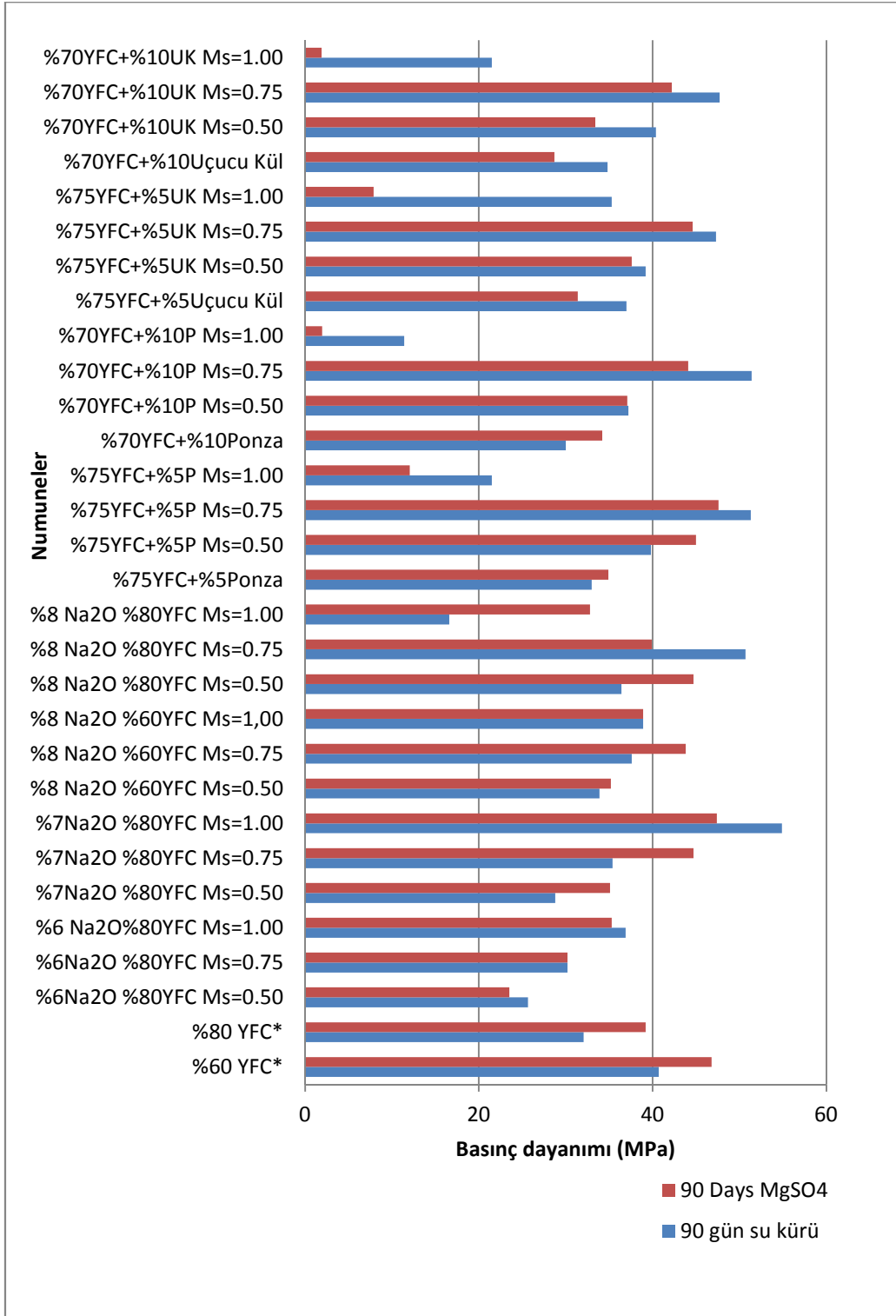
sülfatlı çözeltilerde en iyi basınç dayanımını veren numuneler arasında %8 Na₂O %70 YFC + %10 P M_s=0.75 olan numuneler sağlamıştır. Şekil 3.63'deki grafikte de benzer sonuçlar elde edilmiştir.



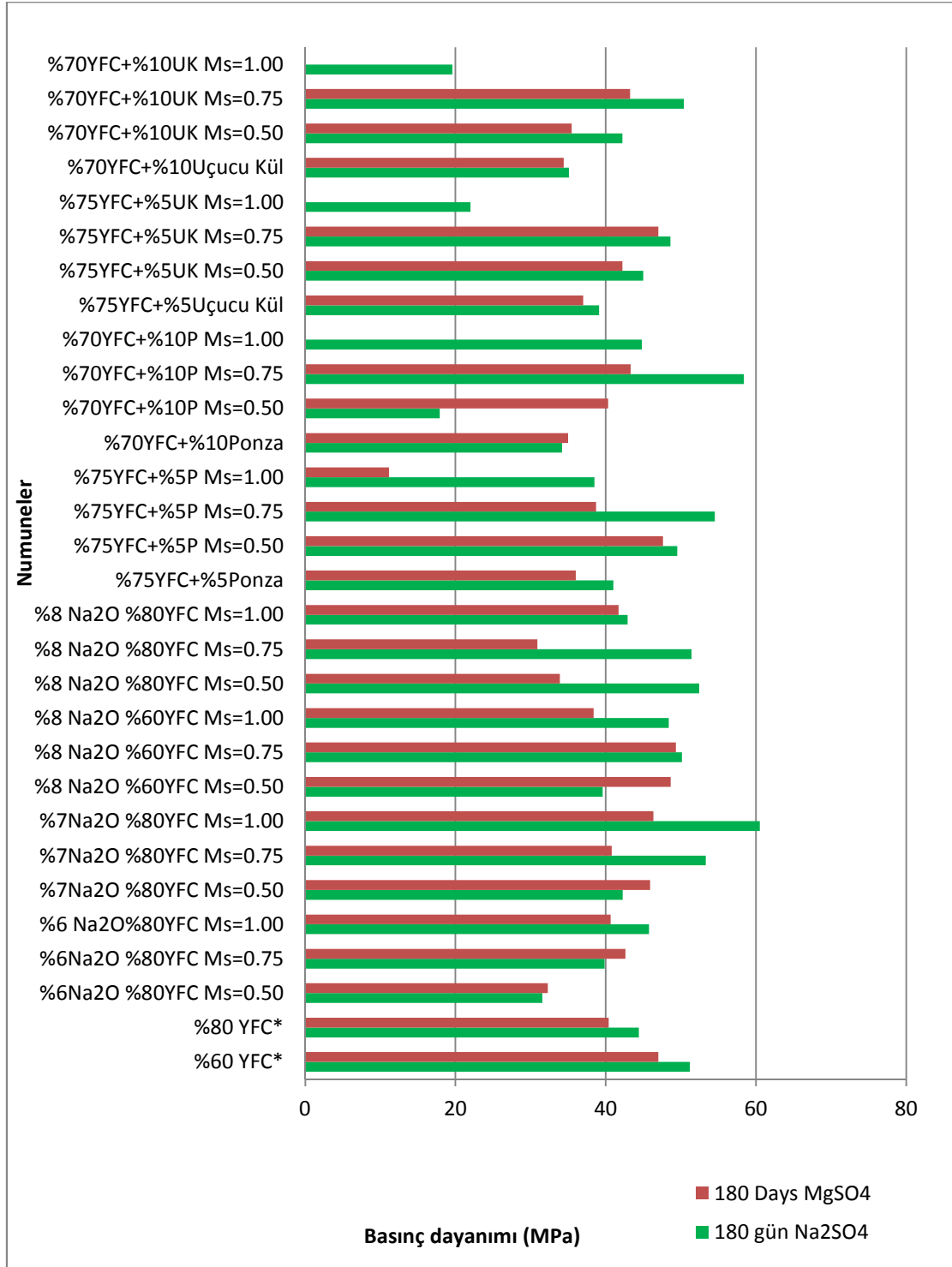
Şekil 3.61. AAYFC, AAYFC+P ve AAYFC+UK içerikli numunelerin Na₂SO₄ ve Mg SO₄ çözeltileri içinde 90 gün bekletilerek elde edilen basınç dayanım değerleri (MPa)



Şekil 3.62. Na_2SO_4 çözeltisi içerisinde bekletilen 90 günlük numunelerin basınç dayanımları (MPa)



Şekil 3.63 MgSO₄ çözeltisi içerisinde bekletilen 90 günlük numunelerin basınç dayanımları (MPa)



Şekil 3.64. Sülfatlı çözeltiler içerisinde bekletilen 180 günlük numunelerin basınç dayanımlarının birbirleriyle kıyaslanması (MPa)

Şekil 3.64'de ise 180 günlük çözeltilerde bekletilen numuneler arasında en iyi basınç dayanım sonucunu veren numuneler %70 YFC + %10 P $M_s=0.75$ ve %7 Na₂O %80 YFC $M_s=1.00$ olan numuneler vermiştir.

%7 ve 8 Na₂O içerikli numunelerin basınç dayanım değerlerinin, sülfatlı suda bekletilmeleri sonucunda, suda bekletilen referans numunelerden daha fazla çıktığı gözlenmiştir. Bu durum Rashad ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada da sodyum sülfatın alkali aktivatör olarak kullanılması sonucunda dayanım değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Ayrıca NaOH ve Na₂SiO₃ alkalilerin güçlü alkaliler olduğu yüksek dayanımlar elde edildiği ancak üretim proseslerinde çok enerji gerektirdiğini oysaki sodyum sülfat çözeltilerini doğadan elde edilebileceğini belirtmişlerdir [173].

