

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

**FARKLI KÜR KOŞULLARININ GEOPOLİMER HARÇLARIN
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Abdoslam Abdallaa ALNKA

**Danışman
Jüri Üyesi
Jüri Üyesi
Jüri Üyesi
Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Hasbi YAPRAK
Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ
Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ
Dr. Öğr.Üyesi Gökhan KAPLAN
Dr.Öğr. Üyesi H. Süleyman GÖKÇE**

**DOKTORA TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

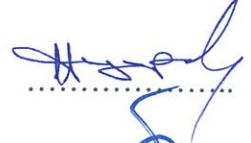
KASTAMONU – 2019

TEZ ONAYI

Abdoslam Abdallaa ALNKAA tarafından hazırlanan "**Farklı Kür Koşullarının Geopolimer Harçların Özelliklerine Etkisi**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde savunulmuş ve **oy birliği** ile Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir

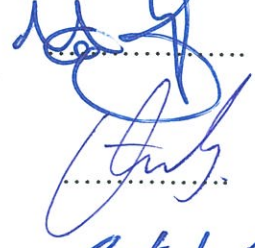
Danışman

Prof.Dr. Hasbi YAPRAK
Kastamonu Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof.Dr. Yılmaz ARUNTAŞ
Gazi Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ
Kastamonu Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi H.Süleyman GÖKÇE
Bayburt Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN
Kastamonu Üniversitesi



31/05/2019

Enstitü Müdürü

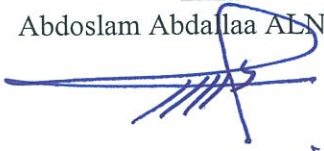
Prof.Dr. Hasbi YAPRAK



TAAHHÜTNAME

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildirir ve taahhüt ederim.

İmza
Abdoslam Abdalla ALNKAA



ÖZET

DOKTORA TEZİ

FARKLI KÜR KOŞULLARININ GEOPOLİMER HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Abdoslam Abdallaa ALNKA

Kastamonu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hasbi YAPRAK

Sürdürülebilir bir çevre yaklaşımı, günümüzün en önemli ve belirleyici unsurlarından birini oluşturmakta, çevre dostu ürünlerin üretimi de hemen hemen tüm sektörler tarafından teşvik edilmektedir. Kireç ve Portland çimentosundan sonra üçüncü nesil çimento olarak kabul edilen geopolimerler, çok düşük CO₂ emisyonu ve pişirme gereksinimi duymamasından dolayı Portland çimentosuna alternatif çevre dostu bir ürün olarak kabul edilmektedir. Geopolimerlerin CO₂ emisyonlarının azaltılmasının yanında uçucu kül, YFC gibi endüstriyel atıkların geri dönüşümü ve ekonomiye kazandırılması gibi çevresel ve ekonomik yararları da bulunmaktadır. Tez çalışmasında yüksek fırın cürufu (YFC), uçucu kül (UK) ve atık cam tozu (ACT) bileşenlerinden oluşan puzolanik katkılarla oluşturulan geopolimer harçların özelliklerinin belirlenmesi amacıyla farklı boyutlarda harç numuneleri hazırlanmıştır. Harç numunelerine 85 °C sıcaklıkta (12 saat) buhar ve 20 ± 2°C sıcaklıkta su kürü uygulanmıştır. Kür işlemi sonrası harç numunelerin özgül ağırlık, birim ağırlık, su emme, kılcallık, kuruma büzülmesi gibi fiziksel özellikleri, 2, 7, 14, 28 ve 90 günlük basınç ve eğilme dayanımları, ultrases geçiş hızı, donma çözülme ve sülfat direnci özellikleri belirlenmiştir. Buhar kürünün geopolimer (GP) harçların mekanik özellikleri üzerinde su küründen daha etkili olduğu, MgSO₄'ın YFC ve ACT katkılı GP harçların mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği, YFC ve UK katkılı GP harçların ise MgSO₄'a karşı daha dirençli olduğu gözlenmiştir. 9 ay MgSO₄ etkisine maruz GP karışımlarında, UK oranının artması ve ACT oranının azalması durumunda basınç dayanımını arttırdığı, su ve buhar kürü uygulamasının basınç dayanımları arasında belirgin farklılıklar oluşturmadığı belirlenmiştir. 150 donma-çözülme çevrimi sonrası YFC/UK oranındaki artışa bağlı olarak basınç dayanımları artmış, YFC/ACT oranındaki artışa bağlı olarak da basınç dayanımları düşüş göstermiştir. Su kürü uygulamasının numunelerin donma-çözülme direnci üzerinde daha etkin olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler:Uçucu kül, Yüksek fırın cürufu, Atık cam tozu, Geopolimer harç, Mekanik özellikler, Durabilite

2019, 118Sayfa
Bilim Kodu: 91

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

EFFECT OF CURING CONDITIONS ON PROPERTIES OF GEOPOLYMER MORTAR

Abdoslam Abdallaa ALNKA

Kastamonu University
Institute of Sciences
Department of Material Science and Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hasbi YAPRAK

A sustainable environmental approach is one of the most important and decisive factors of today and the production of environmentally friendly products are encouraged by almost all industrial sectors. Geopolymers, which are considered as third generation cement after lime and Portland cement, is considered as an environmentally friendly product as an alternative to Portland cement due to its low CO₂ emission and lack of for firing. In addition to reducing CO₂ emissions, geopolymers have environmental and economic benefits such as recycling and recycling of industrial waste such as fly ash and YFC. In the study, samples of different sizes were prepared in order to determine the properties of geopolymer mortars consisting of blast furnace slag (YFC), fly ash (UK), waste glass powder (ACT), and sodium hydroxide (SH) and sodium silicate (SS) as an activator. To the mortar samples were performed on steam cure at 85 °C (12 hours) and water cure at 20 ± 2 °C. After curing process, physical properties of samples such as specific gravity, unit weight, water absorption, capillary, drying shrinkage, compressive and flexural strengths of 2, 7, 14, 28 and 90 days, ultrasound test, freezing thaw and sulfate resistance properties were determined. It was observed that steam curing was more effective on the mechanical properties of geopolymer mortars than water curing, MgSO₄ had a negative effect on slag and waste glass powder added geopolymer mortars and slag and fly ash added geopolymer mortars were more resistant to MgSO₄. When GP mixtures exposed to the effect of MgSO₄ for 9 months, it was determined that the compressive strength increased in the case of the UK ratio increased and ACT ratio decreased. Compressive strength increased after 150 freeze-thaw cycles due to the increase of in YFC / UK ratio, because of the increase of the YFC / ACT ratio, compressive strength decreased. Water curing was found to be more effective on freeze-thaw resistance of the samples.

Key Words: Fly ash, Slag, Waste glass powder, Geopolymer mortar, Mechanical properties, Durability

2019, 118Pages

Science Code: 91

TEŞEKKÜR

Öncelikli olarak, lisansüstü çalışmalarım boyunca benim için sağladığı muazzam destek ve yol göstericiliği için danışmanım Prof. Dr. Hasbi YAPRAK'a en derin şükranlarımı sunuyorum. Ayrıca, Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ, Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ, Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN ve Dr. Öğr. Üyesi Süleyman GÖKÇE'ye teşekkür ediyorum.

Ayrıca laboratuvar çalışmasından sonraki analiz sürecinde tüm istatistiksel veri analizi, optimizasyon ve istatistiki çalışmada yardımlarını esirgemeyen Karabük Üniversitesi öğretim üyesi Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin ÇETİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Benim için besledikleri sevgi ve sağladıkları destek için aileme, her zaman hayallerimin peşinden gitmem için beni yüreklendiren ve benim için güzel umutlar besleyen Annem Sada'ya ve akademik çalışmalarımın her aşamasında destek ve teşvikleriyle yanımda olan eşim Najia'a minnetimi ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Abdoslam Abdallaa ALNKAA
Kastamonu, 2019

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SEMBOLLER VE KISALTMA	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1. Geopolimer.....	3
2.2. Geopolimerin Dayanımını Etkileyen Unsurlar	5
2.2.1. Aktivatörler	5
2.2.2. SiO ₂ / Na ₂ O Oranı	7
2.2.3. Su-Geopolimer Harç Oranı	8
2.2.4. Sıcaklık ve Kütleme Süresi	8
2.3. Geopolimerin Genel Özellikleri	10
2.3.1. Geopolimer Harcın Kuruma Büzülmesi	10
2.3.2. Donma-Çözülmenin Geopolimer Harcı üzerindeki Etkileri	11
2.3.3. Sülfat Çözeltilisinin Geopolimer Harç üzerindeki Etkileri	11
2.3.4. Geopolimerin Özelliklerine İlişkin Önceki Çalışmalar	12
3. MATERYAL VE METOD	14
3.1. Materyal	14
3.1.1. Uçucu Kül	14
3.1.2. Yüksek Fırın Cürufu	15
3.1.3. Cam tozu	15
3.1.4. Standart Kum	16
3.1.5. Su	17
3.1.6. Alkali Aktivatörler	17

3.1.7.	Akışkanlaştırıcı	18
3.2.	Geopolimer Harçların Karışım Dizaynı	18
3.2.1.	Alkali Çözeltilerin Hazırlanması	18
3.2.2.	Geopolimer Harç Numuneleri.....	19
3.2.3.	Harç Karışımlarının Özellikleri ve Numunelerin Hazırlanması	19
3.2.4.	Harç Numunelerin Dökümü	20
3.2.5.	Kür Koşulları.....	21
3.3.	Sertleşmiş Geopolimer Numunelere Uygulanan Testler	22
3.3.1.	Özgül Ağırlık, Birim Ağırlık ve Su emme.....	22
3.3.2.	Kapilarite Katsayısı.....	22
3.3.3.	Kuruma Büzülmesi	23
3.3.4.	Eğilme Dayanımı	24
3.3.5.	Basınç Dayanımı	25
3.3.6.	Ultrases Geçiş Hızı Testi Deneyi Sonuçları.....	26
3.3.7.	Donma-Çözülme Dayanımı	27
3.3.8.	Sülfat Direnci	28
4.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	29
4.1.	Taze Harç (Yayılma Tablası) Özellikleri.....	29
4.2.	Su Emme, Özgül Ağırlık ve Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları	31
4.3.	Kapiler Su Emme Katsayısı	33
4.4.	Mekanik Özellikler	36
4.4.1.	Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları	36
4.4.2.	Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları	45
4.5.	Kurumu Büzülmesi Deneyi Sonuçları	54
4.6.	Donma-Çözülme Dayanıklılığı Testi	57
4.6.1.	Ağırlık Kaybı ve Basınç Dayanımı Deneyi	58
4.6.2.	Ultrases Geçiş Hızı Testi Deneyi Sonuçları.....	73
4.7.	Sülfat Dayanıklılığı Deneyi Sonuçları	81
4.7.1.	MgSO ₄ Etkisine Maruz Karışımların Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları	81
4.7.2.	MgSO ₄ etkisine maruz GP karışımlarının Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları	93

4.7.3.	MgSO ₄ etkisine maruz GP karışımlarının Ağırlık Kaybı Deneyi	
	Sonuçları	99
4.7.4.	GP Numunelerindeki Görsel Hasar Tespiti	106
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	108
5.1.	Basınç ve Eğilme Dayanımı Sonuçları	108
5.2.	Sülfat (MgSO ₄) Etkisi	108
5.3.	Donma Çözülme Etkisi	109
5.4.	Kuruma Büzülmesi	110
5.5.	Kapilerite ve Su Emme	110
5.6.	Öneriler	110
	KAYNAKLAR	112
	ÖZGEÇMİŞ	118

SEMBOLLER VE KISALTMA

ACT	Atık Cam tozu
ASC	Alkali aktive cüruf betonu
GPC	Geopolimer beton
GP	Geopolimer harcı
OPC	Standart Portland Çimentosu
S	Çözelti (SS + SH + su)
SC	Buhar kürü
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SH	Sodyum hidroksit
SS	Sodyum silikat
UK	Uçucu kül
UPV	Ultrasonik darbe hızı
w	Su
WC	Su kürü
YFC	Öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Uçucu kül katkılı Geopolimer üretim süreci	5
Şekil 2.2 Molar oranına bağlı olarak farklı Si/Al bağları	5
Şekil 3.1 Bilyalı değirmen	16
Şekil 3.2. Standart Kum	17
Şekil 3.3 Sodyum hidroksit peletleri	17
Şekil 3.4 Sodyum silikat çözeltisi	18
Şekil 3.5. Döküm sürecinden bir görünüş	21
Şekil 3.6 Rötire numunelerinin ölçülmesi	24
Şekil 3.7 Eğilme dayanımı deneyi	25
Şekil 3.8 Basınç dayanımı deneyi	26
Şekil 3.9 Ultrases geçiş hızı testi deneyi sonuçları	27
Şekil 3.10 Donma-çözülme testi içindeki numune tipleri	28
Şekil 3.11 MgSO ₄ çözeltisinde bekletilen numuneler	28
Şekil 4.1 Akışkanlaştırıcı oranının GP kullanımına etkisi1	30
Şekil 4.2 Akışkanlaştırıcı oranının GP etkisi	30
Şekil 4.3 GP karışımlarda UK ve ACT su emme oranı üzerindeki etkisi	32
Şekil 4.4 GP üretimde kullanılan atıkların su emme oranına etkisi	33
Şekil 4.5 UK ve ACT oranının kapiler su emme katsayısı üzerindeki etkisi	34
Şekil 4.6 GP üretimde kullanılan atıkların kapiler su emme katsayısına etkisi	35
Şekil 4.7 GP numunelerinde 2 günlük basınç dayanımı değişimi	36
Şekil 4.8 GP üretimde kullanılan atıkların 2 günlük basınç dayanımına etkisi	37
Şekil 4.9 GP numunelerinde 7 günlük basınç dayanımı değişimi	37
Şekil 4.10 GP üretimde kullanılan atıkların 7 günlük basınç dayanımına etkisi	38
Şekil 4.11 GP numunelerinde 28 günlük basınç dayanımı değişimi	39
Şekil 4.12 GP üretimde kullanılan atıkların 28 günlük basınç dayanımına etkisi	40
Şekil 4.13 GP numunelerinde 90 günlük basınç dayanımı değişimi	40
Şekil 4.14 GP üretimde kullanılan atıkların 90 günlük basınç dayanımına etkisi	41
Şekil 4.15 GP numunelerinde 7 günlük basınç dayanımına göre optimum oranları	42
Şekil 4.16 GP numunelerinde 28 günlük basınç dayanımına göre optimum oranları	42
Şekil 4.17 GP numunelerinde 90 günlük basınç dayanımına göre optimum oranları	43
Şekil 4.18 Su kürü uygulanan GP ‘da su emme oranı ile 28 günlük basınç dayanım arasındaki ilişki	44
Şekil 4.19 Buhar kürü uygulanan GP ‘da su emme oranı ile 28 günlük basınç dayanım arasındaki ilişki	44
Şekil 4.20 GP numunelerinde 2 günlük eğilme dayanımı değişimi	45
Şekil 4.21 GP üretimde kullanılan atıkların 2 günlük eğilme dayanımına etkisi	46
Şekil 4.22 GP numunelerinde 7 günlük eğilme dayanımı değişimi	47
Şekil 4.23 GP üretimde kullanılan atıkların 7 günlük eğilme dayanımına etkisi	48
Şekil 4.24 GP numunelerinde 28 günlük eğilme dayanımı değişimi	48
Şekil 4.25 GP üretimde kullanılan atıkların 28 günlük eğilme dayanımına etkisi	49
Şekil 4.26 GP numunelerinde 90 günlük eğilme dayanımı değişimi	50
Şekil 4.27 GP üretimde kullanılan atıkların 90 günlük eğilme dayanımına etkisi	51
Şekil 4.28 GP numunelerinde 7 günlük eğilme dayanımına göre optimum oranları	51
Şekil 4.29 GP numunelerinde 28 günlük eğilme dayanımına göre optimum oranları	52
Şekil 4.30 GP numunelerinde 90 günlük eğilme dayanımına bağlı optimum oranlar	53

Şekil 4.31 Buhar kürü uygulanan GP ‘da eğilme-basınç dayanımı (28. gün) ilişkisi	53
Şekil 4.32 Su kürü uygulanan GP ‘da eğilme-basınç dayanımı (28. gün) ilişkisi	53
Şekil 4.33 GP numunelerinde 90. gündeki kuruma büzülmesi değişimi	55
Şekil 4.34 GP üretimde kullanılan atıkların 90. gündeki kuruma büzülmesi üzerindeki etkisi	56
Şekil 4.35 GP numunelerinde 50 donma-çözülme çevrimi sonrası fiziksel hasarlar	58
Şekil 4.36 GP numunelerinde 50 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki basınç dayanımları	58
Şekil 4.37 GP numunelerinde 50 donma-çözülmenin basınç dayanımına etkisi	59
Şekil 4.38 GP karışımların 50 donma-çözülme çevrimi sonrasında basınç dayanımına göre optimum oranları	59
Şekil 4.39 GP numunelerinde 50 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki ağırlık kayıpları	60
Şekil 4.40 GP numunelerinde 50 donma-çözülme çevriminin ağırlık kaybına etkisi	60
Şekil 4.41 50 donma-çözülme çevriminde ağırlık kaybı-basınç dayanımı arasındaki ilişki	61
Şekil 4.42 Su kürü uygulanan GP karışımlarının 50 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki dayanım kayıpları	61
Şekil 4.43 Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 50 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki dayanım kayıpları	62
Şekil 4.44 GP numunelerinde 100 donma-çözülme çevrimi sonrası fiziksel hasar	63
Şekil 4.45 GP numunelerinde 100 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki basınç dayanımları	63
Şekil 4.46 GP numunelerinde 100 donma-çözülme çevrimini basınç dayanımına etkisi	64
Şekil 4.47 GP karışımların 100 donma-çözülme çevrimi sonrasında basınç dayanımı için optimum oranları	64
Şekil 4.48 GP numunelerinde 100 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki ağırlık kayıpları	65
Şekil 4.49 GP numunelerinde 100 donma-çözülme çevrimindeki ağırlık kaybı etkisi	66
Şekil 4.50 100 Donma çözülme çevrimi sonrasında GP karışımlarının ağırlık kaybı-basınç dayanımı ilişkisi	66
Şekil 4.51 Su kürü uygulanan GP karışımların 100 donma-çözülme çevrimindeki dayanım kayıpları	67
Şekil 4.52 Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 100 donma-çözülme çevrimindeki dayanım kayıpları	67
Şekil 4.53 GP numunelerinde 150 donma-çözülme çevrimindeki fiziksel hasar	68
Şekil 4.54 GP numunelerinde 150 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki basınç dayanımları	68
Şekil 4.55 GP numunelerinde 150 donma-çözülme sonrasındaki basınç dayanımları üzerindeki etkenler	69
Şekil 4.56 GP numunelerinde 150 donma-çözülme çevrimi sonrasında basınç dayanımı için optimum oranları	69
Şekil 4.57 GP numunelerinde 150 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki ağırlık kayıpları	70
Şekil 4.58 GP numunelerinde 150 donma-çözülme çevriminin ağırlık kaybına etkisi	71

Şekil 4.59 GP numunelerinde 150 Donma çözülme çevriminin ağırlık kaybı-basınç dayanımı ilişkisi	71
Şekil 4.60 Su kürü uygulanan GP karışımlarının 150 donma-çözülme çevrimindeki basınç dayanımı kayıpları.....	72
Şekil 4.61 Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 150 donma-çözülme çevrimindeki dayanımı kayıpları.....	72
Şekil 4.62Su kürü uygulanan GP karışımlarının 50 çevrim sonrasındaki basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisi.....	77
Şekil 4.63Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 50 çevrim sonrasındaki basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisi.....	78
Şekil 4.64Su kürü uygulanan GPM karışımlarının 100 çevrim sonrasındaki basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisi.....	78
Şekil 4.65Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 100 çevrim sonrasındaki basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisi.....	79
Şekil 4.66Su kürü uygulanan GP karışımlarının 150 çevrim sonrasındaki basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisi.....	80
Şekil 4.67Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 150 çevrim sonrasındaki basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisi.....	80
Şekil 4.68 MgSO ₄ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış %0 UK esaslı GP karışımlarının basınç dayanımları	81
Şekil 4.69 MgSO ₄ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış %5 UK esaslı GP karışımlarının basınç dayanımları	82
Şekil 4.70 MgSO ₄ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış %10 UK esaslı GP karışımlarının basınç dayanımları	82
Şekil 4.71 MgSO ₄ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış %15 UK esaslı GP karışımlarının basınç dayanımları	83
Şekil 4.72 MgSO ₄ etkisine maruz su kürü uygulanmış %0 UK esaslı GP karışımlarının basınç dayanımları	83
Şekil 4.73 MgSO ₄ etkisine maruz su kürü uygulanmış %5 UK esaslı GP karışımlarının basınç dayanımları	84
Şekil 4.74 MgSO ₄ etkisine maruz su kürü uygulanmış %10 UK esaslı GP karışımlarının basınç dayanımları	84
Şekil 4.75 MgSO ₄ etkisine maruz su kürü uygulanmış %15 UK esaslı GP karışımlarının basınç dayanımları	85
Şekil 4.76 1 ay süresince MgSO ₄ çözeltisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımları.....	86
Şekil 4.77 1 ay MgSO ₄ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımı üzerindeki etkenler	86
Şekil 4.78 3 ay boyunca MgSO ₄ çözeltisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımları.....	87
Şekil 4.79 3 ay MgSO ₄ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımı üzerindeki etkenler	88
Şekil 4.80 6 ay boyunca MgSO ₄ çözeltisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımları.....	88
Şekil 4.81 6 ay MgSO ₄ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımı üzerindeki etkenler	89
Şekil 4.82 9 ay boyunca MgSO ₄ çözeltisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımları.....	89

Şekil 4.83 9 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımı üzerindeki etkenler	90
Şekil 4.84 1 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımı için optimum oranları	91
Şekil 4.85 3 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımı için optimum oranları	91
Şekil 4.86 6 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımı için optimum oranları	92
Şekil 4.87 9 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımı için optimum oranları	92
Şekil 4.88 1 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımları	93
Şekil 4.89 1 ay boyunca $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımına etkisi	94
Şekil 4.90 3 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımları	94
Şekil 4.91 3 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımı üzerindeki etkenler	95
Şekil 4.92 6 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımları	96
Şekil 4.93 6 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımı üzerindeki etkenler	96
Şekil 4.94 9 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımları	97
Şekil 4.95 9 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımı üzerindeki etkenler	98
Şekil 4.96 6 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımı- basınç dayanımı arasındaki ilişki	98
Şekil 4.97 9 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımı- basınç dayanımı arasındaki ilişki	99
Şekil 4.98 1 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının ağırlık kayıpları	99
Şekil 4.99 1 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybı üzerindeki etkenler	100
Şekil 4.100 3 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının ağırlık kayıpları	101
Şekil 4.101 3 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybı üzerindeki etkenler	101
Şekil 4.102 6 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının ağırlık kayıpları	102
Şekil 4.103 6 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybı üzerindeki etkenler	103
Şekil 4.104 9 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının ağırlık kayıpları	103
Şekil 4.105 9 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybı üzerindeki etkenler	104
Şekil 4.106 1 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybı- basınç dayanımı arasındaki ilişki	104

Şekil 4.107 3 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybı- basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	105
Şekil 4.108 6 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybı- basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	105
Şekil 4.109 9 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybı- basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	106
Şekil 4.110 WC ve SC için daldırılmış $MgSO_4$ ağırlık kaybı.....	107



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1 Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri	14
Tablo 3.2 YFC'nun kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	15
Tablo 3.3 ACT Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri	16
Tablo 3.4 Numune kodları ve bağlayıcı karışım oranları	19
Tablo 3.5 Karışımlarda kullanılan malzeme miktarları	20
Tablo 4.1 GP karışımlarına ait akışkanlaştırıcı miktarları.....	29
Tablo 4.2 Farklı kür koşulları için su emme deneyi testi sonuçları.....	31
Tablo 4.3 Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının kapilerite katsayıları	34
Tablo 4.4 Su kürü uygulanan GP karışımlarının kapilerite katsayıları	34
Tablo 4.5 Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının zamana bağlı boy değişimleri...54	
Tablo 4.6 Su kürü uygulanan GP karışımlarının zamana bağlı boy değişimleri	55
Tablo 4.7 Su kürü uygulanan GP karışımlarının 50 donma-çözülme çevriminden sonraki ultrases geçiş hızları.....	73
Tablo 4.8 Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 50 donma-çözülme çevriminde sonraki ultrases geçiş hızları.....	73
Tablo 4.9 Su kürü uygulanan GP karışımlarının 100 donma-çözülme çevriminden sonraki ultrases geçiş hızları.....	75
Tablo 4.10 Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 100 donma-çözülme çevriminden sonraki ultrases geçiş hızları.....	75
Tablo 4.11 Su kürü uygulanan GP karışımlarının 150 donma-çözülme çevriminden sonraki ultrases geçiş hızları.....	76
Tablo 4.12 Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 150 donma-çözülme çevriminden sonraki ultrases geçiş hızları	77

1. GİRİŞ

Sürdürülebilir bir çevre yaklaşımı, günümüzün en önemli ve dikkat çekici unsurlarından birini oluşturmakta, çevreye zarar vermeyen ürünlerin üretimi de tüm sektörler tarafından teşvik edilmektedir (Hossain et al., 2018). Bu sektörlerden biri olan inşaat endüstrisinin önemli çevre sorunlarına neden olduğu ve doğal kaynakların tükenmesinden de sorumlu olduğu bilinmekte, sektörün çevresel etkilerinin minimize edilmesi yönünde politikalar geliştirmesi Birleşmiş Milletler tarafından da vurgulanmaktadır(UNEP, 2018a).

2015 yılında inşaat endüstrisi için global olarak yaklaşık 4.1 milyar ton çimento (van Oss, 2017) ve 25-30 milyar ton da beton üretilmiştir (Monteiro vd., 2017). Betonun temel bir bileşeni olan çimento üretimi enerji yoğun üretim süreci ve kalkerin kalsinasyonu sonucu toplam antropojenik sera gazı emisyonlarının % 5-10'undan sorumludur, ayrıca endüstriyel enerjinin de % 12-15'ini tüketmektedir (Madloul et al., 2011).

Çimento endüstrisi sürdürülebilirlik açısından; (i) CO₂ emisyonlarının kontrolü, (Liu et al., 2018; Miller et al., 2018; Zhang et al., 2018), (ii) çimento üretiminde atık ve yan ürünlerin hammadde ve yakıt olarak kullanımının artırılması, (iii) çok bileşenli çimentoların üretiminin artırılması (P.C, 2016; Samad et al., 2017; Scrivener et al., 2018) ve (iv) düşük karbonlu, düşük sıcaklıklı ve yanmamış klinker ve çimento üretimi gibi (Gartner et al., 2018; Maddalena et al., 2018; Tang et al., 2019) alternatif çalışmalar yürütmektedir.

Kireç ve Portland çimentosundan sonra üçüncü nesil bağlayıcı olarak kabul edilen geopolimerler, çok düşük CO₂ emisyonu ve kalsinasyon gerektirmemesinden dolayı Portland çimentosuna alternatif çevre dostu bir ürün olarak kabul edilmektedir (Sumesh et al., 2017; Emdadi et al., 2017). Geopolimerler CO₂ emisyonlarını azaltmasının yanında UK, YFC vb. endüstriyel atıkların geri dönüşümünü sağlayarak, ekonomiye kazandırılmasına katkıda bulunmaktadır (Neupane, 2016).

Silis dumanı, UK, YFC, kaolinit, pirinç kabuğu külü, cam tozu vb. farklı alüminosilikatlı maddeler geopolimer üretiminde kullanılmakta olup bu malzemelerin reaktivitesi kimyasal yapılarına, mineralojik kompozisyonuna, morfolojilerine, inceliğine ve camsı faz içeriğine bağlı olarak değişmektedir (Sumesh ve ark., 2017; Emdadi ve ark., 2017).

Son yıllarda geopolimerler erken yüksek basınç dayanım, düşük büzülme ve geçirgenlik, asitlere ve sülfata karşı sağladığı yüksek direnç ve yüksek sıcaklıklara gösterdiği mükemmel performans nedeniyle büyük bir ilgi görmektedir. Bu gelişmiş özelliklerden dolayı geopolimerler; yapı malzemeleri, beton, yüksek sıcaklığa dayanıklı ve elyaf takviyeli kompozitler, kimyasal ve nükleer tesislerde atıkların çevreye etkilerinin azaltılması için farklı sürdürülebilir ürünlerin geliştirilmesinde Portland çimentosuna alternatif bir ürün niteliği taşımaktadır.

Bu çalışmanın amacı, SS ve SH aktivatörlü geopolimer harç numunelerinde farklı oranlarda YFC, UK ve ACT ilave edilerek üretilen numunelerdeki etkisi incelenmiştir. Geopolimer harç numunelerinin üretiminde iki farklı kür işlemi uygulanmıştır. Kür sonrası numunelerin fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir.

Çalışmada temel olarak;

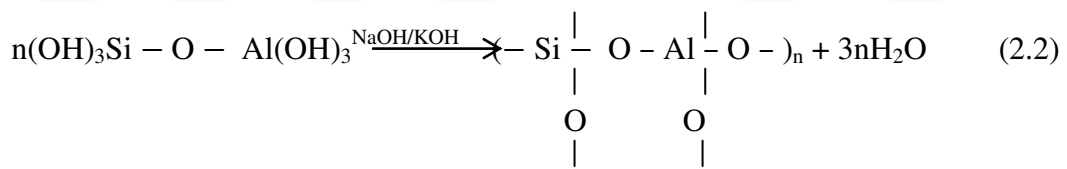
1. Türkiye’de UK ve YFC gibi endüstriyel atıkların geri dönüşüm oranlarının artırılarak bu ürünlerin ekonomiye yeniden kazandırılması, çevreye etkilerinin azaltılması,
2. Alternatif üçüncü nesil bağlayıcılar kullanılarak üretilen kompozitlerin yaygınlaştırılması,
3. Çimento esaslı kompozit ürünlerin üretiminde enerji tüketimin azaltılması,
4. Farklı karışım ve kür koşullarının geopolimer harçların fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerine etkisinin araştırılması hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

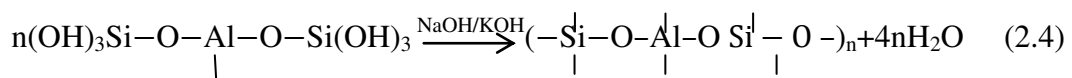
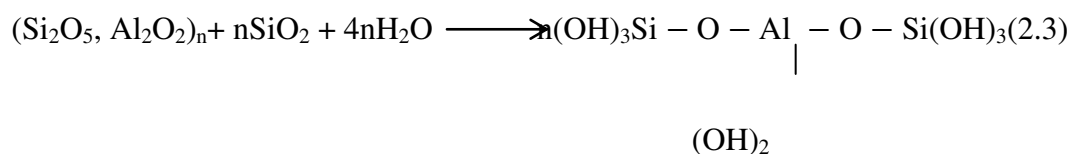
2.1. Geopolimer

Geopolimer, kireç ve Portland çimentosundan sonra üçüncü nesil çimento olarak kabul edilir. "Geopolimer" terimi genel olarak "inorganik polimerler", "alkali-etkin çimentolar", "jeoçimentolar", "alkali-bağlamalı seramikler", "hidroseramikler", vb. olarak da yaygın kullanılan biçimsiz bir alkali alüminosilikatı açıklamak için kullanılır. Bu kadar çeşitli isimlendirmeye rağmen, bu terimlerin tümü aynı kimya kullanılarak sentezlenen malzemeleri tarif eder (Duxson ve ark. 2007). Temelde tekrar eden bir sialat monomer biriminden oluşur ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-$). Geopolimerizasyon teknolojisinde katı ham madde olarak kaolinit, feldispat ve uçucu kül, metalürjik cüruf, maden atıkları vb. gibi endüstriyel katı artıklar gibi çeşitli alüminosilikat malzemeler kullanılmıştır. Bu alüminosilikat kaynakların reaktivitesi kimyasal yapılarına, mineralojik yapılarına, morfolojilerine, incelik ve camsı faz içeriklerine bağlıdır. Kararlı geopolimerin geliştirilmesinde ana kriterler, kaynak malzemelerin oldukça biçimsiz olması ve yeterli reaktif camsı içeriğe, düşük su talebine sahip olması ve alüminyum kolayca serbest bırakabilmesidir. Sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve potasyum silikat (K_2SiO_3) gibi alkaline etkilendiriciler, alüminosilikat malzemeleri etkilendirmek için kullanılır. Uçucu kül bazlı geopolimer oluşumunun temel ve basitleştirilmiş prensibi, uçucu kül içinde alüminosilikatın alkali-kolaylaştırılmış ayrışması ve daha sonra polikondensasyondur. Reaksiyonlar, ılıman sıcaklıklar altında devam edebilir, böylece üretimin enerji ve kaynak verimli olduğu, yani daha temiz olduğu kabul edilir. Ancak, bu süreçte meydana gelen gerçek reaksiyonlar çok karmaşık ve belirsiz kalmaktadır. Görünüşe göre, uçucu kül ve alkali arasındaki reaksiyonlar ve ortaya çıkan Si^{4+} ve Al^{3+} türleri arasındaki yoğunlaşma, ardından nihayet yeni biçimsiz üç boyutlu ağ yapısına sahip yeni alüminosilikat bazlı bir polimere yol açan diğer karmaşık çekirdekleşme, oligomerizasyon ve polimerizasyon arasındaki reaksiyonlar vardır. Testlerde veya kullanımlarda, uçucu kül bazlı geopolimer macunu hazırlandığı gibi bir kalıba dökülür ve gerekli sıcaklıkta bir fırına yerleştirilir veya yapının oluşturulması için

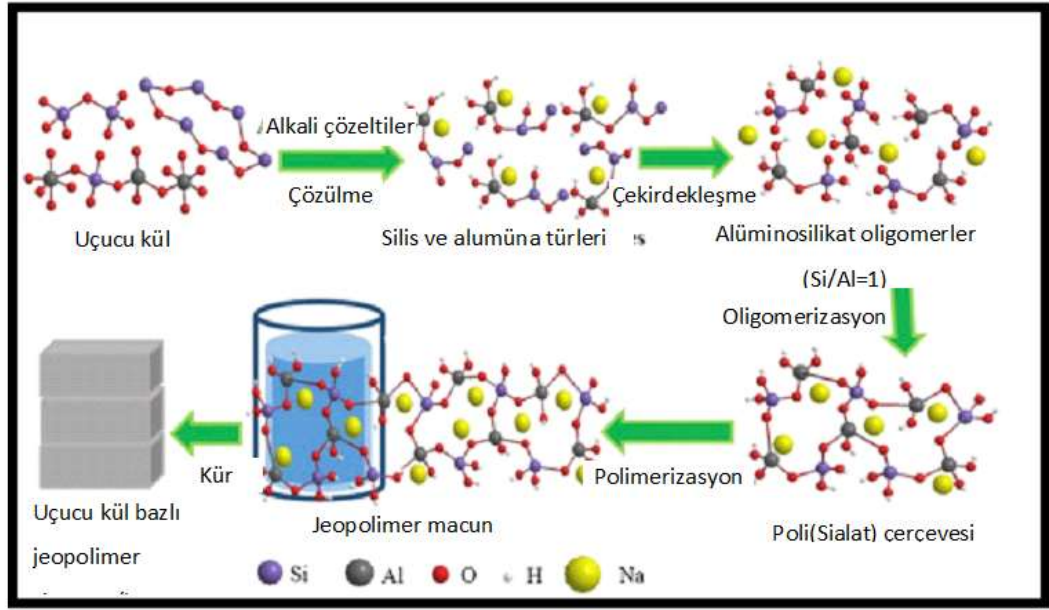
2002). Alüminosilikat monomerlerde, Si^{4+} kısmen Al^{3+} ile ikame alüminosilikat zincirlerinde ortaya çıkan negatif yük Na^+ veya K^+ kanyonlarla dengelenir (Dimas ve ark., 2009). Bu bağlamda, Si/Al oranı ortaya çıkan Geopolimer malzemelerin nihai yapısını önemli ölçüde belirler (Dimas ve ark., 2012).

$$(\text{Si}_2\text{O}_5, \text{Al}_2\text{O}_2)_n + 3n\text{H}_2\text{O} \rightarrow n(\text{OH})_3\text{Si} - \text{O} - \text{Al}(\text{OH})_3$$


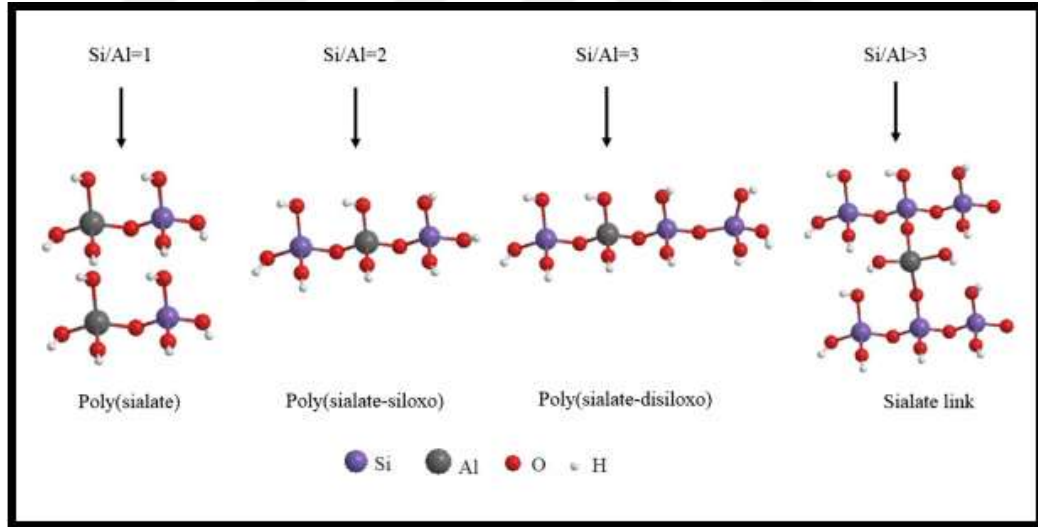
poli(sialat)


$$0 \quad 0 \quad 0$$

poli(sialat- silokso)



Şekil 2.1 Uçucu kül katkılı Geopolimer üretim süreci



Şekil 2.2 Molar oranına bağlı olarak farklı Si/Al bağları

2.2. Geopolimerin Dayanımını Etkileyen Unsurlar

2.2.1. Aktivatörler

Daha önce yapılan çalışmalar, sodyum silikatın sodyum hidroksite olan oranının, Geopolimer harcın mekanik özelliklerinin gelişiminde önemli bir rol

oynayabileceğini göstermiştir. Huseien v.d. (2018) sodyum hidroksit) çözeltisinin değişen yoğunluğu (2 ile 16 M arası) altındaki ortam sıcaklığının GP üzerindeki etkisini incelemişlerdir. GP'ler, basınç, yarma çekme ve eğilme mukavemeti gibi mekanik testler gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Bu gibi GP'lerin işlenebilirliği ve priz süresine ilişkin sonuçların, artan alkali yoğunluğu ile doğrusal olarak azaldığı görülmüştür. Buna karşılık, GP'lerin basınç, yarma çekme ve eğilme mukavemeti ve yoğunluk, artan alkali derişimi ile artış göstermiştir. Omar v.d. (2015), $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ kitlesel karışım yoğunluğunun sertleştirilmiş UK geopolimerlerinin basınç dayanımı ve mikro yapı özellikleri üzerindeki farklı dönemlerdeki etkisini incelemişlerdir. Farklı kür koşullarının UK geopolimerinin dayanım gelişimi üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, 1.00 oranındaki $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ile hazırlanan alkali aktivatörünün, yüksek mukavemetli UK geopolimer malzemenin geopolimerizasyon reaksiyonunu ve gelişimini destekleyecek yeterli alkaliliği sağladığını ortaya koymuştur. Omar v.d. (2015), sodyum silikatın soydum hidroksite oranının harçların basınç mukavemeti üzerindeki etkilerini, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 ° C yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmadan 1 gün ve 7 gün önce ve sonra incelemişlerdir. Basınç mukavemetinin, artan sodyum silikat içeriği ile artış gösterdiği görülmüştür. Sodyum silikatın sodyum hidroksite oranının artış göstermesi ile mukavemet arttığı için, yüksek sıcaklıklara maruz kalma açısından benzer bir eğilim gözlemlenirken, genel tutumda sıcaklığa daha fazla maruz kaldıkça basınç mukavemetinde azalma olmuştur.