CEM I hamurları yapısında ihtiva ettikleri portlandit (Ca(OH)₂) yapısından dolayı AAYFC betonlarına kıyasla ilave kalsiyuma sahiptir. AAYFC hamurları CEM I'ye kıyasla hemen hemen hiç kalsiyum hidroksite (Ca(OH)₂) sahip değildir. Bakharev ve arkadaşları tarafından Ca(OH)₂ varlığının sülfat saldırılarına karşı dayanıklılığını arttırdığı belirtilse de bu açıklama mevcut literatüre terstir. Neville (1995), sülfat etkilerine karşı dayanıklılığı arttırmak için genişleyen etrenjit oluşturması nedeniyle Ca(OH)₂ miktarının sınırlandırılması gerektiğini bildirmiştir. Ayrıca AAYFC hamurları, CEM I hamurlarına kıyasla daha düşük boyutlu boşluklara sahiptir. Sonuç olarak AAYFC hamurlarının geçirimsizliği CEM I hamurlarına kıyasla daha düşüktür ve zararlı iyonların girişine karşı AAYFC'yi korur [2].

3.7.2. Kuruma büzülmesi

En fazla kuruma büzülmesi AAYFC harçlarında görülür. Oysa CEM I'li betonlar priz alma sırasında daha fazla nem kaybeder. Bu durum bir çelişki gibi gözükmektedir. CEM I'li betonların poroziteleri AAYFC betonlarına göre daha fazladır. Yani CEM I'li betonların makro boşlukları AAYFC betonlarına göre daha fazladır. Ama AAYFC betonlarının mezo boşlukları CEM I'li betonlardan daha fazladır [174]. Bu durumu açıklamak gerekirse; AAYFC betonlarındaki mezo boşluklardan nem kapiler yolla azaldığından kuruma büzülmesi daha fazla oluşur [175].

Jin ve arkadaşları, AAYFC'li betonlarda cüruf ağırlığının %2.5 ve 7.5 oranlarında MgO kullanarak betonda oluşan kuruma büzülmesini önemli ölçüde azaltmışlar, buna bağlı olarak hidrasyon süresinin kısaldığını belirlemişlerdir [176].

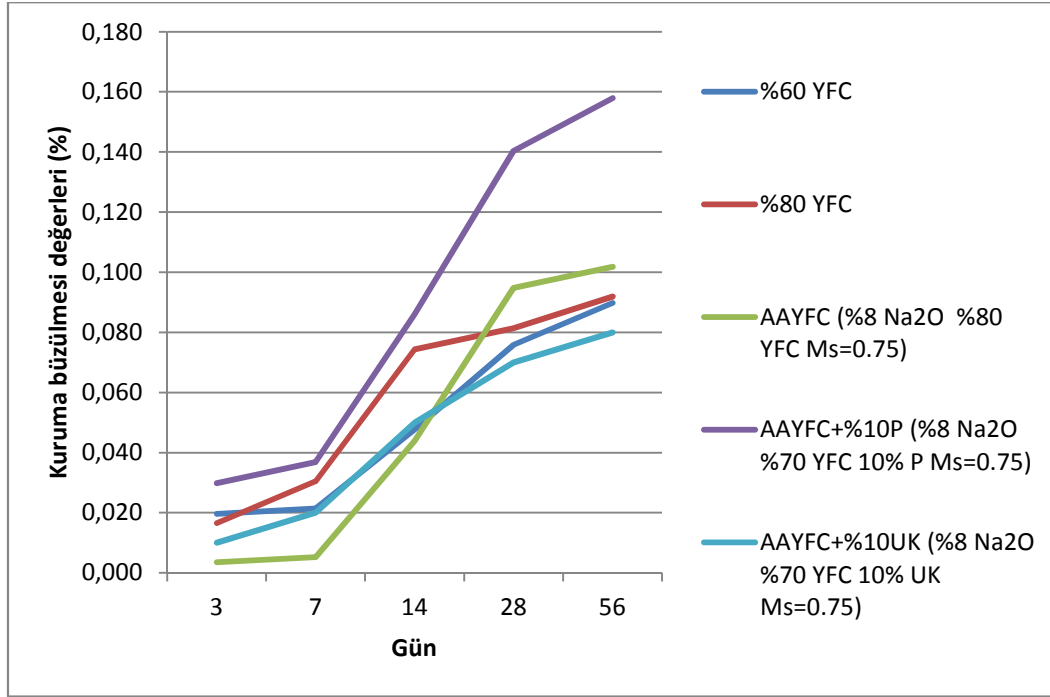


Şekil 3.65. Kuruma büzülmesi deneyi için üretilen numuneler

Durabilite ve dayanım deneylerinde en iyi sonucu veren numuneler üzerinde kuruma büzülmesi deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.65). %60YFC, %80YFC, AAYFC + %10 P (%8 Na₂O, %70 YFC + %10 Ponza, M_s=0,75) ve AAYFC+UK (%8 Na₂O, %70 YFC + %10 Uçucu kül, M_s=0,75) numunelerinin kuruma büzülmesi değerleri belirli aralıklarla ölçülmüş olup, Tablo 3.41 ve Şekil 3.66'daki grafikte gösterilmektedir.

Tablo 3.41. AAYFC, AAYFC+P ve AAYFC+UK içerikli numunelerin kuruma büzülmesi değerleri (x10⁻⁶ mm)

	%60 YFC	%80 YFC	%8 Na ₂ O %80 YFC M _s =0.75	%8 Na ₂ O %80 YFC %10P M _s =0.75
1 Günlük	2706	2632	2490	3200
3 Günlük	2650	2585	2480	3115
7 Günlük	2645	2545	2475	3095
14 Günlük	2570	2420	2365	2955
28 Günlük	2490	2400	2220	2800
56 Günlük	2480	2360	2200	2790



Şekil 3.66. AAYFC, AAYFC+P ve AAYFC+UK içerikli numunelerin kuruma büzülmesi değerleri

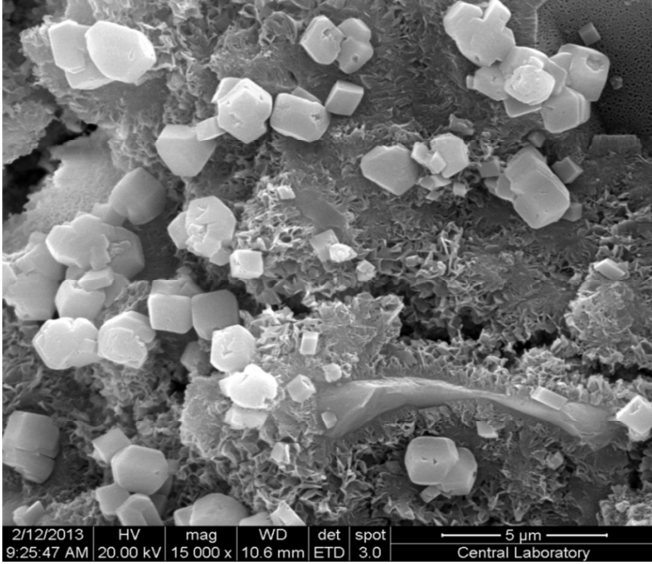
Şekil 3.66' daki grafikte; en fazla kuruma büzülmesi AAYFC+%10P içeren numunelerde oluşmuştur. AAYFC'li betonlar ise başlangıçta düşük kuruma büzülmesi oluşmuş ancak sonraki günlerde artış gösterdiği hatta diğer numunelerin büzülme değerlerinin üstünde bir eğri oluştuğu görülmüştür. En düşük büzülme değerini AAYFC + %10 UK numuneleri vermektedir. %60 ve %80 YFC numuneleri birbirlerine paralel eğriler oluşturmuş, %60 YFC'nin kuruma büzülmesi değerleri %80 YFC değerlerinin biraz altında kalmış, uçucu kül içeren numunelere çok yakın bir eğri çizdiği gözlenmiştir.

3.8. Mikroyapı İncelemeleri

Üretilen numunelerin mikroyapı kompozisyonları, SEM (taramalı elektron mikroskopu), EDX (enerji dağılım spektrometresi) analizleri yapılarak incelenmiştir. Kırık yüzey incelemelerinde kullanılan numuneler, altın, platin gibi malzeme ile kaplanarak incelenmişlerdir. Bu analizler ODTÜ Merkez laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.67'de Kırık yüzey incelemelerinde kullanılmak üzere ayrılan numunelerin görüntüsü verilmektedir.