Patankar v.d. (2014), soydum hidroksitin yoğunluğunun, fırındaki kür sıcaklığının ve süresinin, uçucu kül bazlı geopolimer harcının basınç mukavemeti üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Test sonuçları, hem işlenebilirlik ve hem de basınç mukavemetinin tüm çözelti-uçucu kül oranları açısından sodyum hidroksit çözeltisinin yoğunluğundaki artış ile birlikte arttığını göstermiştir. Kür sıcaklığı da mukavemetin hızlandırılmasında hayati bir rol oynamaktadır.

Parthiban v.d. (2014), SH yoğunluğunu 10,12 ve 14 M olmak üzere ve alkali çözeltisi oranını ($\text{SiO}_3^{2-} / \text{OH}^-$) 1.0, 1.5 ve 2.0 olmak üzere değiştirerek cüruf bazlı geopolimer betonun basınç mukavemetinin değişimini incelemişlerdir. Karışımların

basınç mukavemeti, farklı kür sürelerindeki değişimlerinin incelenmesi için 3, 7, 14 ve 28 günlük dayanımlar kürsel açısından belirlenmiştir. Test sonuçları, SH yoğunluğu ve alkali oranındaki artış ile birlikte geopolimer karışımlarının basınç mukavemetinin de arttığını göstermektedir.

2.2.2. SiO₂/ Na₂O Oranı

SiO₂ / Na₂O oranı geopolimer tasarımdaki önemli bir parametredir. SiO₂ / Na₂O oranındaki değişimler, sentezlenen jel ürün ve mekaniğin bütün özelliklerini belirleyecek şekilde, alkali/silikat çözeltisindeki çözünmüş türlerin polimerleşme derecesini anlamlı bir şekilde değiştirir. Bocullo v.d. (2017) 0.8-3.1 arasında değişen SiO₂/Na₂O oranında 8 farklı karışım numunesi hazırlamıştır. Numuneler 7, 14 ve 28 günlük kürün ardından basınç mukavemeti açısından test edilmiştir. Her bir sertleşmiş karışımın mineral bileşimi, XRD ile incelenmiştir. 2.0SiO₂/Na₂O oranına sahip numuneler, en yüksek basınç mukavemetini göstermişlerdir. 1.5-2.5 aralığında olan SiO₂/Na₂O oranına sahip numuneler, kabul edilebilir mukavemet göstermişlerdir. Bu aralık dahilinde olmayan numuneler, gerekli bağlayıcı maddelerini yeterince üretememiştir. Evathi v.d. (2014), taban külü bazlı Geopolimer harcın basınç mukavemeti üzerinde etkisi olduğu düşünülen SiO₂/Na₂O molar oranının, Na₂SiO₃/NaOH oranının ve kürleme şeklinin etkisini incelemişlerdir. Sodyum silikat çözeltisinin molaritesi 8M olarak sağlanmıştır. 60°C sıcaklıkta ve buhar kürü uygulanmıştır. Test sonuçları, 1 oranındaki SiO₂/Na₂O ve 2 oranındaki Na₂SiO₃/NaOH harcında, her iki kür koşulları altında daha yüksek basınç mukavemeti sağlamıştır. Mohammed v.d. (2014), bir Aktivatörün silikat içeriğinin (SiO₂/Na₂O) alkali ile aktifleştirilen yüksek fırın cürufunun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Test numunesinin basınç mukavemetinin ve ultra ses geçiş hızının, silikat içeriği oranındaki artış ile arttığını gözlemlemiştir. Bignozzi v.d. (2014), 0.12 ile 0.20 arasında değişen Na₂O/SiO₂ kütleli (molar) oranını kullanılarak iki tür uçucu külü aktive etmişlerdir. Taze ve sertleşmiş durumdaki GP davranışının uçucu kül türlerinden daha fazla etkilendiği görülmüştür.

2.2.3. Su-Geopolimer Harç Oranı

Genel olarak, su-geopolimer katı maddelerinin oranı arttıkça, geopolimer harcın basınç mukavemeti azalır. Bu eğilim, su-çimento oranının Portland çimentolu betonun basınç mukavemeti üzerindeki bilinen etkisi ile benzerdir. Xiem (2016), farklı uçucu kül içeriğine sahip geopolimer harçların kür sürelerinin, kür sıcaklıklarının ve su miktarının mekanik özellikler üzerindeki etkilerini ortaya koymuşlardır. Sonuçlar, geopolimer harcın nihai yapısının ve fiziksel özelliklerinin, su-uçucu kül oranı ve kül içeriği, kür ve partikül büyüklüğünü kapsayan çeşitli materyal parametrelerine bağlı olduğunu göstermiştir. Bilhassa, uçucu külün kalsiyum içeriği ve su/uçucu kül oranının, geopolimer harçlarının nihai basınç mukavemetini üzerinde önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Xu v.d. (2016), aktivatörün ve su-bağlayıcı madde oranlarının, bir bağlayıcı olarak uçucu kül ile ve sodyum hidroksit ve sodyum silikat tarafından aktifleştirilen uçucu kül ve cüruf (95:5 ile 50:50 arasında değişen uçucu kül-cüruf oranı) karışımı ile hazırlanan geopolimer harcın basınç mukavemeti üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuçlara göre bütün numunelerde, su ile geopolimer-katı madde oranı olarak ifade edilen su içeriği azaldıkça ve alkali ile bağlayıcı madde olarak ifade edilen aktivatörlerin miktarı arttıkça, harcın basınç mukavemeti artış göstermiştir. Jansen v.d. (2015), su-katı madde oranının uçucu kül-atık cam geopolimer harcının basınç mukavemeti ve morfolojisi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Su-katı madde oranının öneminin, karışımın bileşimine bağlı olduğu görülmüştür. Patankar (2013), su ile geopolimer bağlayıcı madde oranının işlenebilirlik üzerindeki etkisini 8 saatlik bir süre boyunca 900 °C sıcaklıktaki fırında ısı küründen sonra test edilen akış ve basınç mukavemeti açısından incelemek için deneysel bir araştırma gerçekleştirmiştir. Test sonuçları, su-geopolimer bağlayıcı madde oranındaki artış ile geopolimer betonun akıcılığının da arttığını göstermiştir. Ancak, su-geopolimer bağlayıcı madde oranındaki artış ile birlikte basınç mukavemeti de azalmıştır.

2.2.4. Sıcaklık ve Kürleme süresi

Kürleme sıcaklığının etkisi geniş ölçüde incelenmiş olup, geopolimerlerin sentezindeki önemli bir parametredir. Geopolimerler için silikat-alüminat jellerinin

üretilmesi, kristalleşme için (oda sıcaklığından) yaklaşık 175°C'ye kadar sıcaklıklar gerektirmektedir. Bununla birlikte, geopolimerleşme reaksiyonunun mekanizması, üç boyutlu bir Si-O-Al-O polimer jeli meydana getirmek için alkali aktivatörünün uygun Na⁺ ve OH⁻ türlerinin mevcut olması durumunda UK'nın Si ve Al oksitlerinin hızlı çözünmesine ve çoklu yoğunlaşmasına dayanmaktadır (Ryu v.d., 2013). Danial Nasr v.d. (2018), alkali aktivatör yoğunluğunun ve kürleme koşullarının (çevresel, su ve ısıl kürleme), AAS harçlarının ısıl direnci özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, alkali aktivatörünün dozajı ne olursa olsun çevresel ve su kürlemesi koşullarına kıyasla, ısıl kürlemenin yüksek sıcaklıklara maruz kalındıktan sonra AAS harçlarının basınç mukavemeti üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Al-Majidi v.d. (2016), UK ve YFC oranları değiştirilerek ve bunun işlenebilirlik, priz süresi ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi gözlemlenerek, ısı ile sertleştirilmiş numunelere kıyasla ortam sıcaklığında sertleşmiş geopolimer harcı incelemişlerdir. Ortam sıcaklığında sertleştirilmiş 28 günlük bir harcın mukavemetinin, ısı ile sertleştirilmiş numunelerle benzer olduğu görülmüştür.

Wardhono v.d. (2015), YFC ve UK oranını değiştirerek, ortam sıcaklığında sertleştirilmiş geopolimer betonu incelemişlerdir. 0.5:0.5 UK ile YFC karışımının, 3 günde %45, 7 günde %75 ve 14 günde %78 mukavemet gelişimi ile (28 günlük mukavemete kıyasla), 62.49 MPa olarak 28 günlük en iyi mukavemeti gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Mathew v.d. (2014), daha kısa bir süre zarfında daha yüksek ısılarda sertleştirilen geopolimerler ve 28 günlük sürede hava sıcaklığında sertleştirilen geopolimerler arasında basınç mukavemetini açısından minimal bir fark bulmuşlardır. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda kürlemenin, hızlı kür açısından faydalı olduğunu göstermektedir. Ancak daha uzun bir kür süresi sağlanarak, yüksek kürleme sıcaklığı olmadan, yüksek basınç mukavemetlerine ulaşılabilir. Kupaei v.d. (2013) tarafından yapılan, 7 günde oda sıcaklığında sertleştirilen numuneler için 28 günlük basınç mukavemetinin %60'ının elde edildiği ve yüksek sıcaklıklarda (65 °C) sertleştirilen numuneler için de 28 günlük basınç mukavemetinin %80'inin 7 günde elde edildiği bir araştırmadaki veriler de bu sonucu desteklemektedir. Bu bulgunun, geopolimer bağlayıcı maddelerinin endüstriyel uygulaması açısından önemli sonuçları olacaktır.

2.3. Geopolimerin Genel Özellikleri

2.3.1. Geopolimer Harcın Kuruma Büzülmesi

Geopolimerlerin büzülmesini, beton hacmindeki zamana bağlı düşüş olarak tanımlayabiliriz. Sünmenin aksine, kuruma büzülmesi dış etkenlerden etkilenmez. Plastik, kimyasal, ısı ve kuruma büzülmesi şeklinde dört gruba ayrılmaktadır. Thomas v.d. (2017), bağlayıcı türünün, aktivatör yoğunluğunun, mukavemetin, yaştan ve kütleme yönteminin kuruma büzülmesinin ortaya çıkması üzerindeki etkisini alkali ile aktifleştirilen uçucu kül ve cüruf çimento betonu açısından incelemişlerdir. AAC açısından, $1200 \mu \epsilon$ 'yi aşan (yüzde 0.12 gerinme) erken dönemli büzülmesini gözlemlemiştir ve alkali ile etkinleştirilmiş cüruf harcının, Portland çimentosuna veya alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül harcına kıyasla su kaybına daha duyarlı olduğu gözlemlemiştir.

Deb v.d. (2015), F sınıfı uçucu külün %10 veya %20 YFC ile değiştirildiği ve sodyum silikatın sodyum hidroksite (SS/SH) oranının ya 1.5 ya da 2.5 olduğu, geopolimer beton karışımlarının büzülmesi davranışını incelemişlerdir. 180 günlük bir döneme kadarki geopolimer harcının büzülmesinin değer basınç mukavemetine sahip betonunun büzülmesi ile benzerlik göstermektedir. Lee v.d. (2014) alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül/cürufun büzülme özelliklerini ve bunu etkileyen unsurları incelemişlerdir. Kuruma büzülmesini belirlemek için bir dizi test gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarından yola çıkarak, uçucu kül hamuru test sonuçlarının, çimento hamurundakine kıyasla uçucu kül hamurunda daha yüksek mezo gözenek hacminin neden olabileceği, daha yüksek kuruma büzülmesi gösterdiği sonucuna ulaşıldığı belirtilmiştir.

Shen v.d. (2011), çimentoharçlarındaki büzülmeye kıyasla 60 güne kadar oluşan kuruma büzülmesi açısından YFC ve UK ile hazırlanan harçları incelemişlerdir. UK için kuruma büzülmesinin, saf YFC hamurunun kuruma büzülmesi oranından daha düşük olduğu görülürken, en düşük kuruma büzülmesi değerinin çimento hamurunda gerçekleştiği ve bu değer YFC için en yüksek seviyede olduğu görülmüştür.

2.3.2. Donma-Çözülmenin Geopolimer Harcı üzerindeki Etkileri

Temuujin v.d. (2014), NaOH/Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktifleştirilen F sınıfı uçucu külden geopolimerharç numuneler hazırlamış ve 22 saat boyunca 70 °C sıcaklıkta olgunlaştırmıştır. 40'ın üzerinde donma-çözülme döngüsü sonrası Na₂SiO₃ çözeltisinin uçucu kül bazlı geopolimerin donma-çözülme direncini arttırdığını belirlemiştir.

Sun v.d. (2013), laboratuvar koşulları altında olgunlaştırılan uçucu kül bazlı alkali ile aktifleştirilmiş harçların donma-çözülme direncini ve ayrıca harçların sülfat ve sülfürik asit direncini incelemişler ve Portland çimentosu harçları ile bunları kıyaslamışlardır. Bütün numunelerde kütle, dinamik elastisite modülü ve basınç mukavemetinde zamanla artış olduğunu ortaya koymuşlardır.

2.3.3. Sülfat Çözeltisinin Geopolimer Harç üzerindeki Etkileri

Magnezyum veya sodyum sülfatağı, GP direncini etkileyen önemli sorunlardan biridir. Harç numunesindeki ürünlerin dış ve iç kaynaklardan gelen aşırı miktardaki sülfat çözeltisine daldırılmasından kaynaklı karmaşık bir hasar olarak değerlendirilmektedir. Sülfat çözeltisi uçucu kül bazlı geopolimerde dikey çatlaklara yol açar ve mukavemetin bozulmasına neden olur. Buna ek olarak, sülfat çözeltisi genellikle geopolimer jeldeki Si-O-Si- bağlarının zarar görmesine neden olur (Baščarević v.d., 2015). Elyamany v.d. (2018), kürleme sıcaklığının, sodyum hidroksit çözeltisi molaritesinin, alkali çözeltisi ile bağlayıcı madde oranının ve bağlayıcı madde türünün geopolimer harcın magnezyum sülfat direnci üzerindeki etkisini incelemişler ve çimentolu harç ve çeşitli geopolimer harçlar arasında bir kıyaslama yapmışlardır. Numuneler, 48 haftaya kadar %10 magnezyum sülfat çözeltisine daldırılmış, artan kürleme sıcaklığının, sodyum hidroksit çözeltisi molaritesinin ve azalan alkali çözeltisi ile bağlayıcı madde oranının, geopolimer harcın magnezyum sülfat direncini arttırdığını göstermiştir. Değirmenci v.d. (2017), 24 hafta boyunca geopolimer harçların %5 ve %10 luk sodyum, magnezyum sülfat ve sülfürik, hidroklorik asitekarşı etkilerini incelemişlerdir. Değerlendirmeler görsel gözlem, ağırlık değişimi ölçümü ve basınç dayanımı kaybı olarak

yapılmıştır. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının, hem sülfat hem de aside maruz bırakılma açısından geopolimer harcın basınç dayanımı kaybı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Yüksek $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının, daha yüksek bir basınç dayanımı kaybına yol açtığını göstermiştir.

2.3.4. Geopolimerin Özelliklerine İlişkin Önceki Çalışmalar

Wardhono v.d. (2017), alkali ile aktive edilmiş cürufun mekanik özelliklerinin ve düşük kalsiyumlu uçucu küllü geopolimer betonların karşılaştırılmasını 540 gün boyunca incelemişlerdir. İlk 90 gün içerisinde uçucu kül katkılı geopolimer betona kıyasla alkali ile aktive edilmiş betonunun daha yüksek basınç ve çekme mukavemetine, elastisite modülüne ve daha düşük yayılma özelliklerine sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, 90 ile 540 gün arasında alkali ile aktive edilmiş cürufu betonun performansında bir düşüş gözlemlenirken, uçucu kül katkılı geopolimer betonunda performans artışı kaydedilmiştir.

Torres-Carrasco ve Puertas (2015), atık camın alkalilerle aktive edilerek kısmi bir ikame malzemesi olarak geri dönüşüm potansiyelini araştırmış ve atık camdan çözünabilir silisin geopolimerizasyon reaksiyonunda jelin bir kısmını oluşturduğunu tespit etmiştir. Bu çalışma, daha fazla atık malzemenin geri dönüşümüne katkıda da bulunabileceğini alkali aktivitesi ile ilgili maliyetleri de düşürme potansiyelinin olduğunu göstermektedir.

Qureshi ve Ghosh (2013), SiO_2 içeriği, su emme ve alkali ile aktive edilmiş cürufhamurunun görünür boşluk yapısı arasında bir ilişki bulmuşlardır. %1,6 ile %4,8 arasında değişen SiO_2 için belirgin bir boşluk yapısı ve su emme gözlenmiştir. %6,4 oranında ki SiO_2 içeriğinde ise boşluk yapısı ve su emme oranında ani bir düşüş gerçekleşmiştir. %1,6–4,8'lik SiO_2 oranına sahip olan hamurlarda daha yüksek bir boşluk yapısı ve daha yüksek bir su emme oranı gözlenmiştir. %6,4 ve %8 SiO_2 içeriğinde, su emme oranı, sırasıyla %6,06 ve %9,37 oranında gerçekleşmiştir; bu, çözünür silikatların daha yoğun ve homojen bir mikro oluşturmasını sağladığını göstermektedir.

Shaikh (2014), yüksek SH konsantrasyonu ve daha yüksek miktarda SS çözeltisi içeren aktive edilmiş betonların kılcal geçirirmliliğinin önemli ölçüde azaltılmasının, matristeki artan miktarda sodyum-alümino-silikat jeli oluşumundan sorumlu olabileceği sonucuna varmıştır.

Atis ve ark. (2015), F sınıfı UK'ü SH ile etkinleştirerek alkali etkin UK geopolimer harçların mekanik özelliklerini araştırmıştır. Harç karışımlarının Na konsantrasyonları, %2'lik bir artış ile %4'ten %20'ye, kürleme sıcaklıklarında 45 - 115 °C arasında değiştirilmiş, sırasıyla 120 ve 15 MPa'ya kadar çok yüksek basınç ve eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir.

Deb ve ark. (2014), farklı oranlarda aktivatörlerin YFC ve UK bazlı geopolimer betonun işlenebilirliği ve dayanım özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmiş,, karışımlarda yüksek YFC ve düşük SS/SH oranına sahip geopolimer betonlarında dayanımda önemli bir artış ve işlenebilirlikte bir miktar azalma gözlenmiştir.

Wardhono (2015), YFC ve F sınıfı uçucu kül yüksek alkali çözeltisi ile aktive edilmiş, ortam sıcaklığında harç numuneleri olgunlaştırılmış, 0.5 cüruf: 0.5 uçucu kül karışım oranının en iyi mukavemet sonuçlarını verdiğini göstermiştir.