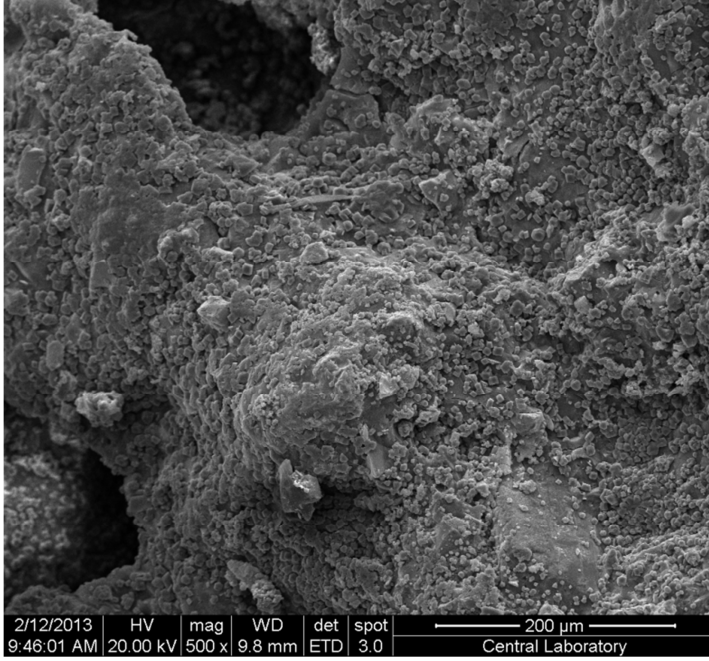


Şekil 3.67. Kırık yüzey incelemelerinde kullanılmak üzere ayrılan numunelerin görüntüsü



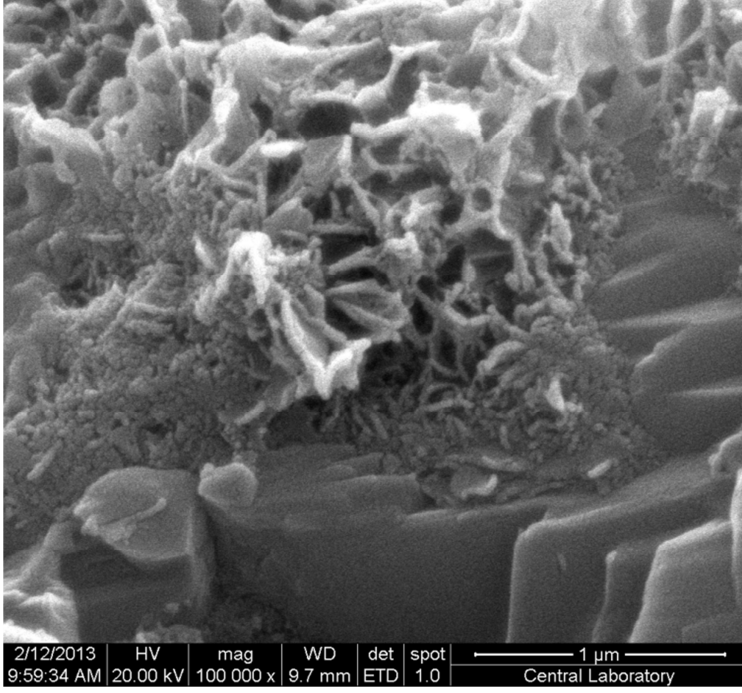
Şekil 3.68. %50YFC+%10P Ms=0.75 karışımı SEM görüntüsü – 15.000x

Şekil 3.68’de yüksek büyütme oranlarında (15000x) %50 YFC + %10 P Ms=0.75 karışımının matris yapısı gözlenmektedir. Beyaz renkte olan kübik kristallerin çözünmemiş alkali taneleri (kalsit kristalleri: agrega olarak kullanılan kireçtaşı agregasının yapısını oluşturmaktadır) olduğu görülmektedir. Matris fazında kuruma büzülmesi çatlakları görülmektedir. CSH bağları görülmektedir [26].

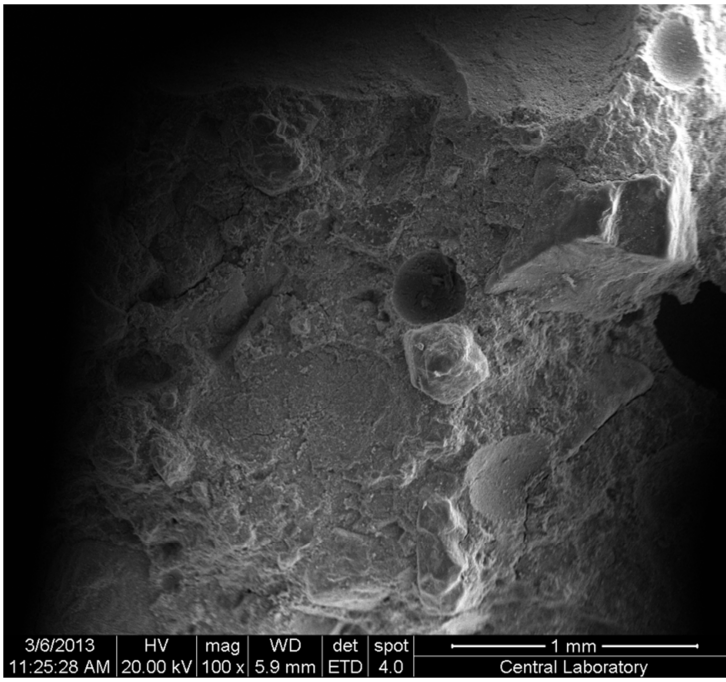


Şekil 3.69. %70YFC+%10P Ms=1.00 karışımı SEM görüntüsü – 500x

Şekil 3.69’da harç numunesi içindeki sodyum silikat içeriğinin fazla olması işlenebilirliği düşürmüş çimento ile yüksek fırın cürufunun hidrasyon yapmasını önlemiş bağlayıcı ile kullanılan standart kum arasında tam bir aderans sağlanamamıştır. Bu nedenle harç numunesi yüzeyinde gözle görülebilen boşluklar oluşmuş ve dayanım değerleri oldukça düşük neticeler vermiştir. CEM I’in ana hidrasyon ürünü C-S-H (tobermorit) ve Ca(OH)_2 (portlandit) dir. CSH’ın bağlayıcılık özelliğinin Ca/Si oranının azalmasıyla arttığını belirtmekte fayda vardır. Şekil 3.68’de %50YFC+%10P Ms=0.75 karışım harcının düşük bir büyütme oranında (100x) görüntüsü verilmiştir. Yoğun matris yapısının yanında, küresel hava boşlukları görülmektedir. Şekil 3.70’de 100.000 defa büyütülmüş olan %75YFC + %5P Ms=0.75 karışımı SEM görüntüsü verilmektedir. Şekil 3.71’de ise 100 defa büyütülmüş olan %40 YFC Ms=0.50 karışımı SEM görüntüsünde hava boşlukları görülmektedir.

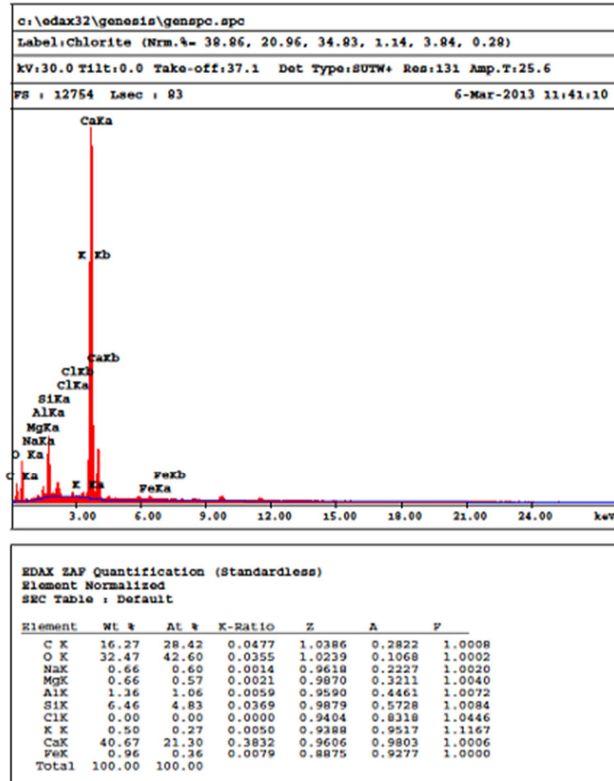
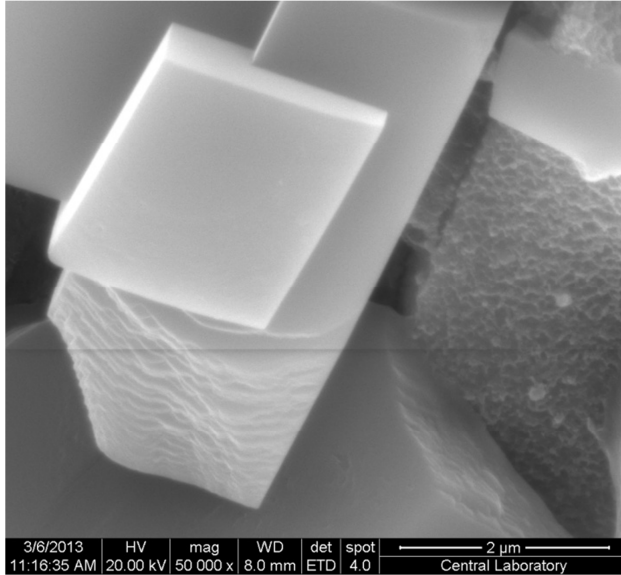