Al-Attas ve ark. (2014), bir geopolimer harcın mekanik özellikleri için optimum karışımın %70 YFC ve %30 UK içerdiğini bulmuşlar, optimum karışım tasarımının yanında kürleme koşulları ve bağlayıcı kompozisyonunda önemli ölçüde sonuçlar üzerinde etkili olacağını, basınç dayanımı gelişiminin %90'ının 7 günde elde edilebileceğini vurgulamamışlardır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

Yapılan deneysel tez çalışmasında; standart agrega, yüksek fırın cürufu (YFC), uçucu kül (UK), atık cam tozu (ACT), sodyum hidroksit (SH), sodium silikat (SS), süper akışkanlaştırıcı (SA) ve su kullanılmış, malzemelerin özellikleri aşağıdaki bölümlerde ayrı ayrı tanımlanmıştır

3.1.1. Uçucu Kül

Araştırmada Çatalağzı-Zonguldak Termik Santrali uçucu kül tesisinden temin edilen uçucu kül (UK) kullanılmıştır. UK önce etüvde 105 ± 5 °C de 24 saat süreyle kurutulmuş, daha sonra çelik bilyalı öğütücüde 90 dk katkısız, ek olarak da 120 dk süreyle öğütmeyi kolaylaştırıcı katkı ilave edilerek öğütülerek $6100\text{ cm}^2/\text{g}$ blaine inceliğine sahip UK elde edilmiştir. UK F sınıfı ($S+A+F=78,36$) kategorisinde olup, özgül ağırlığı $2,39\text{ g/cm}^3$ dir. UK ün kimyasal özellikleri Çizelge 3.2 de tanımlanmıştır.

Tablo 3.1 Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri

Oksit	%	ASTM C618	
		F	C
SiO ₂	61,81		
Al ₂ O ₃	9,54		
Fe ₂ O ₃	7,01		
CaO	1,77		
MgO	2,56		
SO ₃	0,31	<5	<5
K ₂ O	0,99		
Na ₂ O	2,43		
S + A + F	78,36	>70	>50
LOI	2,2	< 12	< 6
Nem içeriği, maks, %		3	3

3.1.2. Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu (YFC) olarak Ereğli Demir Çelik Fabrikası atığı olan ürün kullanılmış, öğütülmüş olarak OYAK Bolu Çimento San. A.Ş. den temin edilmiştir. YFC nun özgül ağırlığı 2.95 g/cm^3 , Blaine değeri $4989 \text{ cm}^2/\text{g}$ dır. 7 ve 28 günlük pozolanik aktivite indeksleri sırasıyla 54,2 ve 72,5 olarak belirlenmiştir. Cürufun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 3.3 te tanımlanmıştır.

Tablo 3.2YFC'nunkimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal gereksinimi	Elde edilen sonuçlar %	EN 197-1 Standart limit değerler	Test metodu
MgO	5,75	Max. 18	TS EN 196-2
S(sulfide)	0,54	Max. 2.0	TS EN 196-2
SO ₃	0,19	Max. 2.5	TS EN 196-2
CL ⁻	0,0185	Max. 0.1	TS EN 196-2
Moisture	0,06	Max. 1.0	TS EN 15167-1 EK A
Na ₂ O	0,56	-	TS EN 196-2
K ₂ O	0,28	-	TS EN 196-2
Na ₂ O Equivalent	0,74	-	TS EN 196-2
Fiziksel gereksinimi			
Özgül ağırlık g / cm^3	2,95	-	TS EN 196-6
Özgül yüzey cm^2 / g	4989	Min. 2750	TS EN 196-6
Mineralojik özellikler	%		
Cam içeriği	100.00	-	TS EN 196-2
LOI	0,09	Max. 3.0	TS EN 196-2

3.1.3. Cam tozu

Geopolimer harçların üretiminde atık cam kullanılmıştır. Cam parçaları önce yeterli boyuta gelene kadar kırılmış, daha sonra çelik bilyalı öğütücüde 90 dk katkısız, ek olarak da 120 dk süreyle öğütmeyi kolaylaştırıcı katkı ilave edilerek öğütülmüştür. Atık cam tozunun (ACT) özgül ağırlığı 2.56 g/cm^3 , Blaine değeri $5320 \text{ cm}^2/\text{g}$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.3ACT Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri

Oxide	%
SiO ₂	71
Al ₂ O ₃	1,57
Fe ₂ O ₃	0,39
CaO	11,41
MgO	1,24
SO ₃	0,07
K ₂ O	0,54
Na ₂ O	12,89
S +A+ F	72,96
LOI	0,16



Şekil 3.1Bilyalı değirmen

3.1.4. Standart Kum

Çalışmada Limak Trakya Çimento Fabrikasından temin edilen TS EN196-1 standardına uygun CEN Standart Kumu kullanılmıştır. Standart kumun maksimum tane boyutu 2 mm olup, tane boyutu dağılımı Çizelge 3.4 de verilmiştir.



Şekil 3.2. Standart Kum

3.1.5. Su

Geopolimer harçların hazırlanmasında karışım ve kür suyu olarak TS-EN 1008 standardına uygun içme suyu kullanılmıştır.

3.1.6. Alkali Aktivatörler

Geopolimer harçların aktivasyonu için alkali aktivatör olarak NaOH (SH) ve Na_2SiO_3 (SS) kullanılmıştır. SH granüle formda ve %97 saflık değerindedir. SH laboratuvar ortamında 16M olacak şekilde hazırlanmıştır. Firma verilerine göre SS'in özgül ağırlığı 1.35 g/cm^3 değerindedir ($\text{Na}_2\text{O} = \%13$, $\text{SiO}_2 = \%30$ ve su = %57). SH ve SS çözeltileri 24 saat önce hazırlanarak laboratuvar ortamında bekletilmiştir.



Şekil 3.3Sodyum hidroksit peletleri



Şekil 3.4 Sodyum silikat çözeltisi

3.1.7. Akışkanlaştırıcı

Geopolimer harçların işlenebilirliğini arttırmak için polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

3.2. Geopolimer Harçların Karışım Dizaynı

Tez çalışması kapsamında biri kontrol olmak üzere toplam 16 farklı geopolimer karışımı hazırlanmıştır. Kontrol karışımında bağlayıcı olarak YFC, diğer harç karışımlarında bağlayıcı olarak farklı oranlarda YFC, UK, ve ACT kullanılmıştır. Geopolimer harçların aktivasyonunda SS ve SH %50 oranında (ön denemelerde SS ve SH için farklı karışım oranları denenmiş, basınç dayanımı üzerinde %50 oranındaki karışımın etkili olduğu gözlenmiştir) karışıma ilave edilmiştir.

3.2.1. Alkali Çözeltilerin Hazırlanması

Granüler haldeki SH ve su tartılarak suda çözündürülmüş, SH ısı yayarak çözöldüğünden çözelti laboratuvar sıcaklığına gelmesi için dinlendirilmiş, hazırlanan her iki çözeltide 24 saat süreyle laboratuvar ortamında bekletilmiştir. SH ve SS 12 molarite olarak hazırlanmıştır.

3.2.2. Geopolimer Harç Numuneleri

Geopolimer harçların fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerinin belirlenmesi için 50 x 50 x 50 mm küp, 25 x 25 x 2850 mm ve 40 x 40 x 160 mm boyutunda prizmatik numuneler hazırlanmıştır.

3.2.3. Harç Karışımlarının Özellikleri ve Numunelerin Hazırlanması

Tez çalışmasında YFC, UK ve ACT bileşenlerinden oluşan puzolanik katkılarla oluşturulan geopolimer harçların özelliklerinin belirlenmesi amacıyla farklı boyutlarda harç numuneleri hazırlanmıştır. Numune kodları, karışımda kullanılan bağlayıcı malzeme ve oranlarını belirten Çizelge 3.8 de verilmiştir. YFC esas bağlayıcı olarak belirlenmiş ve kontrol harcında %100 oranında kullanılmıştır. I. grup numunelerde ACT %5, 10, 15 oranında YFC yerine ikame edilerek ACT nun YFC üzerindeki etkisi araştırılmıştır. II., III. ve IV. grup numunelerde ACT oranları sabit tutularak UK %5, 10 ve 15 oranlarında yine YFC yerine ikame edilerek UK ün YFC + ACT katkılı geopolimer harçların özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Tablo 3.4 Numune kodları ve bağlayıcı karışım oranları

Grup	Numune kodu	YFC (%)	ACT (%)	UK (%)
I	K	100	0	0
	5C	95	5	0
	10C	90	10	0
	15C	85	15	0
II	5U	95	0	5
	5C5U	90	5	5
	10C5U	85	10	5
	15C5U	80	15	5
III	10U	90	0	10
	5C10U	85	5	10
	10C10U	80	10	10
	15C10U	75	15	10
IV	15U	85	0	15
	5C15U	80	5	15
	10C15U	75	10	15
	15C15U	70	15	15

Harç numunelerin bileşimini oluşturan tüm malzemelerin miktarlarını belirten Çizelge 3.9 da verilmiştir.

Tablo 3.5 Karışımlarda kullanılan malzeme miktarları

Numune kodu	Standart Kum (g/dm ³)	UK (g/dm ³)	ACT (g/dm ³)	YFC (g/dm ³)	SS (g/dm ³)	SH (g/dm ³)	Su (g/dm ³)	Akışkanlaştırıcı (g/dm ³)
K	1000	0,000	0,000	810,500	162	162	65,775	4,860
5C	1000	0,000	405,500	769,975	162	162	65,775	14,600
10C	1000	0,000	81,050	729,500	162	162	65,775	11,340
15C	1000	0,000	121,75	688,925	162	162	65,775	9,720
5U	1000	40,525	0,000	769,975	162	162	65,775	6,480
5C5U	1000	40,525	40,500	729,50	162	162	65,775	6,480
10C5U	1000	40,525	81,050	688,925	162	162	65,775	6,480
15C5U	1000	40,525	121,575	648,400	162	162	65,775	10,407
10U	1000	81,050	0,000	729,450	162	162	65,775	15,189
5C10U	1000	81,050	40,500	688,950	162	162	65,775	7,149
10C10U	1000	81,050	81,050	648,400	162	162	65,775	5,528
15C10U	1000	81,050	121,575	607,875	162	162	65,775	15,189
15U	1000	121,575	0,000	688,925	162	162	65,775	12,012
5C15U	1000	121,575	40,500	648,425	162	162	65,775	10,399
10C15U	1000	121,575	81,050	607,875	162	162	65,775	8,762
15C15U	1000	121,575	121,575	567,350	162	162	65,775	4,717

3.2.4. Harç Numunelerin Dökümü

Çizelge 3.9 da tanımlanan numune kodu ve malzeme miktarları dikkate alınarak harç mikserine önce bağlayıcı malzemeler konulmuş 30 sn. (140 dev. / dak.) karıştırılmış, daha sonra üzerine SH + SS bileşiminden oluşan alkali aktivatör ilave edilerek 30 sn. daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Mikser içerisinde oluşan bağlayıcı hamur üzerine standart agregaya yavaşça eklenerek 30 sn. (285 dev. / dak.) daha karıştırılmıştır. Karışım 15 sn. dinlendirildikten sonra 60 sn. (285 dev. / dak.) süreyle tekrar karıştırılarak homojen bir harç karışımı oluşumu amaçlanmıştır. Taze haldeki çimento harcının yayılması ASTM C 1437 ye göre test edilmiştir (Şekil 3.1). Çimento harcının farklı boyutlardaki çimento kalıplarına homojen bir şekilde, ilave bir enerji ihtiyacı olmaksızın yerleşebilmesi için polikarboksilat esaslı kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır. Hazırlanan çimento harcı daha önceden

tasarlanan döküm planı dikkate alınarak tek seferde farklı boyutlardaki çimento kalıplarına yerleştirilmiştir. 15 dak. beklenmiş, numunelerin üst yüzeyleri masterla düzeltilerek kalıpların üst yüzeyi cam plakayla örtülerek 20 ± 2 °C sıcaklık ve yaklaşık %65 rutubetli laboratuvar ortamında 24 saat süreyle (ön denemelerde numuneler 6, 12 ve 24 saat süreyle kalıpta bekletilmiş, 24 saatlik sürenin basınç dayanımı değerleri üzerinde daha etkili olduğu gözlenmiştir) bekletilmiş, daha sonra kalıptan çıkartılan numunelere kür uygulanmıştır.



Şekil 3.5. Döküm sürecinden bir görünüş

3.2.5. Kür Koşulları

Kalıptan çıkartılan numunelere iki farklı kür işlemi uygulanmıştır. Ön denemelerde numunelere farklı sıcaklık ve sürelerde buhar kürü uygulanmış, bu uygulamalardan 85 °C sıcaklık ve 12 saatlik buhar kürünün basınç dayanımı üzerinde daha etkili olduğu gözlemlendiğinden, ilk grup numunelere bu kür işlemi uygulanmıştır. Numuneler kür işlemi sonrası 20 ± 2 °C sıcaklık ve yaklaşık %65 rutubetli kür odasında test sürecine kadar bekletilmiştir. Kalıptan çıkartılan ikinci grup numunelere ise test sürecine kadar 20 ± 2 °C sıcaklıkta su kürü uygulanmıştır.

3.3. Sertleşmiş Geopolimer Numunelere Uygulanan Testler

Her seriden farklı boyutlarda üretilen, iki farklı kür işlemi uygulanan sertleşmiş geopolimer numunelerin özgül ağırlık, birim ağırlık, su emme, kuruma büzülmesi, basınç ve eğilme dayanımları ve ultrasonik ses geçiş hızları belirlenmiştir.

3.3.1. Özgül Ağırlık, Birim Ağırlık ve Su emme

Numunelerin özgül ağırlık, birim ağırlık ve su emme özelliklerinin belirlenmesinde 50 x 50 x 50 mm lik küp numuneler kullanılmıştır. Numunelerin etüv kurusu, suya doymun kuru yüzey ve Arşimed terazisi kullanılarak su içindeki ağırlıkları elektronik terazi ile belirlenmiştir. Aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla belirtilen fiziksel özellikler tanımlanmıştır.

$$\text{Birim ağırlık} = W_1 / (W_1 - W_3) \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (3.1)$$

$$\text{Özgül ağırlık (SG)} = W_1 / (W_2 - W_3) \quad (3.2)$$

$$\text{Su emme} = [(W_1 - W_2) / W_2] \times 100 \text{ (\%)} \quad (3.3)$$

Eşitliklerde,

W_1 : Etüv kurusu ağırlık (g)

W_2 : Doymun kuru yüzey ağırlık (g)

W_3 : Su içindeki ağırlık (g)

3.3.2. Kapilarite Katsayısı

Geopolimer harç numunelerin kapilarite katsayının belirlenmesinde 50 x 50 x 50 mm lik küp numuneler kullanılmıştır. Kapilarite katsayısı TS EN 1015-18

standardına uygun olarak belirlenmiştir. Numuneler önce 60 ± 5 °C etüvde sabit ağırlığa gelene kadar kurutulmuş, numunelerin yan yüzeylerine su yalıtım malzemesi sürülerek yalıtılmış, numuneler Ø8 mm lik çelik çubukların üstüne yan yüzeyleri 5 mm suyla temas edecek şekilde yerleştirilerek 1, 4, 11, 20, 31, 44, 59, 95, 220, and 1440 dak. süreyle numunelerin su emme miktarları belirlenmiştir. Kapilarite katsayısı 3.5 nolu eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$m = (M_0 - M_t)/A \quad (3.4)$$

$$A_w = m/\sqrt{t} \quad (3.5)$$

Eşitlikte:

m = Birim alandan emilen su miktarı (kg/m^2)

M_0 = Numunenin kurunağırlığı ($t = 0$) (g)

M_t = Numunenin su emdikten sonraki ağırlığı (t) (g)

A_w = Kapilarite katsayısı ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$)

3.3.3. Kuruma Büzülmesi

Geopolimer harçların birim boy değişimleri 25 x 25 x 285 mm boyutunda harç çubukları kullanılarak ASTM C157 standardına göre belirlenmiştir. Harç çubuklarının boyları 0.001mm hassasiyetinde dijital komparatör kullanılarak yapılmış, harç çubuklarının boyları kalıptan çıkartıldıktan sonra ölçülmüş, daha sonra farklı kür işlemi uygulanan harç numunelerinin boyları 2, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 56, 90 ve 180. günlerde ölçülerek boy değişimleri ölçülmüş, daha sonra Eşitlik 3.6 yardımı ile birim boy değişimleri hesaplanmıştır.

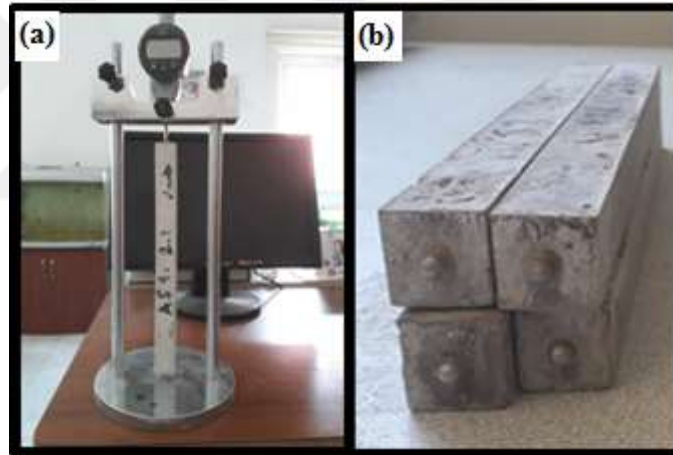
$$\Delta L_{nd} = \frac{m_{nd} - m_{1d}}{m_{1d}} \times 100 (3.6)$$

Eşitlikte:

m_{1d} = İlk günkü boy (mm)

m_{nd} = Daha sonraki zamanlarda ölçülen boy (mm)

ΔL_{nd} = Boyut değişimi %



Şekil 3.6 Rötire numunelerinin ölçülmesi

3.3.4. Eğilme Dayanımı

İki farklı ortamda kür uygulanan 40 x 40 x 160 mm boyutunda ki numunelerin eğilme dayanımı TS EN 1015-11'e uygun olarak çimento presi kullanılarak yapılmıştır. Eğilme dayanımı testi mesnet açıklığı 100 mm, yükleme hızı 50 N/s olacak şekilde, numunelere tek noktadan yükleme yapılarak gerçekleştirilmiş ve her seri için üç numune kullanılmıştır. Eğilme dayanımı aşağıda verilen 3.7 eşitliği ile hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{1.5 PL}{bd^2} (3.7)$$

Eşitlikte;

P = Kırılma yükü (kN)

σ = Eğilme dayanımı (Mpa)

L = Mesnet açıklığı (mm)

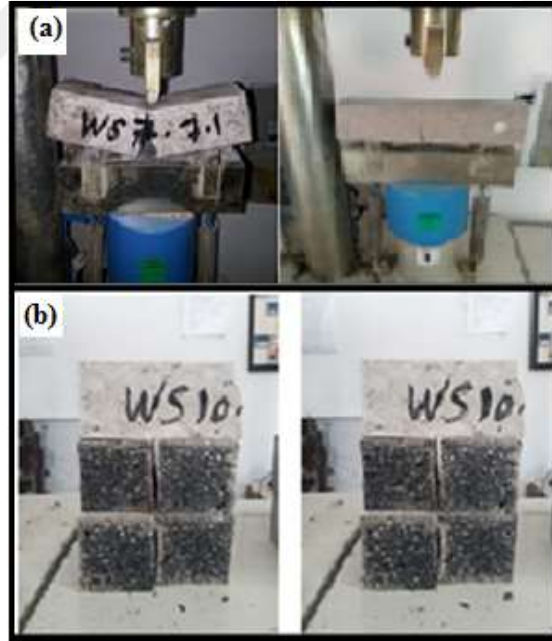
B = specimens width (40mm)

b = Numune eni (mm)

D= specimens depth (40mm)

d = Numune yüksekliği (mm)

σ_T = tensile stress (Mpa)

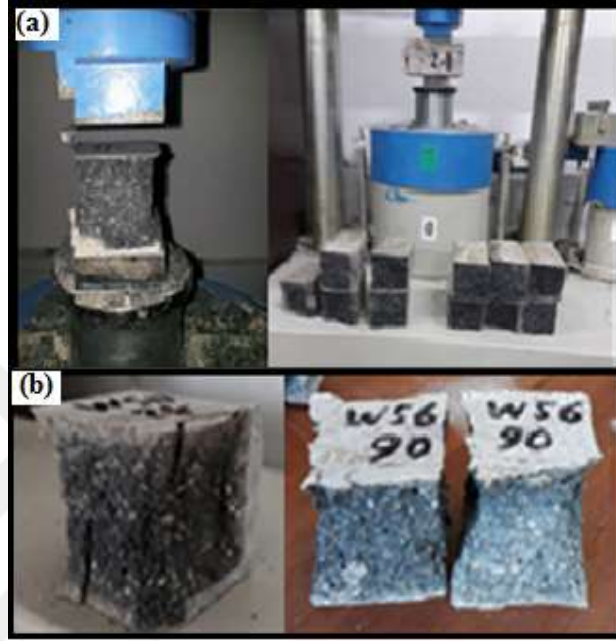


Şekil 3.7 Eğilme dayanımı deneyi

3.3.5. Basınç Dayanımı

İki farklı ortamda kür uygulanan ve eğilme testi sonucu iki parçaya bölünen 40 x 40 x 160 mm boyutunda ki çimento harçlarından elde edilen numunelerin basınç

dayanımları TS-EN 196-1 standardına uygun olarak çimento presinde yapılmıştır. Yükleme hızı 2,4 kN/s olarak belirlenmiş, numunelerin 2, 7, 14, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları her bir seri için altı numune kullanılarak belirlenmiştir $\Delta L_{nd} =$



Şekil 3.8 Basınç dayanımı deneyi

3.3.6. Ultrases Geçiş Hızı Testi Deneyi Sonuçları

Geopolimer harç numunelerinin ultrasonik ses geçiş hızı testleri ASTM C597'e göre yapılmıştır. Harç numunelerine Şekil 3.9 gösterildiği gibi ultrasonik ses testi uygulanmıştır. Deney öncesi etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulan numunelerin oda sıcaklığına gelene kadar soğuması için beklenmiş, numune yüzeyleri çok ince bir zımpara ile zımparalanarak temizlenmiş, daha sonra test işlemine geçilmiştir. Test işlemi öncesi cihazın kalibrasyonu yapılmış, probların numune yüzeyine temasının tam olarak gerçekleşmesi için probların yüzeyine jel malzeme sürülerek problar numune yüzeyine karşılıklı olarak hafifçe bastırılarak yerleştirilmiş, dijital ekranda değişmeyen değer μs olarak ses geçiş hızı olarak kaydedilmiştir. Eşitlik 3.8 yardımıyla numunelerin ses geçiş hızı hesaplanmıştır. Test işlemi her seri numune için üç tekrarlı olarak yapılmıştır.

$$V = (S / t) 10^6 \quad (3.8)$$

Eşitlikte;

V = P dalga hızı (km/s),

S = Numunenin iki yüzeyi arasındaki mesafe (m),

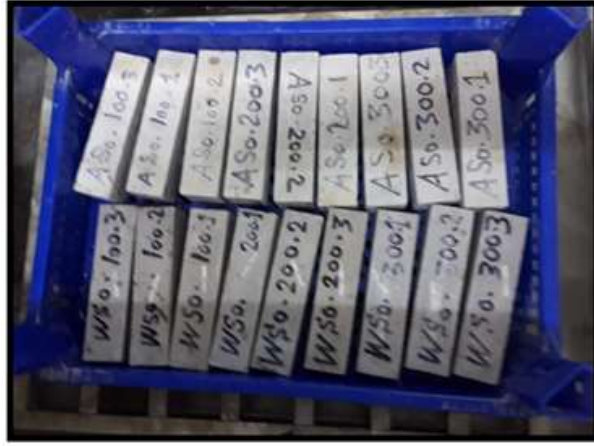
t = P dalganın geçiş süresi (μs)



Şekil 3.9 Ultrases geçiş hızı testi deneyi sonuçları

3.3.7. Donma-Çözülme Dayanımı

28 gün süreyle iki farklı kür ortamında olgunlaştırılan 40 x 40 x 160 mm boyutundaki geopolimer harçlara ASTM C666 standardına uygun olarak donma-çözülme testi uygulanmıştır. Test öncesi numuneler etüvde kurutulmuş, ağırlıkları belirlenmiş, test kabinine konulan numunelere -20°C de üç saat süreyle donma, +4 °C de üç saat süreyle çözülme işlemi uygulanmış, işlemler 50, 100 ve 150 döngü olarak tekrarlanmıştır. 50, 100 ve 150 döngü sonrası numuneler etüvde kurutularak ağırlıkları belirlenmiş, numunelerde oluşan ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Daha sonra numunelerin önce eğilme, eğilme dayanımı sonucu oluşan numune parçalarının ise basınç dayanımları belirlenmiştir.



Şekil 3.10 Donma-çözülme testi içindeki numune tipleri

3.3.8. Sülfat Direnci

Farklı kür koşullarında 28 gün süreyle bekletilen harç numuneleri etüvde kurutulduktan sonra numunelerin ağırlıkları 0,01 hassasiyetteki hassas terazide tartılarak belirlenmiş, daha sonra % 10 $MgSO_4$ çözeltisi içerisine konularak 1, 3, 6 ve 9 ay süreyle 20°C ortam sıcaklığında çözelti içerisinde bekletilmiş, çözeltiler her ay yenilenmiştir. Belirlenen sürelerin sonunda numuneler etüvde kurularak ağırlıkları tekrar belirlenmiş, sonrasında numunelerin basınç dayanımları test edilmiştir.



Şekil 3.11 $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen numuneler

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde taze harç özellikleri, su emme, özgül ağırlık, kapiler su emme, basınç ve eğilme dayanımı, donma-çözülme dayanıklılığı ve sülfat dayanıklılığı gibi deney sonuçları verilmiştir. Deneysel olarak yürütülmüş olan bu çalışmada numuneler için iki farklı kür koşulu oluşturulmuş ve bu bölümde özelliklerine etkileri açıklanmıştır.

4.1. Taze Harç (Yayılma Tablası)Özellikleri

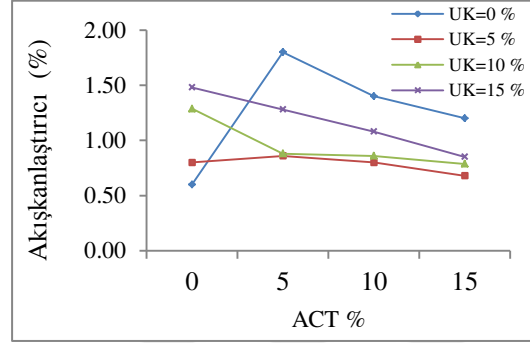
GP karışımlarındaki mineral katkıların işlenebilirlik üzerindeki etkisini belirlemek için yayılma tablası deneyi kullanılmıştır. GP karışımlarının yayılma çapı 250 mm olarak sabit tutulmuş ve bu değere göre akışkanlaştırıcı miktarı değiştirilmiştir. GP karışımlarına ait akışkanlaştırıcı miktarları Tablo 4.1 'de verilmiştir.

Tablo 4.1 GP karışımlarına ait akışkanlaştırıcı miktarları

Karışım No.	Akışkanlaştırıcı %	Yayılma çapı(cm)
K	0,6	25
5C	1,8	25
10C	1,4	25
15C	1,2	25
5U	0,8	25
5C5U	0,86	25
10C5U	1,08	25
15C5U	0,68	25
10U	1,87	25
5C10U	0,88	25
10C10U	0,68	25
15G10U	0,687	25
15U	1,48	25
5C15U	1,28	25
10C15U	1,08	25
15C15U	0,58	25

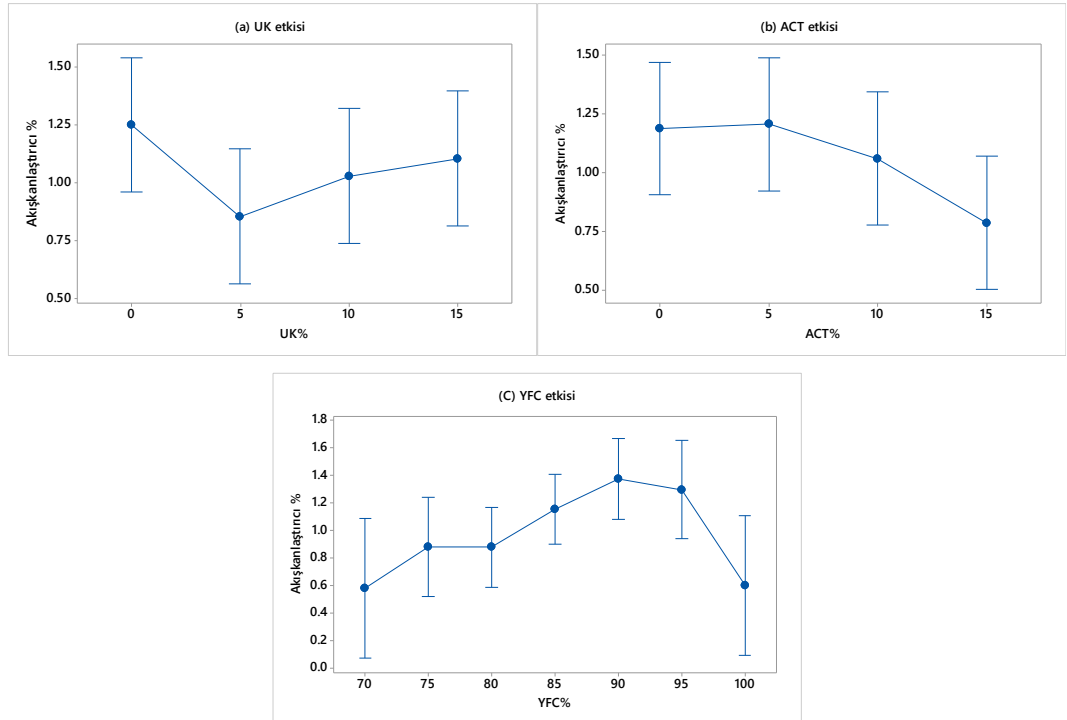
Tablo 4.1'de incelendiğinde ACT miktarı arttıkça akışkanlaştırıcı miktarı azalmaktadır. Bunun nedeni Blaine incelik değeri daha düşük olan ACT'nın

kullanım oranındaki artış ile açıklanmaktadır. UK oranındaki artış akışkanlaştırıcı oranını arttırmaktadır. UK'nın Blaine incelik değerinin yüksek olması akışkanlaştırıcı miktarının artmasına neden olmuştur.



Şekil 4.1 Akışkanlaştırıcı oranının GP kullanımına etkisi 1

Şekil 4.1'de incelendiğinde UK kullanılmadan sadece %5 ACT kullanımı ile akışkanlaştırıcı miktarı yaklaşık %2 değerine ulaşmıştır. UK'nın ACT ile birlikte kullanımı akışkanlaştırıcı miktarını azaltmaktadır. Bu durum UK'nın pasta hacmini arttırması ile açıklanabilmektedir.



Şekil 4.2 Akışkanlaştırıcı oranının GP etkisi

Şekil 4.1’de incelendiğinde, UK bazlı GP karışımlarının işlenebilirliği YFCiçeriği arttığında azalırken, ACT içeriği arttığında akışkanlaştırıcı miktarı azalmaktadır.Şekil 4.2(a)'da GPM karışımlarındaki UK oranı arttıkça akışkanlaştırıcı oranı azalmaktadır. %5 UK ve %15 ACT kullanımı ile akışkanlaştırıcı oranı %1 değerinin altına düşürülmüştür. YFC oranındaki artış genellikle akışkanlaştırıcı oranını arttırmaktadır. Ancak %100 YFC içerikli GP karışımlarında akışkanlaştırıcı oranı yaklaşık %0.6 olmaktadır.

4.2. Su Emme, Özgül Ağırlık ve Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları

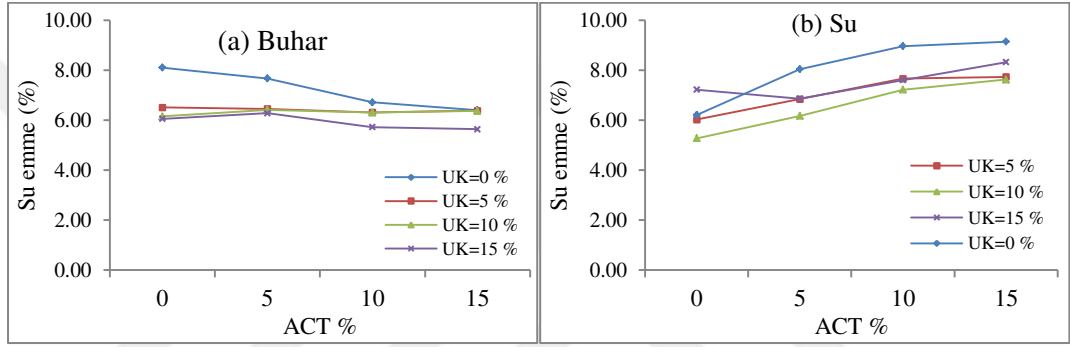
28 günlük GP karışımlarının su emme, özgül ağırlık ve birim hacim ağırlık deneyi sonuçları Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Farklı kür koşulları için su emme deneyi testi sonuçları

Numune kodu	Su emme%		Birim Hacim ağırlık(Kg/dm ³)		Özgül ağırlık	
	Buhar	Su	Buhar	Su	Buhar	Su
K	8,10	6,21	2,00	2,09	2,391	2,400
5C	7,67	8,04	2,01	1,99	2,381	2,360
10C	6,71	8,96	1,98	1,98	2,266	2,400
15C	6,40	9,14	2,00	1,94	2,288	2,360
5U	6,51	6,02	2,05	2,03	2,630	2,310
5C5U	6,45	6,84	2,05	2,00	2,313	2,320
10C5U	6,31	7,66	2,02	2,02	2,316	2,390
15C5U	6,38	7,73	2,03	1,98	2,325	2,340
10U	6,15	5,27	2,03	2,05	2,345	2,300
5C10U	6,41	6,17	2,01	2,00	2,308	2,280
10C10U	6,3	7,22	2,02	1,99	2,313	2,320
15C10U	6,37	7,62	2,02	1,98	2,323	2,300
15U	6,05	7,22	2,03	1,96	2,315	2,280
5C15U	6,28	7,86	2,03	1,99	2,321	2,350
10C15U	5,72	7,24	2,03	1,99	2,296	2,320
15C15U	5,64	8,32	1,99	1,95	2,239	2,330

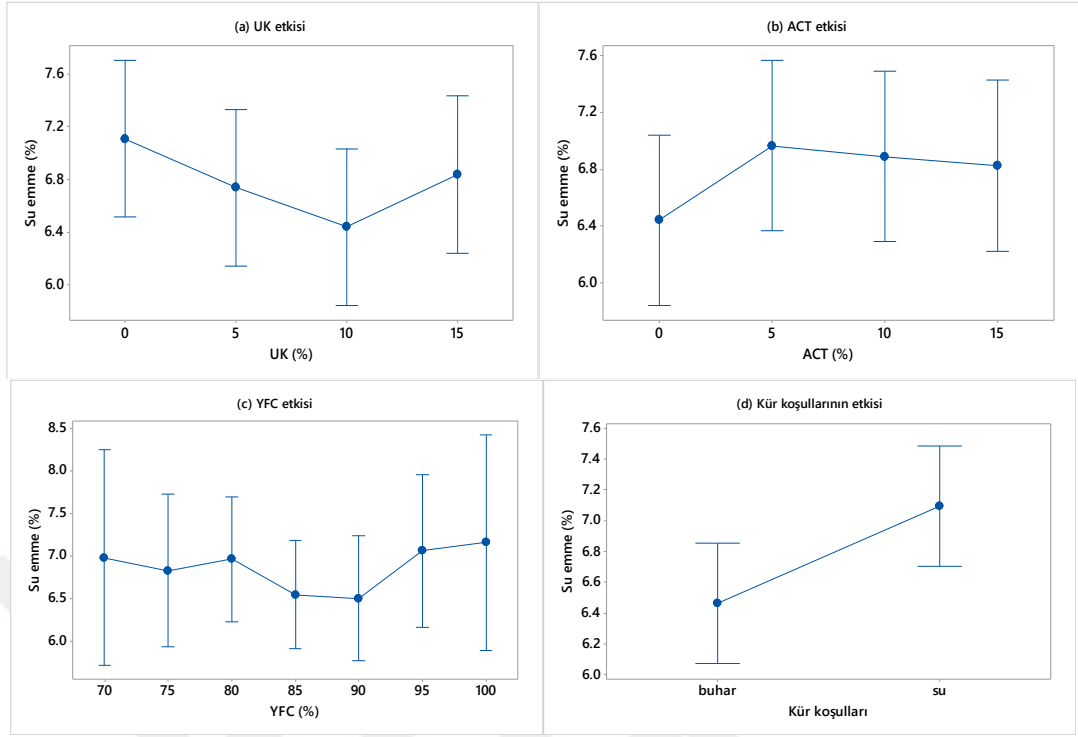
Tablo 4.2’de incelendiğinde ACT oranındaki artış buhar küründe su emme değerlerini azaltmaktadır. Ancak bu etki su küründe tam tersi bir durum göstererek su emme değerlerini arttırmıştır. Burada ACT kullanımında buhar kullanımının

daha olumlu katkı sağladığını göstermektedir. UK oranındaki artış ile birlikte buhar küründe su emme değerleri azalmaktadır. Buhar kürü uygulamasının GP karışımlarında mikroyapıyı daha çok geliştirdiği ve su emme değerlerini azalttığı belirlenmiştir. Bu durum su küründe gözlenmemiş, ACT ve UK oranındaki artış ile birlikte su emme değerleri de artmaktadır. Buhar küründe birim hacim ağırlık değerleri genellikle 2,00 kg/dm³ üzerinde olmasına rağmen su küründe bu değerler 2,00 kg/dm³ altında kalmaktadır. Ayrıca UK oranındaki artış ile birlikte harçların özgül ağırlık değerleride azalmaktadır.



Şekil 4.3GP karışımlarda UK ve ACT su emme oranı üzerindeki etkisi

Şekil 4.3(a)'da buhar kürü uygulanmasında ACT oranındaki artış su emme değerlerini azaltmaktadır. Özellikle %15 ACT ve UK kullanımı su emme değerlerini yaklaşık %6 değerine düşürmektedir. Bu durum kullanılan mineral katkıların geçirimsizliği azalttığını göstermektedir. Buhar küründe elde edilen sonuçların tam tersinin su küründe elde edildiği Şekil 4.3 (b)'de görülmektedir. Su kürü için UK oranının %5 ve %10 olması su emme değerlerinin azaltılması açısından daha olumlu sonuçlar sağlamıştır.



Şekil 4.4 GP  retimde kullanılan atıkların su emme oranına etkisi

Şekil 4.4(d)'de g r l d   gibi, GP karışımlarına buhar kürü uygulanması su emme değerlerini azaltmaktadır. UK oranı arttığında ise su emme değerlerinin azaldığı gözlenmiştir ( ekil 4.3a). Ayrıca,  ekil 4.4 (b)'den g r ld   üzere, ACT oranının artması su emme değerlerinde artı a neden olmaktadır. Bunun nedeni, gözenekliliğin ve su emmenin önemli ölçüde YFC, UK ve ACT katkılarının inceli inden ve şeklinden etkilenmesidir. GP karışımlarında kullanılan, YFC'nin inceliği ($4250 \text{ cm}^2/\text{g}$), ACT'nin inceliği ($5320 \text{ cm}^2/\text{g}$), UK'nın inceliği ($6000 \text{ cm}^2/\text{g}$) olarak ölçülmüştür.