Şekil 3.70. %75YFC+%5P Ms=0.75 karışımı SEM görüntüsü – 100.000x



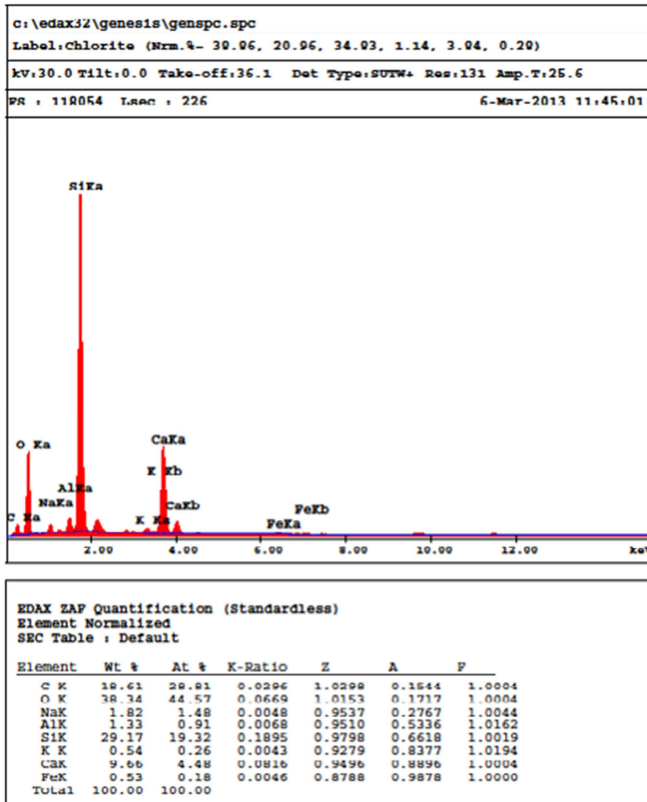
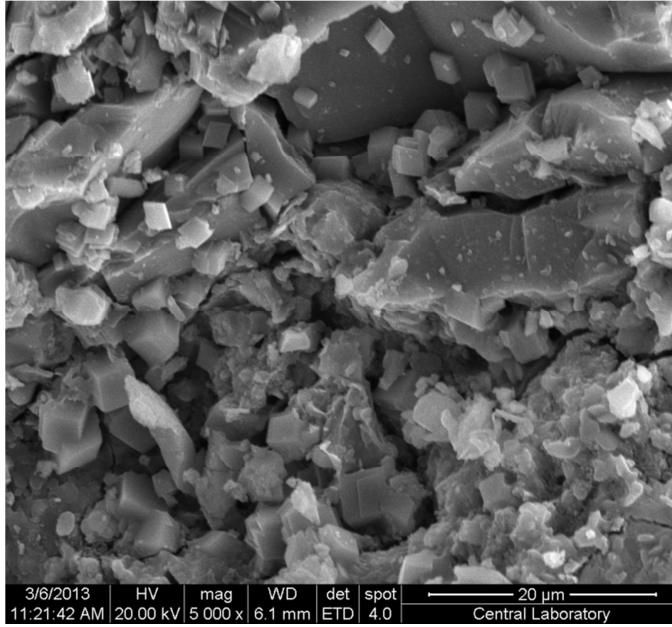
Şekil 3.71. %40 YFC Ms=0.50 karışımı SEM görüntüsü – 100x

Şekil 3.72’de EDX analizinden de kalsiyum elementinin fazla bulunmasından da anlaşılacağı üzere kalsit kristalleri görülmektedir.



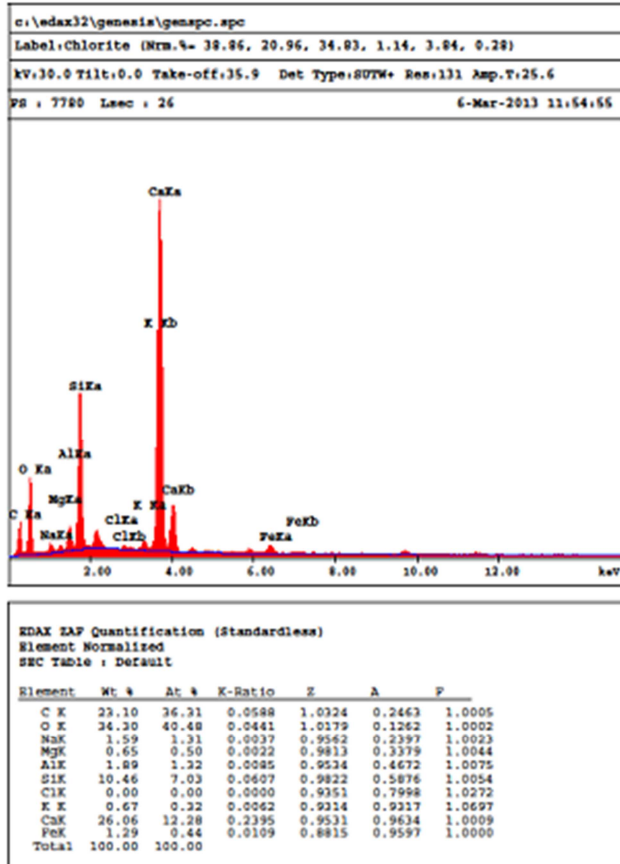
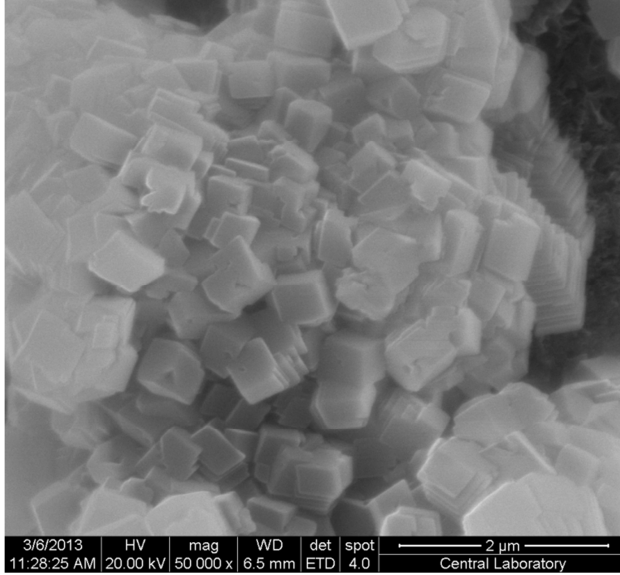
Şekil 3.72. %60 YFC Ms=0.50 karışımı SEM görüntüsü – 50.000x

Şekil 3.73'de 5000 defa büyütülmüş olan %50 YFC + %10 P Ms=1.00 karışımının SEM görüntüsü verilmektedir.



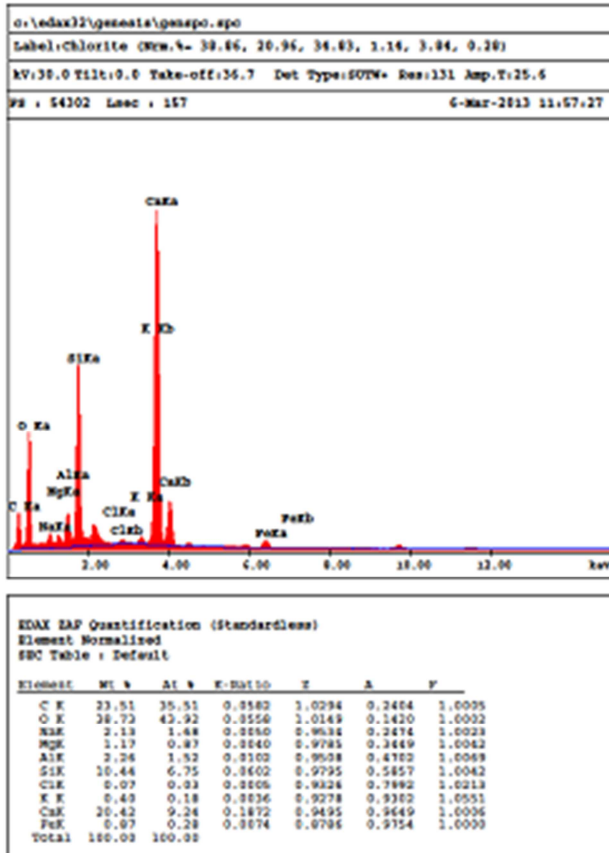
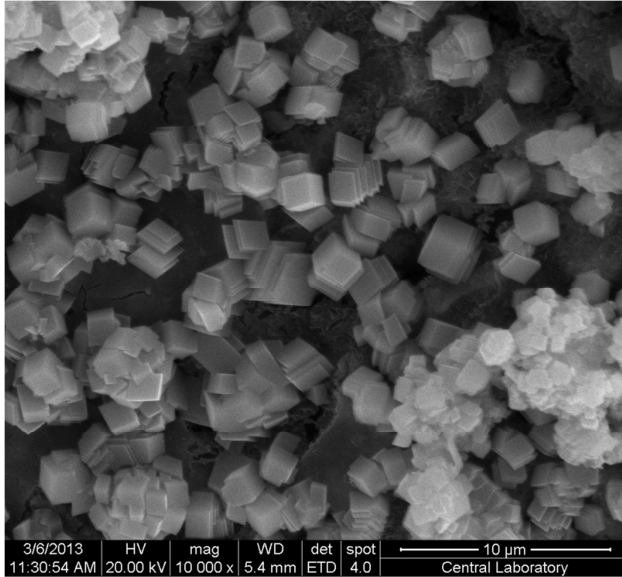
Şekil 3.73. %50 YFC + %10 P Ms=1.00 karışımı SEM görüntüsü – 5000x

Şekil 3.74'de 50.000 defa büyütülmüş olan %40 YFC Ms=0.50 karışımının SEM görüntüsü verilmektedir.



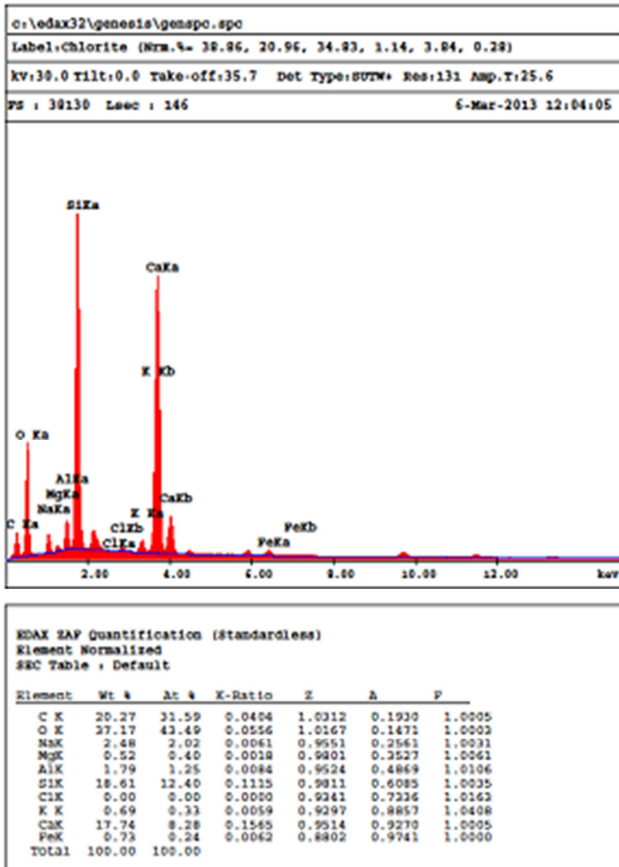
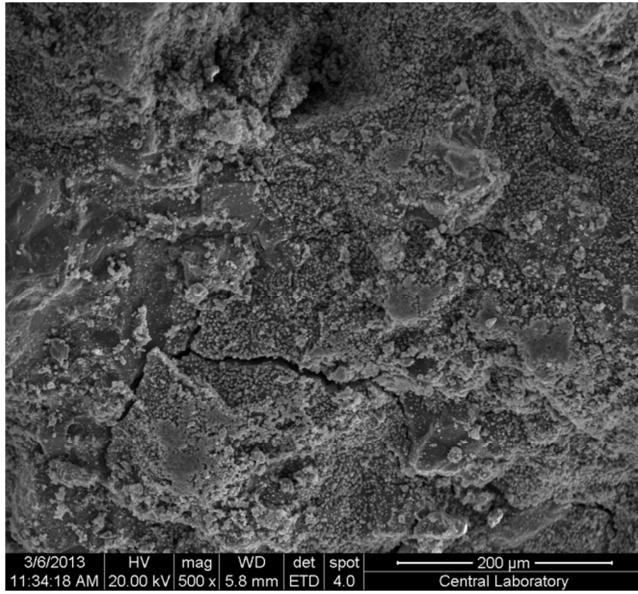
Şekil 3.74. %40 YFC Ms=0.50 karışımı SEM görüntüsü – 50.000x

Şekil 3.75’de 10.000 defa büyütülmüş olan %40 YFC Ms=0.75 karışımının SEM görüntüsü verilmektedir.



Şekil 3.75. %40 YFC Ms=0.75 karışımı SEM görüntüsü – 10.000x

Şekil 3.76.'da kuruma büzülmesi çatlakları görülmektedir.



Şekil 3.76. %75 YFC + %5 P Ms=1.00 karışımı SEM görüntüsü – 500x

Tablo 3.42’de SEM analizleri incelenen numunelerin EDX analizlerinin sonuçlarından elde edilen elementlerin yüzdelik miktarları verilmektedir.

Tablo 3.42. Üretilen AAYFC, AAYFC+P, AAYFC+UK numunelerinin SEM görüntülerinin EDX analiz sonuçları

Element Wt (%)	%60YFC M _S =0.50	%50YFC+%1 0P M _S =1.00	%40 YFC M _S =0.50	%40 YFC M _S =0.75	%75 YFC+%5P M _S =1.00	%60 YFC M _S =0.75
C	16.27	18.61	23.1	23.51	20.27	18.45
O	32.47	38.34	34.3	38.73	37.17	34.99
Na	0.66	1.82	1.59	2.13	2.48	5.25
Mg	0.66	0	0.65	1.17	0.52	1.72
Al	1.36	1.33	1.89	2.26	1.79	3.01
Si	6.46	29.17	10.46	10.44	18.61	10.41
Cl	0	0	0	0.07	0	0.33
K	0.5	0.54	0.67	0.4	0.69	1.04
Ca	40.67	9.66	26.06	20.42	17.74	23.56
Fe	0.96	0.53	1.29	0.87	0.73	1.24
Toplam	100	100	100	100	100	100

BÖLÜM 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın hedefi Portland çimentosunun kullanımını minimize ederek cürufun beton içinde kullanımını artırmak böylece çevre kirliliğini önlemek, sülfatlı sularda daha dayanıklı beton üretmeyi sağlamak amaçlanmıştır. Daha önceki çalışmalarda alkalilerle birlikte farklı malzemeler kullanılmış dezavantajları ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışma programı ana hatlarıyla dört aşamaya ayrılabilir.

İlk aşama,

Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu kuru (AAYFCT) karışımlarla paçal numuneler elde edilmiş ve çimento deneyleri uygulanmıştır (özgül ağırlık, vicat, blaine, elek analizi, genleşme tayini ve dayanım değerleri belirlenmiştir). Elde edilen sonuçlarda kullanılan alkaliler (sodyum karbonat, sönmüş kireç ve sodyum silikat) kuru halde çimentoya karıştırıldığı için suda çözünmeden iyon geçişleri tam oluşmadığı için elde edilen dayanım değerleri şahit numunelere kıyasla düşük değerler vermiştir. Seçilen alkaliler değiştirilerek ve iyon geçişinin tam sağlanabilmesi için suda çözündürülerek ikinci deney aşamasına geçilmiştir.

İkinci aşama,

Bu deney aşamasında ise sodyum silikat ve sodyum hidroksit alkalileri %2, 4, 6, 7 ve 8 Na₂O oranları ile çalışılarak (%2 Na₂O içerikli numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra 3.5 saat suda kaynatılmıştır) ve çeşitli silikat modülleri (M_s) kullanılarak elde edilen numunelerde 28 günlük basınç dayanım değerlerinde en iyi sonucu veren %8 Na₂O içerikli numunelerden %80 YFC M_s= 0.75 olan numune olup, referans numunesi ile kıyaslandığında %126 oranında artış sağlamıştır.

Üçüncü aşama,

%8 Na₂O içeren alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu (AAYFC) harçlara %5 ve %10 oranlarında ponza ve uçucu kül eklenmiş, dayanım değerleri incelenmiştir. 28 günlük basınç dayanım değerlerinde referans numunelerle kıyaslandığında en iyi sonucu veren %75 YFC (yüksek fırın cürufu) + %5 P (ponza) M_s=0.75 olan numunede %134 oranında, %70 YFC + %10 P, M_s=0.75 olan numunede %135 oranında, %75 YFC + %5 UK (uçucu kül), M_s=0.75 olan numunede %100 oranında ve %70 YFC + %10 UK, M_s=0.75 olan numunede %121 oranında artış sağlanmıştır.

Dördüncü aşama,

%8 Na₂O içeren alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu (AAYFC) harçlara ponza ve uçucu kül eklenmiş sülfatlı sulara karşı dayanıklılıkları incelenmiştir. Sodyum sülfat çözeltisi içinde bekletilen karışımların 28 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi ile kıyaslandığında en iyi sonucu veren %80 YFC M_s=1.00 olan numune %96 oranında, %70 YFC + %10 P, M_s=1.00 olan numunede %62 oranında artış sağlanmıştır. Magnezyum sülfat çözeltisi içinde bekletilen karışımların 28 günlük basınç dayanım değerleri referans numunesi ile kıyaslandığında en iyi sonucu veren %80 YFC M_s=1.00 olan numune %97 oranında artış sağlanmıştır.

En yüksek kuruma büzülmesi değerleri ponzalı olan numunelerde görülmüştür. Bunun nedeni EDX sonuçlarına göre silis içeriğinin artması büzülmeyi artıran bir etken olarak düşünülmektedir. En düşük büzülme değerini ise uçucu kül içerikli olan AAYFC + %10UK numuneleri vermektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda ponzanın ve farklı aktivatör sistemlerinin kullanımına yönelik çalışmalar önerilebilir. Ayrıca AAYFC betonları için kür suyuna sönmüş kireç eklenerek bazik bir ortam oluşturulup, kür suyunun sıcaklığı farklı derecelerde ayarlanarak uygulamalar yapıp denemeler yapılabilir. Ayrıca farklı kür ortamları ile örneğin otoklav kür, buhar kürü ya da etüvde belirlenen farklı sıcaklık aralıklarında kür şartlarına maruz bırakılarak dayanım değerleri incelenebilir.