4.3. Kapiler Su Emme Katsayısı

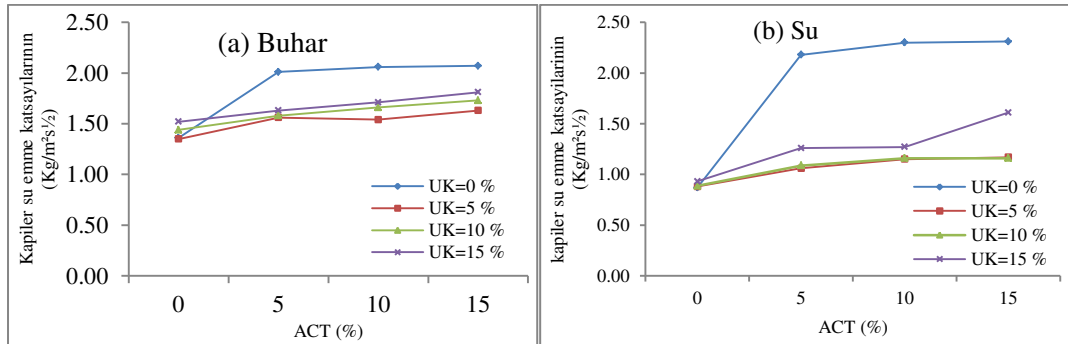
Farklı kür koşullarındaki GP karışımlarının kapilerite katsayıları Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'te verilmiştir. Kapilerite deneyi 3 numune üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.3 Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının kapilerite katsayıları

Numune kodu	Lineer regresyon eşitliği	R ²
K	$y = 1,3625x + 131,26$	0,8679
5C	$y = 2,1027x + 1,1186$	0,9978
10C	$y = 2,5914x + 72,27$	0,9943
15C	$y = 2,0703x + 25,598$	0,9901
5U	$y = 1,3556x + 35,236$	0,9956
5C5U	$y = 1,5649x + 4,1077$	0,9934
10C5U	$y = 1,5477x + 10,976$	0,9931
15C5U	$y = 1,6338x + 18,81$	0,9921
10U	$y = 1,4426x + 14,145$	0,9898
5C10U	$y = 1,582x + 4,503$	0,9913
10C10U	$y = 1,6618x + 3,1227$	0,9978
15C10U	$y = 1,738x + 15,067$	0,9939
15U	$y = 1,5263x + 28,414$	0,9953
5C15U	$y = 1,6307x + 14,807$	0,9973
10C15U	$y = 1,717x + 13,906$	0,9945
15C15U	$y = 1,8176x + 46,956$	0,9901

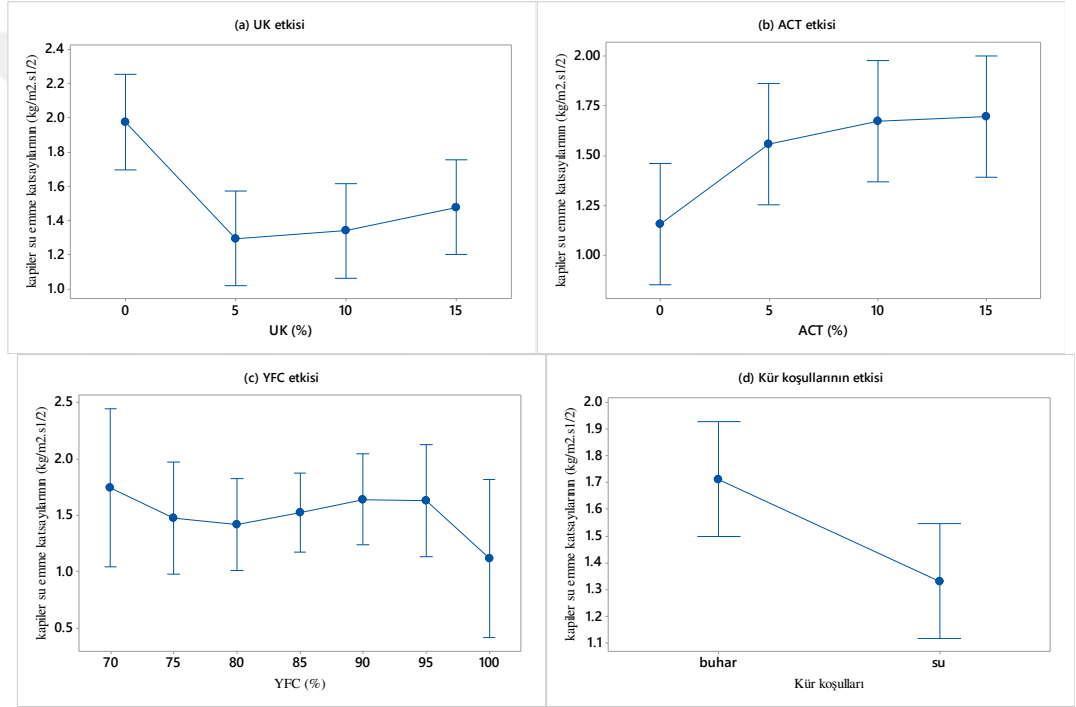
Tablo 4.4 Su kürü uygulanan GP karışımlarının kapilerite katsayıları

Numunekodu	Lineer regresyon eşitliği	R ²
K	$y = 0,873x + 11,47$	0,9930
5C	$y = 2,1824x - 5,371$	0,9986
10C	$y = 2,3038x - 1,3569$	0,9997
15C	$y = 2,3113x - 3,1116$	0,9994
5U	$y = 0,8856x + 25,874$	0,9982
5C5U	$y = 1,0651x + 39,645$	0,9975
10C5U	$y = 1,1499x + 30,406$	0,9991
15C5U	$y = 1,17x + 29,782$	0,9992
10U	$y = 0,887x + 7,732$	0,9908
5C10U	$y = 1,0885x + 48,361$	0,9899
10C10U	$y = 1,1599x + 48,505$	0,9967
15C10U	$y = 1,604x + 29,924$	0,999
15U	$y = 0,9319x + 42,225$	0,9793
5C15U	$y = 1,2592x + 60,506$	0,9761
10C15U	$y = 1,2713x + 45,951$	0,9787
15C15U	$y = 1,6177x + 84,991$	0,9711



Şekil 4.5 UK ve ACT oranının kapiler su emme katsayısı üzerindeki etkisi

Şekil 4.5 (a)'da buhar kürü uygulandığında ACT oranındaki kapiler su emme katsayısını arttırmaktadır. Bu olumsuz özellik UK oranının %5 yada 10 olması durumunda azaltılmaktadır. Şekil 4.5 (b)'de su kürü uygulandığında ve UK kullanılmadığı takdirde kapiler su emme katsayısının $2 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ değerinden yüksek olduğu görülmektedir. Buhar küründe olduğu gibi kapiler su emme katsayısının azaltılması için en uygun UK değerinin %5 yada 10 olması gerekmektedir. Kapiler su emme özelliğinin iyileştirilmesi için ACT kullanıldığı takdirde UK oranının % 5 yada 10 olması gerekmektedir.



Şekil 4.6 GP üretimde kullanılan atıkların kapiler su emme katsayısına etkisi

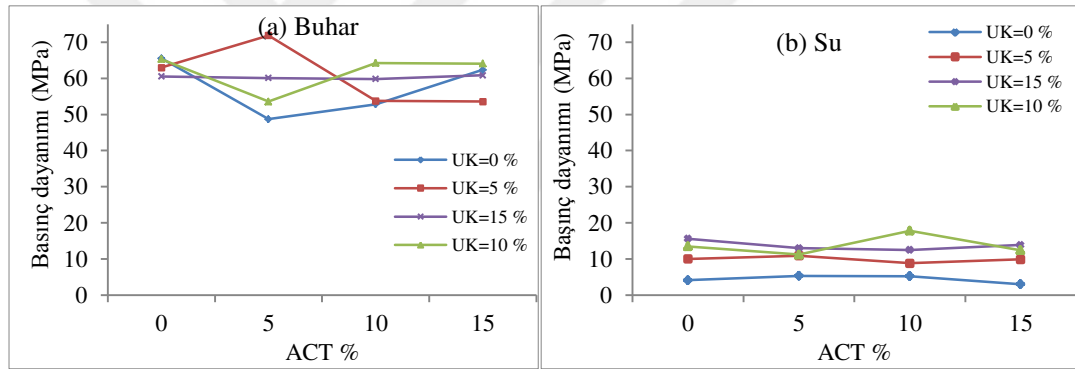
Şekil 4.6'da incelendiğinde, GP karışımlarına su kürü uygulandığında kapiler su emme katsayısı azalmaktadır. Ayrıca, Şekil 4.5(a)'da, UK oranının artırılmasıyla, nispeten kapiler su emme katsayısı azalmaktadır. Ayrıca, ACT ve YFC'nin artırılması sonucunda, kapiler su emme değerlerinin arttığı Şekil 4.6(b) ve Şekil 4.6(c)'de görülmektedir. Sodyum oksit ve silika modülü artışlarını içeren ACT ve YFC katkılı GP karışımlarında, kapiler su emme katsayısı biraz artmasına rağmen dayanımın arttığıda gözlenmektedir. Bunun nedeni, gözeneklilik azalması ile açıklanabilmektedir.

4.4. Mekanik Özellikler

Bu bölümde basınç ve eğilme dayanımına ait 2, 7, 28 ve 90 günlük deney sonuçları sunulmuştur.

4.4.1. Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

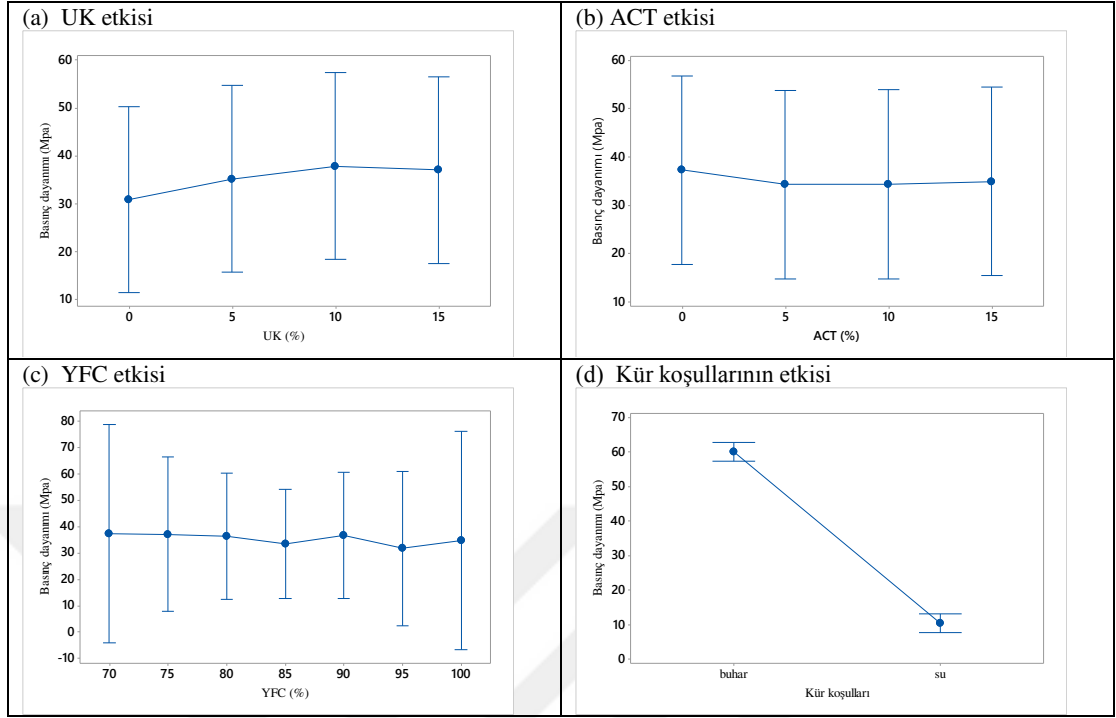
GP karışımlarının basınç dayanımı deneyi 40×40×160 mm boyutundaki standart prizma örnekler üzerinde yapılmıştır. GP karışımları Bölüm 3.4.2’deki gibi hazırlandıktan sonra basınç dayanımı açısından test edilmiştir. Farklı kür koşulları ve test günleri doğrultusunda, sırasıyla, Şekil 4.7’den 4.17’ye kadar deneysel sonuçlar sunulmuştur.



Şekil 4.7 GP numunelerinde 2 günlük basınç dayanımı değişimi

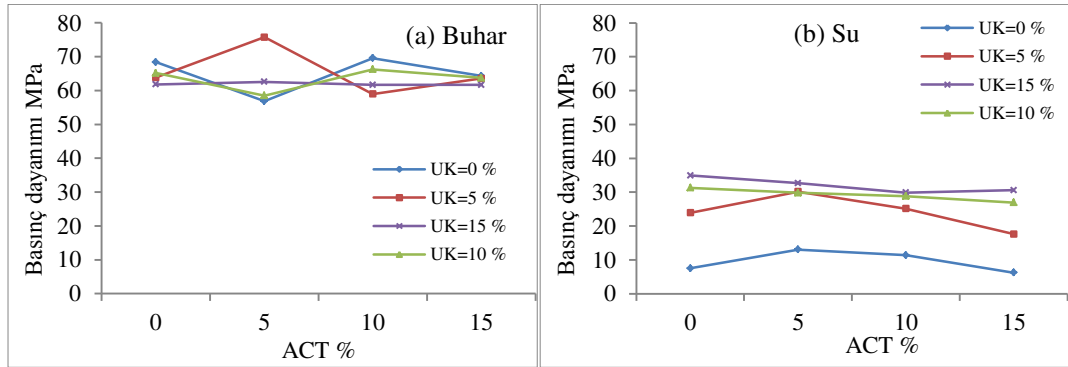
Şekil 4.7’de incelendiğinde 2 günlük basınç dayanımlarında su ve buhar kürleri arasında önemli farklar elde edilmiştir. Buhar kürü uygulamasında %5 ACT ve UK kullanımı 2 günlük basınç dayanımının yaklaşık 70 MPa olmasını sağlamıştır. UK oranının %15 olması durumunda ACT oranındaki artış basınç dayanımına etki etmemiştir.

Şekil 4.7 (b)’de UK kullanılmadığı takdirde basınç dayanımı 10 MPa değerinin altına düşmüştür. Su kürü açısından en uygun UK oranı %10 yada 15 olarak tespit edilmiştir. ACT oranındaki artış ise 2 günlük basınç dayanımlarını genellikle azaltmaktadır.



Şekil 4.8 GP üretimde kullanılan atıkların 2 günlük basınç dayanımına etkisi

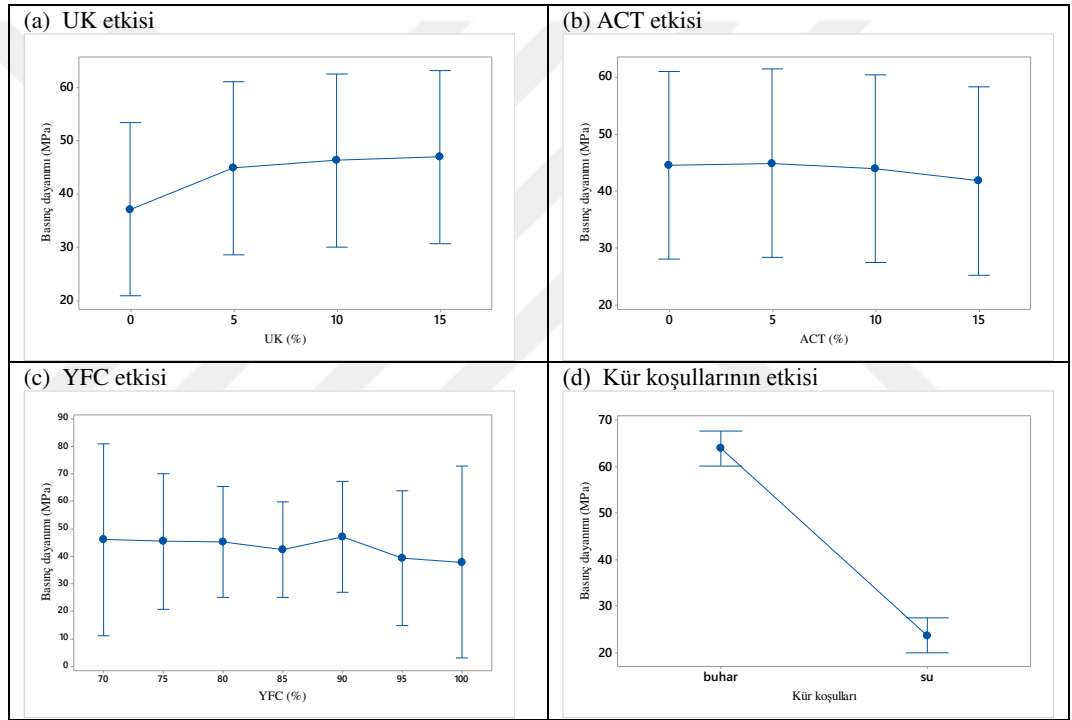
Şekil 4.8’de incelendiğinde UK oranındaki artış 2 günlük basınç dayanımlarını arttırmaktadır. ACT oranının %5, 10 ve 15 olması durumunda basınç dayanımları arasında belirgin bir fark elde edilmemiştir. Ancak GP karışımlarında su kürü uygulanması 2 günlük basınç dayanımlarını oldukça düşürmektedir.



Şekil 4.9 GP numunelerinde 7 günlük basınç dayanımı değişimi

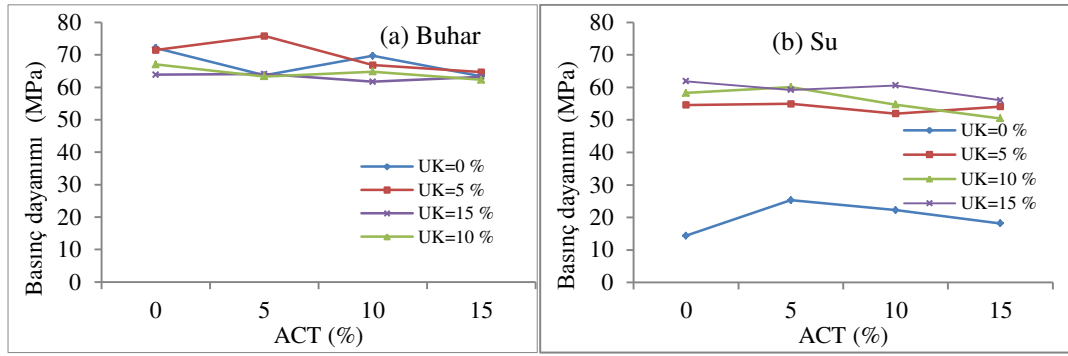
Şekil 4.9 (a)'da incelendiğinde buhar küründe en uygun oranlar %5 ACT ve UK olarak belirlenmiştir. Buhar küründe %0 ve %20 oranında UK kullanımı 7 günlük basınç dayanımlarında benzer özellikler göstermiştir.

Şekil 4.9 (b)'de incelendiğinde ACT oranındaki artış su küründe 7 günlük basınç dayanımlarını azaltmaktadır. Ancak UK oranının %15 ve 20 olması durumunda ise 7 günlük basınç dayanımlarında 30 MPa ve üzeri dayanımların elde edilmesini sağlamıştır. Su kürü uygulamasında GP karışımları için ACT ve UK'nın birlikte kullanılmasının daha olumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir.



Şekil 4.10 GP üretimde kullanılan atıkların 7 günlük basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.10 (a)'da incelendiğinde UK oranındaki artış 7 günlük basınç dayanımlarını arttırmaktadır. ACT oranındaki artış ile birlikte basınç dayanımında azalmalar gözlenmiştir. GP karışımlarına su kürü uygulanması 7 günlük basınç dayanımlarını azaltmaktadır. Buhar kürü uygulanması 7 günlük basınç dayanımları için GP karışımlarında 60 MPa ve üzeri değerler elde edilmesini sağlamıştır.