Yüksek sıcaklıklara dayanıklı, prizi çabuk istenen yerlerde (tünellerde, püskürtme betonlar vb) ve radyoaktif atıkların depolanması için inşa edilen yapılarda AAYFC betonlarının CEM I'li betonlardan daha dayanıklı olduğu yapılan çalışmalarda ileri sürülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] ROY, D.M., Alkali-activated cements Opportunities and challenges. Cement and Concrete Research, 1999. 29(2): p. 249-254.
- [2] T.GÜVERCİN, Silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın curufunun bağlayıcı olarak çimento üzerindeki etkileri, 2002.
- [3] E.B.GÖRÜR, Yüksek fırın cürufu ve bazaltik ponza katkılı betonların durabilite özellikleri, 2007.
- [4] B.BARADAN, S.A., H.YAZICI, Beton, İzmir: Dokuz Eylül Üniv. Yayınları, 2012.
- [5] C.BİLİM, Yüksek fırın curufu katksının çimento tabanlı malzemelerde kullanılabilirliği, 2006.
- [6] TOKYAY, M., Betonda uçucu kül kullanımının, endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılması sempozyumu, 1993. p. 29-36.
- [7] S.SUBAŞI, Y.K.V.A., Uçucu kül tür ve miktarının çimento mekanik özelliklerine etkisi. Uluslararası sürdürülebilir yapılar sempozyumu, 2010. 86-90.
- [8] ÖZGÜR EREN, Z.Y., Değişik sıcaklıklarda kür edilen salt portland çimentolu yüksek fırın cürufu veya uçucu kül katkılı betonlarda dayanım gelişimi. İMO Teknik Dergi, 2004: p. 3311-3322.
- [9] NAQVİ, A.A., ET AL., Effect of silica fume addition on the PGNAAs measurement of chlorine in concrete. Applied Radiation and Isotopes, 2010, 68(3): p. 412-417.
- [10] SONG, H.-W. AND V. Saraswathy, Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—An overview. Journal of Hazardous Materials, 2006, 138(2): p. 226-233.
- [11] ERDOĞAN, T.Y., Atık malzemelerin inşaat endüstrisinde kullanımı-uçucu kül ve yüksek fırın curufu. Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanım sempozyumu, 1993.

- [12] M.EMİROĞLU, Y.K., S.SUBAŞI, Yüksek fırın cürufunun betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi, in International advanced technologies symposium, 16.06.2011.
- [13] ÖZGÜR OKYAY, Y.A. Yüksek dayanım ve yüksek performanslı betonlarda yüksek fırın cürufu kullanımı.
- [14] YAZICI, H., Yüksek fırın cürufu katkılı harçların sülfat dayanıklılığının incelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 2006, 8: p. 51-58.
- [15] HANİFİ BİNİCİ, M.E., AYTAÇ DİNÇER, Silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı betonların bazı durabilite özellikleri. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2013. 28(1): p. 11-20.
- [16] HANİFİ BİNİCİ, H.S., M.YASİN DURGUN, Barit, bazaltik ponza, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı betonların özellikleri. KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2010.
- [17] ÖZKAN, Ö., Çelikhane ve yüksek fırın cürufu katkılı portland çimentosunun özellikleri. İMO Teknik Dergi, 2006: p. 3893-3902.
- [18] HANİFİ BİNİCİ, E.B.G., M.YASİN DURGUN Yüksek Fırın Cürufu ve Bazaltik Ponza Katkılı Betonların Mekanik Aşınması ve Su Geçirirliği. (2010)
- [19] BİNİCİ, H., H. TEMİZ, AND M.M. KÖSE, The effect of fineness on the properties of the blended cements incorporating ground granulated blast furnace slag and ground basaltic pumice. Construction and Building Materials, 2007, 21(5): p. 1122-1128.
- [20] HANİFİ BİNİCİ, H.K., HÜSEYİN TEMİZ, ELA BAŞUDE GÖRÜR, Yüksek fırın cürufu ve bazaltik ponza katkılı betonların bazı durabilite özellikleri. Pamukkale Journal Agent, 2008(3): p. 309-317.
- [21] HADJ-SADOK, A., ET AL., Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag. Construction and Building Materials, 2011, 25(2): p. 1018-1025.
- [22] YÜKSEL, İ., R. SİDDİQUE, AND Ö. ÖZKAN, Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement. Construction and Building Materials, 2011, 25(2): p. 967-972.
- [23] MİCHEL, M., ET AL., The influence of gypsum ratio on the mechanical performance of slag cement accelerated by calcium sulfoaluminate cement. Construction and Building Materials, 2011, 25(3): p. 1298-1304.

- [24] GUO, L.-P., ET AL., Study on the flexural fatigue performance and fractal mechanism of concrete with high proportions of ground granulated blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(2): p. 242-250.
- [25] ÇAKIR, Ö. AND F. AKÖZ, Effect of curing conditions on the mortars with and without GGBFS. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(3): p. 308-314.
- [26] ÇAKIR, Ö., Yüksek fırın cürufunun betonun mekanik özelliklerine etkisi, in *İnşaat mühendisliği, Yıldız Teknik Üniversitesi: İstanbul*, 2000.
- [27] BİNİCİ, H., ET AL., Performance of ground blast furnace slag and ground basaltic pumice concrete against seawater attack. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(7): p. 1515-1526.
- [28] HANİFİ BİNİCİ , A.H.S., MUHAMMED YASİN DURGUN, MURAT KOLUÇOLAK, Kum boyutunda yüksek fırın cürufu ve ponza katkılı beton boruların durabilite özelliklerinin araştırılması. *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2011.
- [29] MUN, K.J., S.Y. SO, AND Y.S. SOH, The effect of slaked lime, anhydrous gypsum and limestone powder on properties of blast furnace slag cement mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(7): p. 1576-1582.
- [30] DURAN ATIŞ, C. AND C. BİLİM, Wet and dry cured compressive strength of concrete containing ground granulated blast-furnace slag. *Building and Environment*, 2007, 42(8): p. 3060-3065.
- [31] VEJMEKOVÁ, E., ET AL., Properties of self-coMPacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(3): p. 1325-1331.
- [32] SİSOMPHON, K., O. COPUROGLU, AND A.L.A. FRAAİJ, Development of blast furnace slag mixtures against frost salt attack. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(8): p. 630-638.
- [33] SAJEDİ, F. AND H. ABDUL RAZAK, Thermal activation of ordinary Portland cement–slag mortars. *Materials & Design*, 2010, 31(9): p. 4522-4527.
- [34] Lİ, Y., J. BAO, AND Y. GUO, The relationship between autogenous shrinkage and pore structure of cement paste with mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(10): p. 1855-1860.
- [35] KÖKSAL, F., Yüksek fırın cürufu ve uçucu külün kaplama betonlarının ıslanma-kuruma direncine etkisi, in *İnşaat Mühendisliği, Gaziantep Üniversitesi: Gaziantep*, 1996.

- [36] MANSUR SÜMER, M.U., H.TALHA SÖNMEZ. Yüksek fırın cürufunun kendiliğinden yerleşen betonlara etkileri, 2011.
- [37] GÜLLÜ, H., Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren taze betonun özellikleri, İnşaat Mühendisliği, Gaziantep Üniversitesi: Gaziantep, 1996.
- [38] YAZICI, H., ET AL., Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(8): p. 639-648.
- [39] OSBORNE, G.J., Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. Cement and Concrete Composites, 1999, 21(1): p. 11-21.
- [40] KARAKURT, C. AND İ.B., Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate resistance of concrete. Construction and Building Materials, 2011, 25(4): p. 1789-1795.
- [41] NAZARİ, A. AND S. RİAHİ, Splitting tensile strength of concrete using ground granulated blast furnace slag and SiO₂ nanoparticles as binder. Energy and Buildings, 2011, 43(4): p. 864-872.
- [42] ERDOĞAN, T., Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve kullanımı, ODTÜ Üniversitesi: Ankara
- [43] HALUK ÇELİK, Y.A., YAKUP BARAN, Seyitömer ve Çayırhan uçucu küllerinin Portland çimentosu-uçucu kül (CEM I-UK) hamurunun priz başlama ve sonu sürelerine etkisi. Politeknik dergisi, 2003.
- [44] İSMAİL DEMİR, S.B.V.A. Uçucu kütle üretilen gaz betona perlit etkisinin araştırılması. THBB.
- [45] DEMİRBOĞA, R., Silis dumanı ve uçucu külün perlit ve ponza ile üretilen hafif beton özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi, İnşaat Mühendisliği, Erzurum Üniversitesi: Erzurum, 1999.
- [46] KAZIM TÜRK, M.K., Z.ÇINAR ULUCAN, Farklı oranlarda F sınıfı uçucu kül içeren kendiliğinden sıkışan betonun dayanım özellikleri, 2006.
- [47] ERHAN GÜNEYİSİ, M.G., Uçucu kül ve metakaolin içeren kendiliğinden yerleşen harçlar, in Yapılarda kimyasal katkılar sempozyumu.
- [48] H.ULUSU, Erzincan ve Nevşehir yöresi ponzalarının çimentolu sistemlerde kullanılabilirliği, Gazi Üniversitesi: ANKARA, 2006.
- [49] YILDIRIM, N., Ponza ve uçucu kül kullanılarak imal edilen betonların agresif su ortamlarında mekanik özelliklerinin araştırılması, in İnşaat mühendisliği, Selçuk Üniversitesi: Konya, 2007.

- [50] ULUSU, H., Erzincan ve Nevşehir yöresi pomzalarının çimentolu sistemlerde kullanılabilirliği, in Yapı eğitimi, Gazi Üniversitesi: Ankara, 2006.
- [51] SALİH YAZICIOĞLU, B.D., Puzolonik katkı maddesi olarak kullanılan Elazığ yöresi pomzasının ilerleyen kür yaşlarında betonun basınç dayanımına etkisi. Fırat Üniversitesi Fen ve Müh. Bil. Dergisi, 2006: p. 367-374.
- [52] TAYFUN UYGUNOĞLU, O.Ü., Buhar kürü uygulanmış pomzalı hafif betonun özellikleri. Politeknik dergisi, 2007.
- [53] BERNAL, S.A., ET AL., Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. Cement and Concrete Research, 2011, 41(1): p. 1-8.
- [54] AYDIN, S., Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın curufu bağlayıcılı lifli kompozit geliştirilmesi, 2010.
- [55] GONG, C. AND N. YANG, Effect of phosphate on the hydration of alkali-activated red mud-slag cementitious material. Cement and Concrete Research, 30(7): p. 1013-1016, 2000.
- [56] BROUGH, A.R., et al., Sodium silicate-based alkali-activated slag mortars: Part II. The retarding effect of additions of sodium chloride or malic acid. Cement and Concrete Research, 30(9): p. 1375-1379, 2000.
- [57] CAIJUN SHI, P.V.K., DELLA ROY, Alkali-Activated Cements and Concretes, 2006.
- [58] QIAN, G., D.D. SUN, AND J.H. TAY, New aluminium-rich alkali slag matrix with clay minerals for immobilizing simulated radioactive Sr and Cs waste. Journal of Nuclear Materials, 299(3): p. 199-204. 2001.
- [59] TEVRİZCİ, M.M., Metakaolin katkılı harçların bazı durabilite özelliklerinin incelenmesi, in İnşaat Mühendisliği, Dokuz Eylül Üniversitesi: İzmir. 2010.
- [60] MERMERDAŞ, K., Metakaolinin havada ve suda kür edilmiş betonların dayanım ve durabilite özellikleri üzerine etkisi, İnşaat Mühendisliği. Gaziantep Üniversitesi: Gaziantep, 2006.
- [61] NEBİOĞULLARI, M.A., Metakaolin, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkısının beton hidrasyon sıcaklığına etkisi, İnşaat mühendisliği. Niğde Üniversitesi: Niğde, 2010.
- [62] ALMAZ, Z., Metakaolin ve silis dumanı içeren harç karışımlarının özellikleri, in İnşaat Mühendisliği, Erciyes Üniversitesi: Kayseri, 2010.

- [63] HAMALI, Y., Metakaolin ve silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri, in İnşaat Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi: İstanbul, 2007.
- [64] PACHECO-TORGAL, F., J. CASTRO-GOMES, AND S. JALALI, Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(7): p. 1315-1322.
- [65] CHINDAPRASIRT, P., T. CHAREERAT, AND V. SIRIVIVATNANON, Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 2007, 29(3): p. 224-229.
- [66] VAN DEVENTER, J.S.J., J.L. PROVÍS, AND P. DUXSON, Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*, 2012, 29(0): p. 89-104.
- [67] YUNSHENG, Z., S. WEI, AND L. ZONGJIN, Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement. *Applied Clay Science*, 2010, 47(3-4): p. 271-275.
- [68] ZHANG, Z., X. YAO, AND H. WANG, Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete III. Field experiment. *Applied Clay Science*, 2012, 67-68(0): p. 57-60.
- [69] HU, S., ET AL., Bonding and abrasion resistance of geopolymeric repair material made with steel slag. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30(3): p. 239-244.
- [70] ZEYBEK, O., Uçucu kül esaslı geopolimer tuğla üretimi, Anadolu Üniversitesi: Eskişehir, 2009.
- [71] PALOMO, A., M.W. GRUTZECK, AND M.T. BLANCO, Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(8): p. 1323-1329.
- [72] KİM, J.C. AND S.Y. HONG, Liquid concentration changes during slag cement hydration by alkali activation. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(2): p. 283-285.
- [73] BAKHAREV, T., J.G. SANJAYAN, AND Y.-B. CHENG, Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(1): p. 113-120.
- [74] ZIVICA, V., Effects of type and dosage of alkaline activator and temperature on the properties of alkali-activated slag mixtures. *Construction and Building Materials*, 2007. 21(7): p. 1463-1469.

- [75] CHANG, J.J., A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(7): p. 1005-1011.
- [76] SONG, S. AND H.M. JENNINGS, Pore solution chemistry of alkali-activated ground granulated blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(2): p. 159-170.
- [77] KRIZAN, D. AND B. ZIVANOVIC, Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(8): p. 1181-1188.
- [78] ROY, D.M., W. JIANG, AND M.R. SILSBEE, Chloride diffusion in ordinary, blended, and alkali-activated cement pastes and its relation to other properties. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(12): p. 1879-1884.
- [79] FERNANDEZ-JIMENEZ, A., J.G. PALOMO, AND F. PUERTAS, Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(8): p. 1313-1321.
- [80] CHI, M. AND R. HUANG, Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars. *Construction and Building Materials*, 2013, 40(0): p. 291-298.
- [81] YANG, K.-H., ET AL., Hydration products and strength development of calcium hydroxide-based alkali-activated slag mortars. *Construction and Building Materials*, 2012, 29(0): p. 410-419.
- [82] LI, Y. AND Y. SUN, Preliminary study on combined-alkali-slag paste materials. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(6): p. 963-966.
- [83] BAKHAREV, T., J.G. SANJAYAN, AND Y.B. CHENG, Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(10): p. 1607-1611.
- [84] BAKHAREV, T., J.G. SANJAYAN, AND Y.B. CHENG, Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(9): p. 1277-1283.
- [85] BAKHAREV, T., J.G. SANJAYAN, AND Y.B. CHENG, Resistance of alkali-activated slag concrete to alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(2): p. 331-334.
- [86] BAKHAREV, T., J.G. SANJAYAN, AND Y.B. CHENG, Sulfate attack on alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(2): p. 211-216.

- [87] FERNANDEZ-JÍMENEZ, A. AND F. PUERTAS, The alkali-silica reaction in alkali-activated granulated slag mortars with reactive aggregate. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(7): p. 1019-1024.
- [88] AL-OTAIBÍ, S., Durability of concrete incorporating GGBS activated by water-glass. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(10): p. 2059-2067.
- [89] GARCIA-LODEIRO, I., A. PALOMO, AND A. FERNANDEZ-JÍMENEZ, Alkali-aggregate reaction in activated fly ash systems. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(2): p. 175-183.
- [90] PUERTAS, F., ET AL., Alkali-aggregate behaviour of alkali-activated slag mortars: Effect of aggregate type. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(5): p. 277-284.
- [91] COLLINS, F. AND J.G. SANJAYAN, Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2001, 23(4-5): p. 345-352.
- [92] YANG, K.-H., ET AL., Properties of cementless mortars activated by sodium silicate. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(9): p. 1981-1989.
- [93] KOMLJENOVIĆ, M.M., ET AL., Decalcification resistance of alkali-activated slag. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 233-234(0): p. 112-121.
- [94] BAKHAREV, T., J.G. SANJAYAN, AND Y.B. CHENG, Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(10): p. 1619-1625.
- [95] KATZ, A., Microscopic Study of Alkali-Activated Fly Ash. *Cement and Concrete Research*, 1998, 28(2): p. 197-208.
- [96] BAKHAREV, T., Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(6): p. 1134-1147.
- [97] SAKULICH, A.R., ET AL., Mechanical and microstructural characterization of an alkali-activated slag/limestone fine aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(8): p. 2951-2957.
- [98] TOPRAK, M.U., Termik santral taban küllerinin alkali aktivasyon ile geopolimer üretilmesi, in *İnşaat Mühendisliği*. 2011, Dumlupınar Üniversitesi: Kütahya.
- [99] BAKHAREV, T., Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(6): p. 1233-1246.

- [100] BAKHAREV, T., Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(6): p. 1224-1232.
- [101] BROUGH, A.R. AND A. ATKINSON, Automated identification of the aggregate–paste interfacial transition zone in mortars of silica sand with Portland or alkali-activated slag cement paste. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(6): p. 849-854.
- [102] BROUGH, A.R. AND A. ATKINSON, Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(6): p. 865-879.
- [103] XIÉ, Z. AND Y. XÍ, Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(9): p. 1245-1249.
- [104] ALTAN, E. AND S.T. ERDOĞAN, Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(2): p. 131-139.
- [105] PUERTAS, F., ET AL., Alkali-activated fly ash/slag cements: Strength behaviour and hydration products. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(10): p. 1625-1632.
- [106] SHÍ, C. AND J.A. STEGEMANN, Acid corrosion resistance of different cementing materials. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(5): p. 803-808.
- [107] BAKHAREV, T., Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(4): p. 658-670
- [108] PALOMO, A., ET AL., Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(7): p. 997-1004.
- [109] ARELLANO AGUÍLAR, R., O. BURCIAGA DIAZ, AND J.I. ESCALANTE GARCIA, Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(7): p. 1166-1175.
- [110] PACHECO-TORGAL, F., ET AL., Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(9): p. 3732-3745.
- [111] EL-DIDAMONY, H., A.A. AMER, AND H. ABD ELA-ZÍZ, Properties and durability of alkali-activated slag pastes immersed in sea water. *Ceramics International*, 2012, 38(5): p. 3773-3780.

- [112] DURAN ATIŞ, C., ET AL., Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(1): p. 548-555.
- [113] APERADOR, W., R. MEJIA DE GUTIERREZ, AND D.M. BASTIDAS, Steel corrosion behaviour in carbonated alkali-activated slag concrete. *Corrosion Science*, 2009, 51(9): p. 2027-2033.
- [114] MİRANDA, J.M., ET AL., Corrosion resistance in activated fly ash mortars. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(6): p. 1210-1217.
- [115] MELO NETO, A.A., M.A. CINCOTTO, AND W. REPETTE, Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(4): p. 565-574.
- [116] PALACIOS, M. AND F. PUERTAS, Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(5): p. 691-702.
- [117] COLLINS, F.G. AND J.G. SANJAYAN, Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(3): p. 455-458.
- [118] PACHECO-TORGAL, F., J. CASTRO-GOMES, AND S. JALALI, Investigations about the effect of aggregates on strength and microstructure of geopolymeric mine waste mud binders. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(6): p. 933-941
- [119] PUERTAS, F., ET AL., A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements. *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, 31(12): p. 2043-2056.
- [120] RASHAD, A.M., S.R. ZEEDAN, AND H.A. HASSAN, A preliminary study of autoclaved alkali-activated slag blended with quartz powder. *Construction and Building Materials*, 2012, 33(0): p. 70-77.
- [121] AYDIN, S. AND B. BARADAN, Mechanical and microstructural properties of heat cured alkali-activated slag mortars. *Materials & Design*, 2012, 35(0): p. 374-383.
- [122] HABA, M.B., et al., Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag — Part II: Effect of Al₂O₃. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(1): p. 74-83.
- [123] MA, Y., J. HU, AND G. YE, The pore structure and permeability of alkali activated fly ash. *Fuel*, 2013, 104(0): p. 771-780.