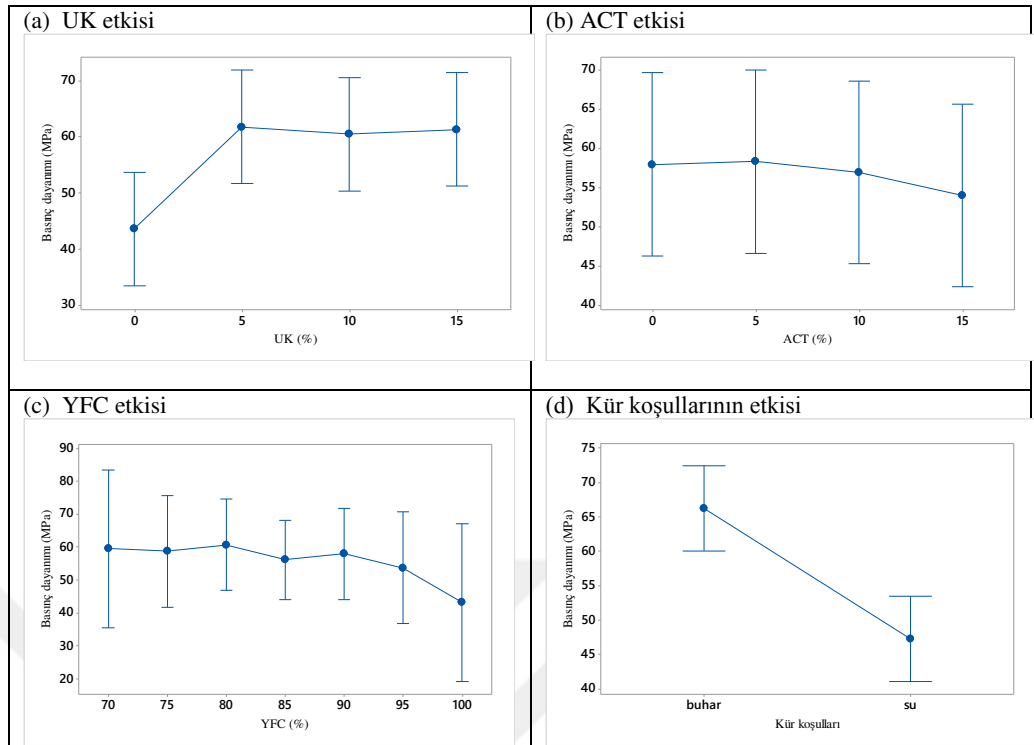


Şekil 4.11 GP numunelerinde 28 günlük basınç dayanımı değişimi

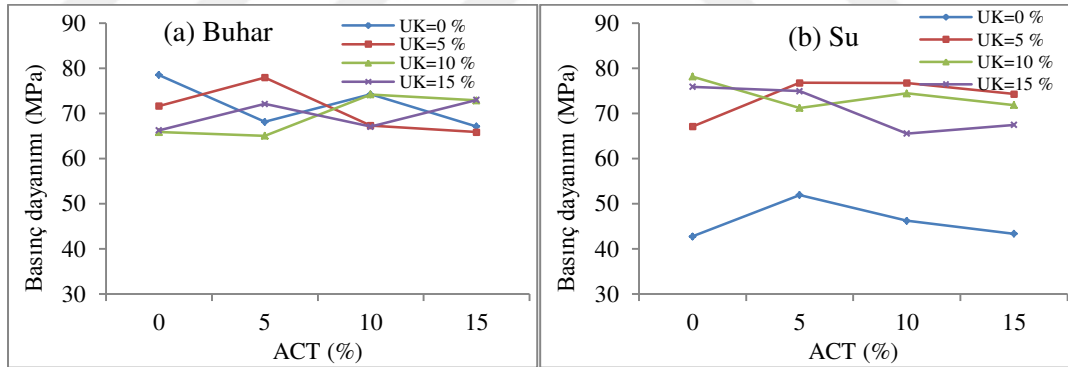
Şekil 4.11 (a)'da incelendiğinde 28 günlük basınç dayanımları için buhar küründe en uygun oranlar %5 ACT ve UK olarak belirlenmiştir. %15 oranında UK kullanılması durumunda ACT oranındaki artış basınç dayanımını çok etkilememektedir.

Şekil 4.11 (b)'de incelendiğinde ACT oranındaki artış su küründe 28 günlük basınç dayanımlarını genellikle azaltmaktadır. Özellikle UK kullanılmadığı takdirde 28 günlük basınç dayanımlarının yaklaşık 20 MPa değerinde olduğu Şekil 4.11 (b)'de görülmektedir. 28. günde UK oranının % 15 olması durumunda yaklaşık 60 MPa basınç dayanımının elde edileceği gözlenmiştir. Su kürü uygulamasında GP karışımları için sadece ACT kullanılmasının olumsuz sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Şekil 4.12 (a)'da incelendiğinde UK oranındaki artış 28 günlük basınç dayanımlarını olumlu yönde etkilemektedir. ACT oranındaki artış ile birlikte basınç dayanımında azalmalar gözlenmiştir. GP karışımlarına su kürü uygulanması 28 günlük basınç dayanımlarını azaltmaktadır. Buhar kürü uygulanması 28 günlük GP karışımlarında 60-70 MPa basınç dayanımı elde edilmesini sağlamıştır.



Şekil 4.12 GP üretimde kullanılan atıkların 28 günlük basınç dayanımına etkisi

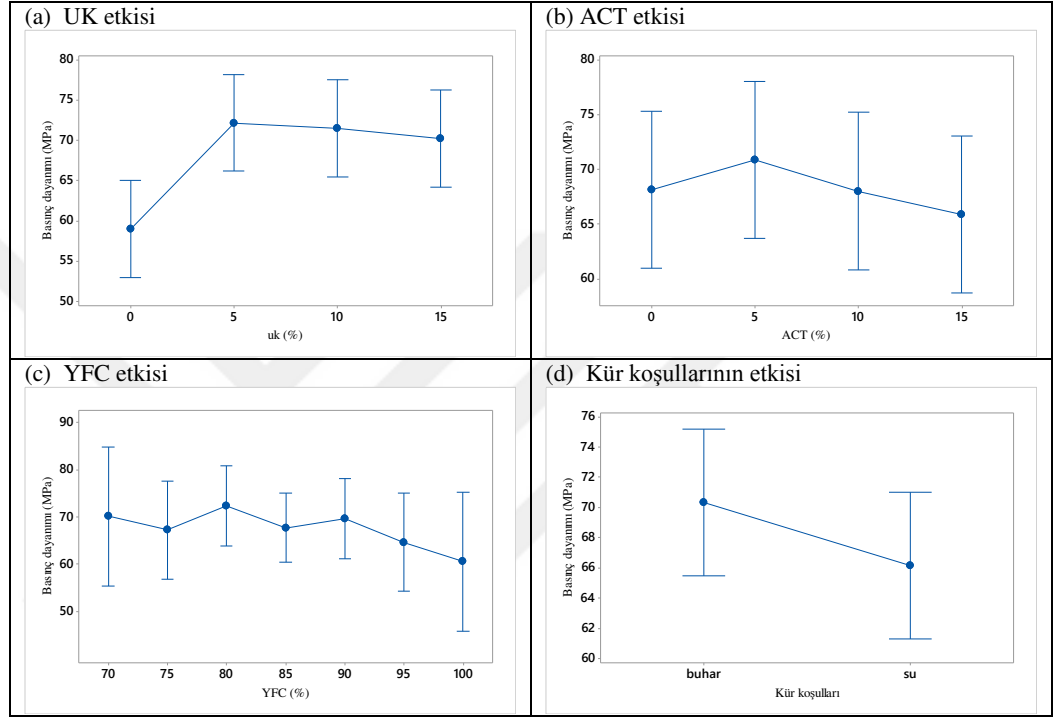


Şekil 4.13 GP numunelerinde 90 günlük basınç dayanımı değişimi

Şekil 4.13 (a)'da incelendiğinde 90 günlük basınç dayanımları için buhar küründe en uygun oranlar %5 ACT ve UK olarak belirlenmiştir. ACT kullanılmadan %100 YFC ile üretilen GP karışımlarında da 90. günde yaklaşık 80 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir.

Şekil 4.13 (b)'de incelendiğinde ACT oranındaki artış su küründe 90 günlük basınç dayanımlarını genellikle azaltmaktadır. Özellikle UK kullanılmadığı takdirde 90

günlük basınç dayanımlarının 42-52 MPa değeri arasında değiştiği Şekil 4.13 (b)'de görülmektedir. 90. günde UK oranının % 5 olması durumunda yaklaşık 75 MPa basınç dayanımının elde edileceği gözlenmiştir. Su kürü uygulamasında GP karışımları için sadece ACT kullanılmasının olumsuz sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

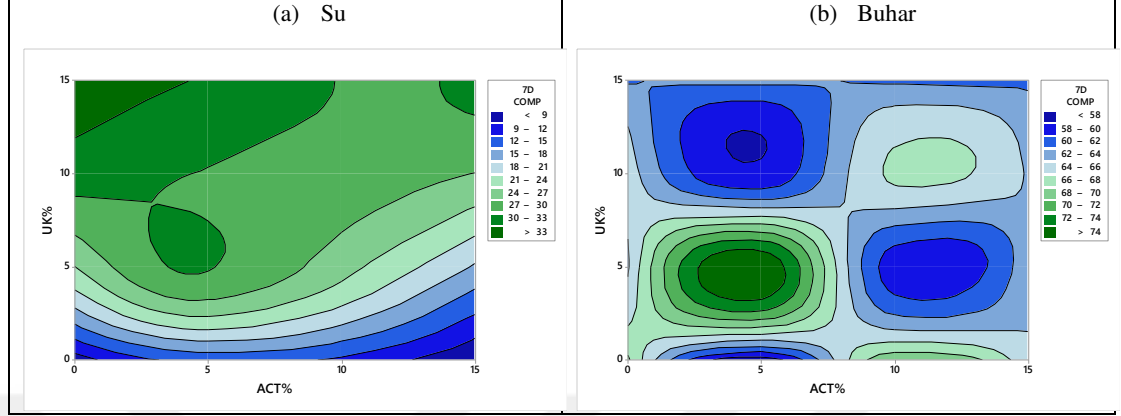


Şekil 4.14 GP üretimde kullanılan atıkların 90 günlük basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.14 (a)'da incelendiğinde UK oranındaki artış 90 günlük basınç dayanımlarının azalmasına yol açmaktadır. Ancak basınç dayanımlarındaki bu azalma ihmal edilebilir derecededir. ACT oranındaki artış ile birlikte basınç dayanımında azalmalar gözlenmektedir. GP karışımlarına su kürü uygulanması 90 günlük basınç dayanımlarını azaltmaktadır. Buhar kürü uygulanması 90 günlük GP karışımlarında 66-75 MPa basınç dayanımı elde edilmesini sağlamıştır.

Buhar küründe GP karışımlarına ait basınç dayanımının çoğunun 2 günde kazanıldığı görülmüştür. Yüksek sıcaklıkta yapılan kür işleminin (85 °C) daha yüksek erken yaş basınç dayanımı sağlamasının nedeni, geopolimer jel oluşum oranını arttıran bileşikler olan SiO₂ ve Al₂O₃'ün artan çözünme hızına bağlanmıştır. GP karışımlarında su kürünün (normal sıcaklıkta) SiO₂ ve Al₂O₃'ün

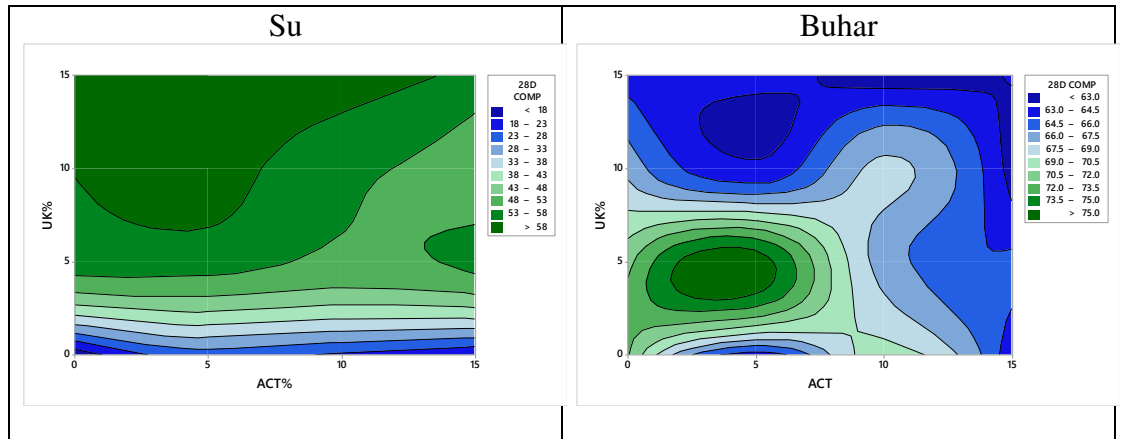
çözünmesini hızlandıramadığı bu yüzden basınç dayanımının daha düşük olduğu belirtilmiştir (Li, X., Wang, Z., ve Jiao, Z, 2013).



Şekil 4.15GP numunelerinde 7 günlük basınç dayanımına göre optimum oranları

Şekil 4.15 (a)'da GP karışımlarına su kürü uygulandığında 7 günlük basınç dayanımları için optimum oranlar görülmektedir. ACT oranının %5 UK'nın ise %10 ve üzeri olması durumunda 30 MPa üzeri basınç dayanımı değerleri elde edilmektedir.

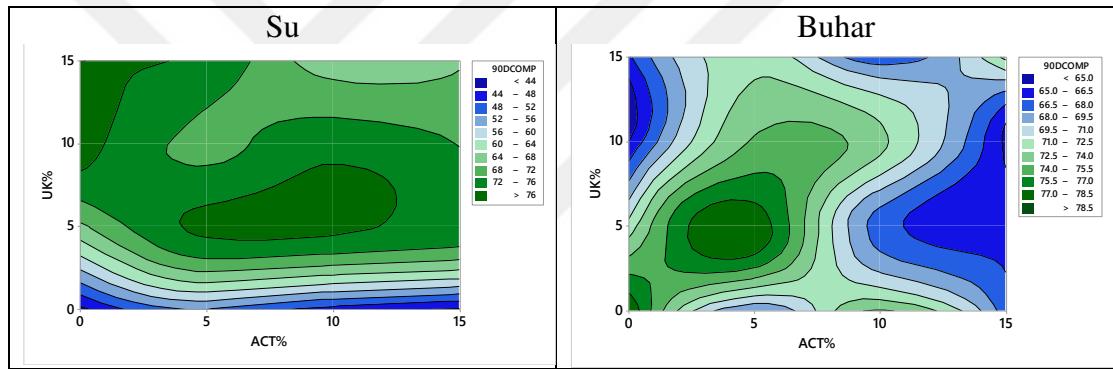
Şekil 4.15 (b)'de GP karışımlarına buhar kürü uygulandığında 7 günlük basınç dayanımları için optimum oranlar görülmektedir. ACT ve UK oranının %5, YFC oranının %90 olması durumunda 7 günlük basınç dayanımı değerleri yaklaşık 75 MPa olmaktadır.



Şekil 4.16GP numunelerinde 28 günlük basınç dayanımına göre optimum oranları

Şekil 4.16 (a)'da GP karışımlarına su kürü uygulandığında 28 günlük basınç dayanımları için optimum oranlar görülmektedir. ACT oranının %5 yada 10 UK'nın ise %10 ve üzeri olması durumunda 53 MPa'dan daha yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmektedir.

Şekil 4.16 (b)'de GP karışımlarına buhar kürü uygulandığında 28 günlük basınç dayanımları için optimum oranlar görülmektedir. ACT ve UK oranının %5, YFC oranının %90 olması durumunda 28 günlük basınç dayanımı değerleri yaklaşık 75 MPa olmaktadır. Buhar kürü uygulamasından 7 ve 28 günlük basınç dayanımları açısından çok belirgin farklar elde edilmemiştir.



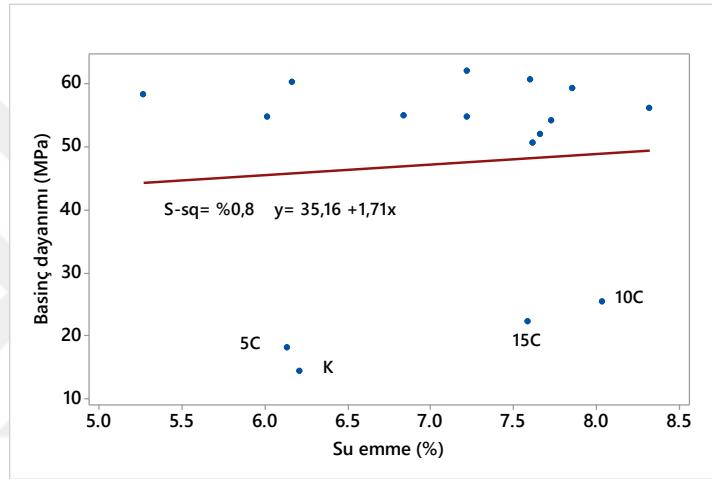
Şekil 4.17GP numunelerinde 90 günlük basınç dayanımına göre optimum oranları

Bununla birlikte, 90 günlük optimum basınç dayanımı için UK, ACT ve YFC oranının sırasıyla %5, %5, %90, olduğu görülmüştür (Şekil 4.17). Bu nedenle, GP tasarımı YFC'ye UK eklenmesi basınç dayanımı açısından önemlidir.

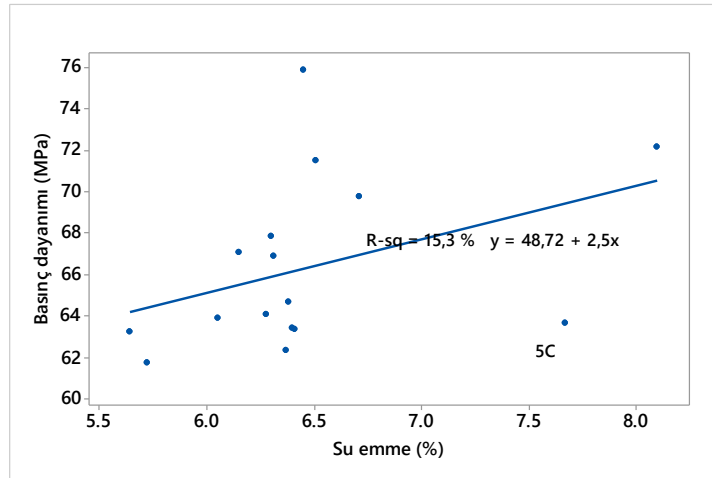
Şekil 4.8(d)'den Şekil 4.14 (d) arası olan grafikler ele alındığında buhar kürünün GP karışımlarının basınç dayanımını arttırmada ne kadar önemli olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, reaksiyon 12 saat içerisinde tamamlanabilmektedir. Su kürü uygulanması durumunda UK, YFC ve ACT'nin geopolimerik reaksiyonunun erken yaşlarda düşük olduğu gözlemlenebilir.

Kürleme sıcaklığındaki artış, pozzolanik reaksiyon gelişimini destekler; bu nedenle, ortam sıcaklığında kür işlemi son derece reaksiyonun yavaşlamasına neden

olur. Önceki araştırmalar, F sınıfı UK katkılı GP karışımlarında benzer sonuçları göstermektedir. Aktivasyon reaksiyonları ve yüksek dayanımlı GP karışımları elde etme için ortam sıcaklığı yeterli değildir. Reaksiyonları hızlandırmak için yüksek sıcaklıkların gerektiğini (Shafigh ve diğerleri, 2013) belirtmektedir. Buna ek olarak; YFC içeriğinin artması genellikle işlenebilirliği azaltmaktadır. Ayrıca Shafigh ve diğerleri, YFC esası geopolymerleri 20 saat sonra kalıplarından çıkararak 60 °C'lik ısıya tabi tutmuşlardır. Yapılan bu işlem sayesinde erken yaş basınç dayanımları artmıştır.