- [124] BEN HAHA, M., ET AL., Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(3): p. 301-310.
- [125] PAN, Z., ET AL., Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud-slag cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(9): p. 1437-1441.
- [126] PAN, Z., ET AL., Hydration products of alkali-activated slag-red mud cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(3): p. 357-362.
- [127] FU, Y., L. CAI, AND W. YONGGEN, Freeze-thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(7): p. 3144-3148.
- [128] CHANG, J.J., W. YEIH, AND C.C. HUNG, Effects of gypsum and phosphoric acid on the properties of sodium silicate-based alkali-activated slag pastes. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(1): p. 85-91.
- [129] CHI, M., Effects of dosage of alkali-activated solution and curing conditions on the properties and durability of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 2012, 35(0): p. 240-245.
- [130] COLLINS, F. AND J.G. SANJAYAN, Strength and shrinkage properties of alkali-activated slag concrete containing porous coarse aggregate. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(4): p. 607-610.
- [131] BAKHAREV, T., J.G. SANJAYAN, AND Y.B. CHENG, Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(9): p. 1367-1374.
- [132] PALACIOS, M. AND F. PUERTAS, Effect of superplasticizer and shrinkage-reducing admixtures on alkali-activated slag pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(7): p. 1358-1367.
- [133] PALACIOS, M., ET AL., Adsorption of superplasticizer admixtures on alkali-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(8): p. 670-677.
- [134] OH, J.E., ET AL., The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(2): p. 189-196.
- [135] HAHA, M.B., ET AL., Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag — Part I: Effect of MgO. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(9): p. 955-963.

- [136] COLLINS, F. AND J.G. SANJAYAN, Cracking tendency of alkali-activated slag concrete subjected to restrained shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(5): p. 791-798.
- [137] ŽIVICA, V.R., Effectiveness of new silica fume alkali activator. *Cement and Concrete Composites*, 2006, 28(1): p. 21-25.
- [138] ROUSEKOVA, I., A. BAJZA, AND V. ŽIVICA, Silica fume-basic blast furnace slag systems activated by an alkali silica fume activator. *Cement and Concrete Research*, 1997, 27(12): p. 1825-1828.
- [139] SAYED, M. AND S.R. ZEEDAN, Green binding material using alkali activated blast furnace slag with silica fume. *HBRC Journal*, 2012, 8(3): p. 177-184.
- [140] COLLINS, F. AND J.G. SANJAYAN, Effects of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(3): p. 459-462.
- [141] PUERTAS, F., ET AL., Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(12): p. 2031-2036.
- [142] BERNAL, S., ET AL., Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(2): p. 208-214.
- [143] AYDIN, S. AND B. BARADAN, The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 45(1): p. 63-69.
- [144] O.DOLGUN, Kendiliğinden yerleşen betonlarda öğütülmüş ponza kullanılabilirliğinin araştırılması. 2010.
- [145] FERNANDEZ-JIMENEZ, A. AND A. PALOMO, Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(10): p. 1984-1992.
- [146] FAN, Y., ET AL., Activation of fly ash and its effects on cement properties. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(4): p. 467-472.
- [147] PALOMO, A. AND J.I. LOPEZ DELA FUENTE, Alkali-activated cementitious materials: Alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes: Part I. Stabilisation of boron. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(2): p. 281-288.
- [148] QIAN, G., D. DELAI SUN, AND J. HWA TAY, Characterization of mercury- and zinc-doped alkali-activated slag matrix: Part I. Mercury. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(8): p. 1251-1256.

- [149] QIAN, G., D.D. SUN, AND J.H. TAY, Characterization of mercury- and zinc-doped alkali-activated slag matrix: Part II. Zinc. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(8): p. 1257-1262.
- [150] MOSESON, A.J., D.E. MOSESON, AND M.W. BARSOUM, High volume limestone alkali-activated cement developed by design of experiment. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(3): p. 328-336.
- [151] NETO, A.A.M., M.A. CINCOTTO, AND W. REPETTE, Mechanical properties, drying and autogenous shrinkage of blast furnace slag activated with hydrated lime and gypsum. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(4): p. 312-318.
- [152] LEE, W.K.W. AND J.S.J. VAN DEVENTER, The interface between natural siliceous aggregates and geopolymers. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(2): p. 195-206.
- [153] BUCHWALD, A. AND M. SCHULZ, Alkali-activated binders by use of industrial by-products. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(5): p. 968-973.
- [154] SHI, C. AND P. XIE, Interface between cement paste and quartz sand in alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Research*, 1998, 28(6): p. 887-896.
- [155] TEOREANU, I., A. VOLCEANOV, AND S. STOLERIU, Non Portland cements and derived materials. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(6): p. 650-660
- [156] LEE, W.K.W. AND J.S.J. VAN DEVENTER, The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(4): p. 577-584.
- [157] ESCALANTE-GARCIA, J.I., ET AL., Effect of geothermal waste on strength and microstructure of alkali-activated slag cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(10): p. 1567-1574.
- [158] JO, B.W., S.K. PARK, AND J.B. PARK, Properties of concrete made with alkali-activated fly ash lightweight aggregate (AFLA). *Cement and Concrete Composites*, 2007, 29(2): p. 128-135.
- [159] ZUDA, L., ET AL., Alkali-activated aluminosilicate composite with heat-resistant lightweight aggregates exposed to high temperatures: Mechanical and water transport properties. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(2): p. 157-163.

- [160] KEUN HYEOK YANG, J.K.S., JAE SAM LEE, Properties of alkali activated mortar and concrete using lightweight aggregates *Materials and Structures*, 2010, p. 403-416.
- [161] NATALÌ MURRÌ, A., ET AL., High temperature behaviour of ambient cured alkali-activated materials based on ladle slag. *Cement and Concrete Research*, 2013, 43(0): p. 51-61.
- [162] CHEN, S., M. WU, AND S. ZHANG, Mineral phases and properties of alkali-activated metakaolin-slag hydroceramics for a disposal of simulated highly-alkaline wastes. *Journal of Nuclear Materials*, 2010, 402(2-3): p. 173-178.
- [163] LÌ, C., H. SUN, AND L. LÌ, A Review: The comparison between alkali-activated slag and metakaolin cements. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(9): p. 1341-1349.
- [164] BERNAL, S.A., ET AL., Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(1): p. 46-54.
- [165] BERNAL, S.A., ET AL., Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(6): p. 898-907.
- [166] REIG, L., ET AL., Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 2013, 43(0): p. 98-106.
- [167] VEIGA, K.K. AND A.L.G. GASTALDINI, Sulfate attack on a white Portland cement with activated slag. *Construction and Building Materials*, 2012, 34(0): p. 494-503.
- [168] YANG, K.H., J.I. SIM, AND S.H. NAM, Enhancement of reactivity of calcium hydroxide-activated slag mortars by the addition of barium hydroxide. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(3): p. 241-251.
- [169] TS EN 196-1 Çimento deney metotları. 2002.
- [170] TS EN 196-3 Çimento deney metotları. 2002.
- [171] TS EN 196-6 Çimento deney metotları. 2002.
- [172] ASTM C 596 Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement.
- [173] RASHAD, A.M., et al., Hydration and properties of sodium sulfate activated slag. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 37(0): p. 20-29.

- [174] COLLINS, F. AND J.G. SANJAYAN, Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(9): p. 1401-1406.
- [175] ÖZODABAŞ, A. AND K. YILMAZ, Improvement of the performance of alkali activated blast furnace slag mortars with very finely ground pumice. *Construction and Building Materials*, 2013, 48(0): p. 26-34.
- [176] FEI JIN, KAI GU, ABIR AL-TABBAA, Strength and drying shrinkage of reactive MgO modified alkali-activated slag paste. *Construction and Building Materials* 51 (2014) 395–404.
- [177] Cembureau, Activity 2010 Report.

ÖZGEÇMİŞ

Aylin ÖZODABAŞ, 11.06.1978 de Isparta' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Isparta'da tamamladı. 1995 yılında Isparta Şaik Lisesinden mezun oldu. 1995 yılında başladığı Süleyman Demirel Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü 2000 yılında bitirdi. 2001 yılında 1 yıl İngiltere'de dil eğitimi aldı. 2002-2005 yılları arasında Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek lisansını tamamladı. Bu süre içerisinde Sakarya Üniversitesi Yapı İşleri Teknik Dairesi Başkanlığında kontrol mühendisi olarak görev yaptı. Daha sonra 2005-2008 yılları arasında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Safranbolu Meslek Yüksekokulunda öğretim görevliliği yaptı. Şu anda Bartın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Uzman olarak görev yapmaktadır. Evli ve 1 çocukludur.