Şekil 4.18 Su kürü uygulanan GP 'da su emme oranı ile 28 günlük basınç dayanım arasındaki ilişki

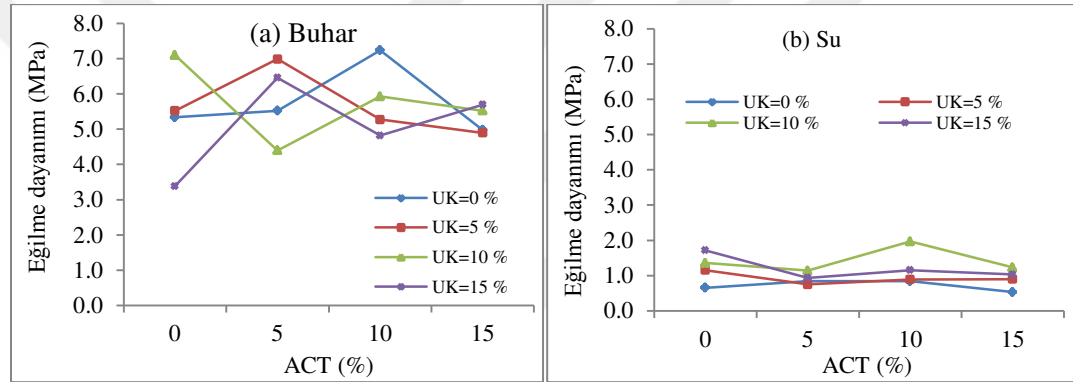


Şekil 4.19 Buhar kürü uygulanan GP 'da su emme oranı ile 28 günlük basınç dayanım arasındaki ilişki

Basınç dayanımı ve su emme arasındaki korelasyon Şekil 4.18 ve 4.19’de verilmiştir. Basınç dayanımı ve su emme arasında kuvvetli bir ilişki elde edilmemiştir. Ancak, su kürü uygulanması durumunda K, 5C, 10C, ve 15C kodlu GP karışımlarının basınç dayanımı oldukça düşüktür (Şekil 4.18).

4.4.2. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları

GP karışımlarının farklı yaşlardaki eğilme dayanımı testi sonuçları, Şekil 4.20’den Şekil 4.30’akadar sunulmuştur.

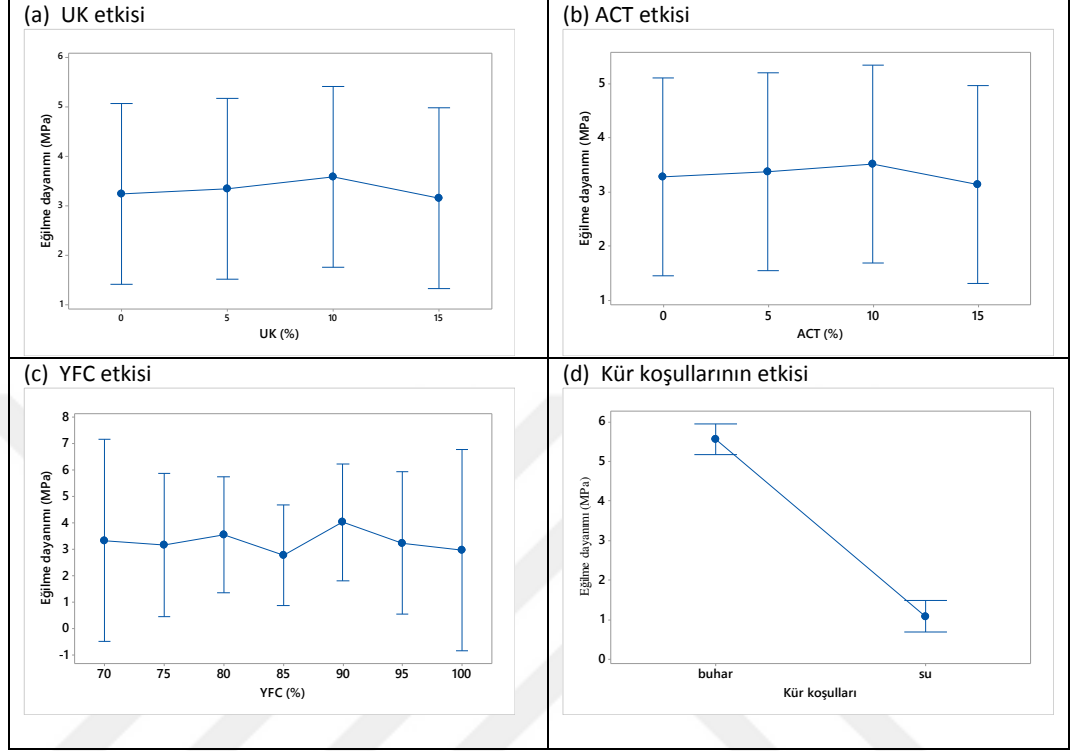


Şekil 4.20 GP numunelerinde 2 günlük eğilme dayanımı değişimi

Şekil 4.20 (a)’da incelendiğinde 2 günlük eğilme dayanımları için buhar küründe 3 farklı yüksek dayanımlı GP karışımı elde edilmiştir. ACT oranının %0 olması durumunda UK oranının %10 olması, ACT oranının %5 olması durumunda UK oranının %5 olması, ACT oranının %10 olması durumunda UK oranının %0 olması eğilme dayanımlarını arttırmaktadır. Buhar kürü açısından YFC oranının %90 olması 2 günlük eğilme dayanımlarına genellikle olumlu katkı sağlamaktadır.

Şekil 4.20 (b)’de incelendiğinde ACT oranındaki artış su küründe 2 günlük eğilme dayanımlarını genellikle azaltmaktadır. Özellikle UK kullanılmadığı takdirde 2 günlük eğilme dayanımlarının 1 MPa değerinin altında olduğu Şekil 4.20 (b)’de görülmektedir. 2. günde UK oranının % 10 olması durumunda 1 MPa ve üzeri eğilme dayanımının elde edileceği gözlenmiştir. Su kürü uygulamasında GP

karışımları için ACT ve UK'nın birlikte kullanılmasının olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

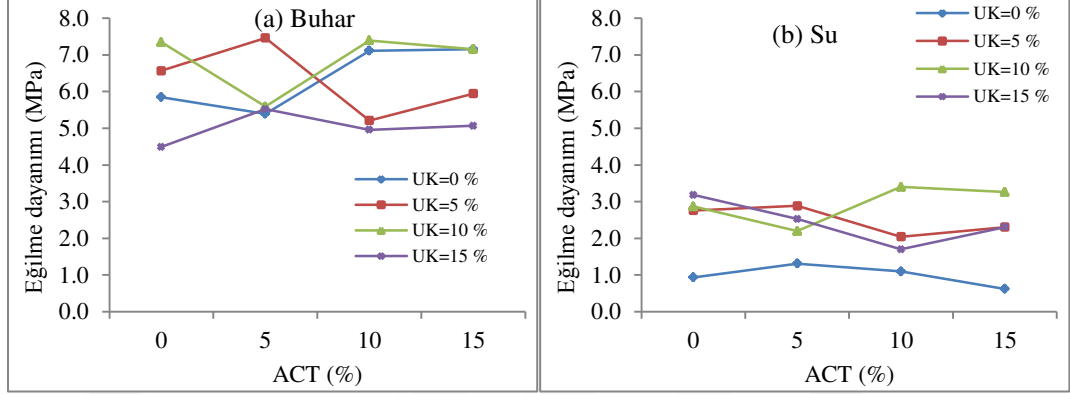


Şekil 4.21 GP üretimde kullanılan atıkların 2 günlük eğilme dayanımına etkisi

Şekil 4.21 (a)'da incelendiğinde UK oranının %10'a kadar artması artış 2 günlük eğilme dayanımlarının artmasını sağlamaktadır. ACT oranının %15 olması durumunda eğilme dayanımı azalmaktadır. GP karışımlarına su kürü uygulanması 2 günlük eğilme dayanımlarını azaltmaktadır. Su kürü uygulamasında 2. günde eğilme dayanımı değerleri genellikle 1 MPa altına düşmektedir. Buhar kürü uygulanması 2 günlük GP karışımlarında 5 MPa ve üzeri eğilme dayanımı elde edilmesini sağlamıştır.

Şekil 4.22 (a)'da incelendiğinde 7 günlük eğilme dayanımları içinde buhar küründe 3 farklı yüksek dayanımlı GP karışımı elde edilmiştir. ACT oranın %0 olması durumunda UK oranının %10 olması, ACT oranın %5 olması durumunda UK oranının %5 olması, ACT oranın %10 olması durumunda UK oranının %10 olması eğilme dayanımlarını arttırmaktadır. Buhar kürü açısından YFC oranının %80-90 olması 7 günlük eğilme dayanımlarına genellikle olumlu katkı sağlamaktadır. UK

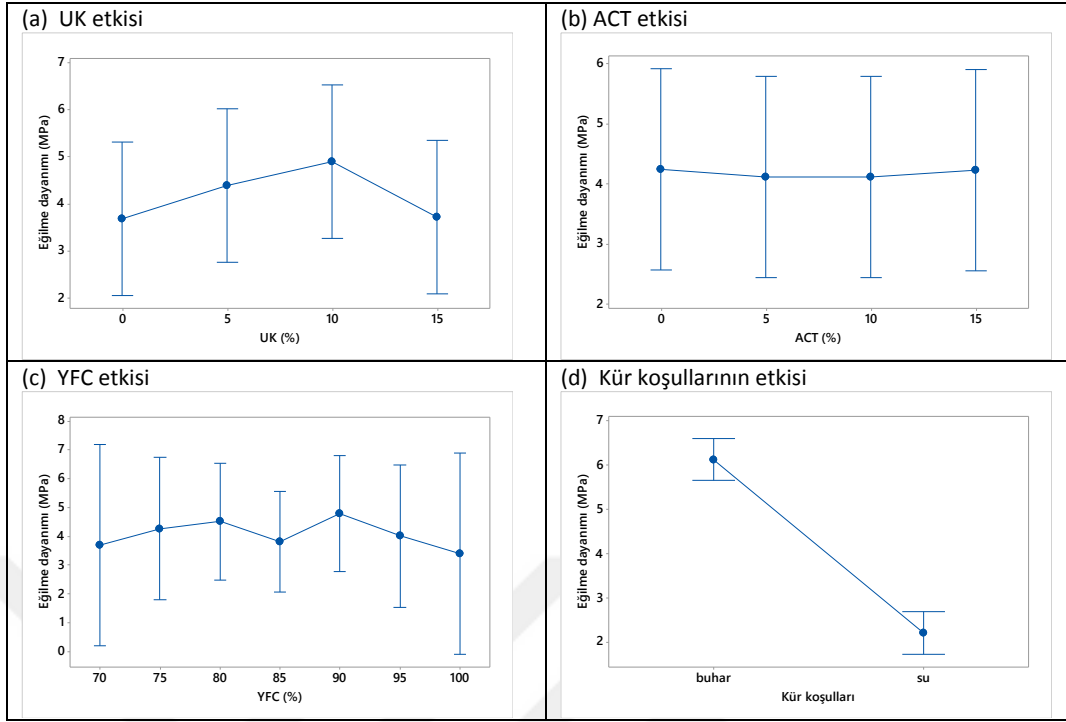
oranının %15 olması durumunda ise eğilme dayanımları diğer GP karışımlarına göre daha düşük olmaktadır.



Şekil 4.22 GP numunelerinde 7 günlük eğilme dayanımı değişimi

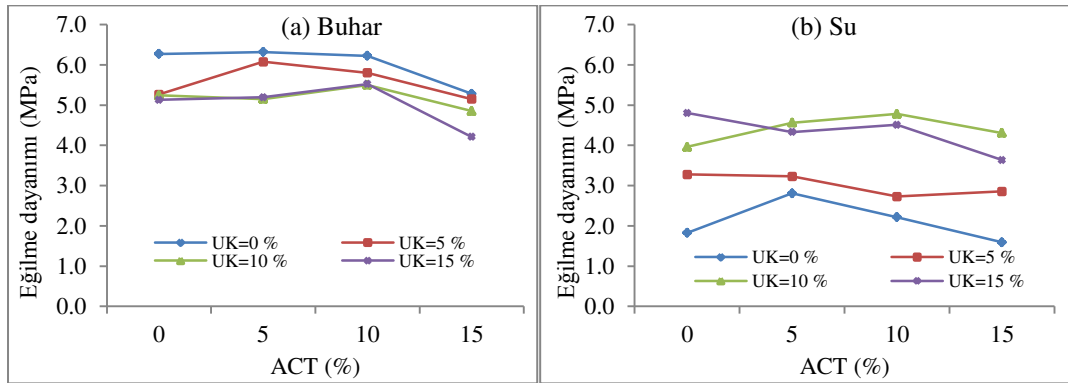
Şekil 4.22 (b)'de incelendiğinde ACT oranındaki artış su küründe 7 günlük eğilme dayanımlarını genellikle azaltmaktadır. Özellikle UK kullanılmadığı takdirde 7 günlük eğilme dayanımlarının yaklaşık 1 MPa değerinde olduğu Şekil 4.22 (b)'de görülmektedir. 7. günde UK ve ACT oranının % 10 olması durumunda 3 MPa ve üzeri eğilme dayanımının elde edileceği gözlenmiştir. Su kürü uygulamasında GP karışımları için ACT ve UK'nın birlikte kullanılmasının olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Şekil 4.23 (a)'da incelendiğinde UK oranının %10'a kadar artması artış 7 günlük eğilme dayanımlarının artmasını sağlamaktadır. ACT oranındaki artış eğilme dayanımları üzerinde çok etkili olmaktadır. GP karışımlarına su kürü uygulanması 7 günlük eğilme dayanımlarını azaltmaktadır (Şekil 4.23d). Su kürü uygulamasında 7. günde eğilme dayanımı değerleri yaklaşık 2 MPa değerinde olmaktadır. Buhar kürü uygulanması 7 günlük GP karışımlarında 6 MPa ve üzeri eğilme dayanımı elde edilmesini sağlamıştır.



Şekil 4.23GP üretimde kullanılan atıkların 7 günlük eğilme dayanımına etkisi

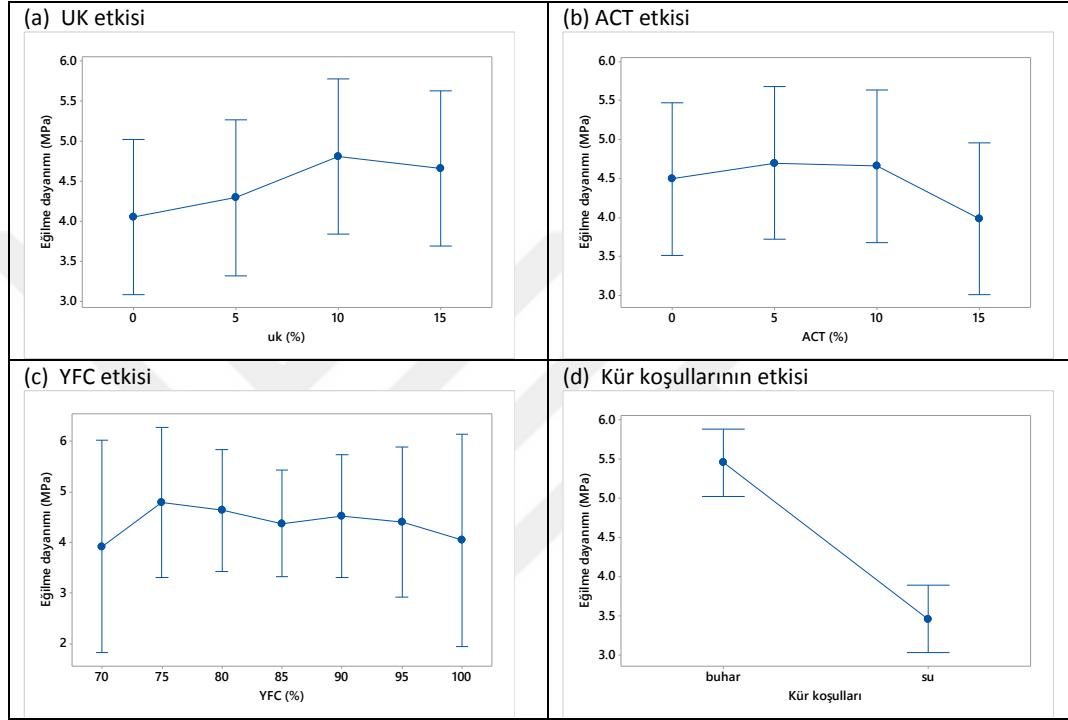
Şekil 4.24 (a)'da incelendiğinde 28. günde UK kullanılmadan yüksek eğilme dayanımları elde edilmiştir, ACT oranının %15 olması eğilme dayanımları azalmaktadır. %10 ve 15 oranında UK kullanımı eğilme dayanımları açısından benzer özellikler göstermektedir.



Şekil 4.24GP numunelerinde 28 günlük eğilme dayanımı değişimi

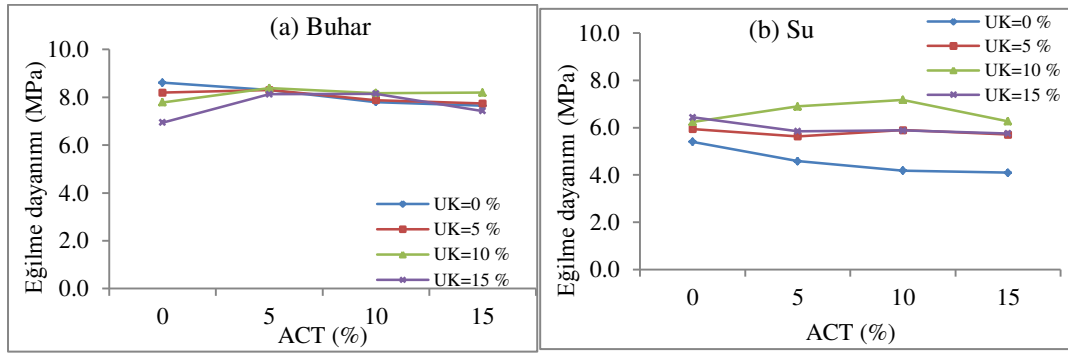
Şekil 4.24 (b)'de incelendiğinde ACT oranındaki artış su küründe 28 günlük eğilme dayanımlarını genellikle azaltmaktadır. Özellikle UK kullanılmadığı takdirde 28

günlük eğilme dayanımlarının yaklaşık 2,5 MPa değerinde olduğu Şekil 4.24 (b)'de görülmektedir. 28. günde UK ve ACT oranının % 10 olması durumunda yaklaşık 5 MPa eğilme dayanımının elde edileceği gözlenmiştir. Su kürü uygulamasında GP karışımları için ACT ve UK'nın birlikte kullanılmasının olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir.



Şekil 4.25GP üretimde kullanılan atıkların 28 günlük eğilme dayanımına etkisi

Şekil 4.25 (a)'da incelendiğinde UK oranındaki artış 28 günlük eğilme dayanımlarının artmasını sağlamaktadır. ACT oranındaki artışın sonucunda, özellikle %15 oranında kullanılması durumunda eğilme dayanımları azalmaktadır. GP karışımlarına su kürü uygulanması 28 günlük eğilme dayanımlarını azaltmaktadır (Şekil 4.25d). Su kürü uygulamasında 7. günde eğilme dayanımı değerleri yaklaşık 3,5 MPa değerinde olmaktadır. Buhar kürü uygulanması 7 günlük GP karışımlarında 5,5 MPa ve üzeri eğilme dayanımı elde edilmesini sağlamıştır.

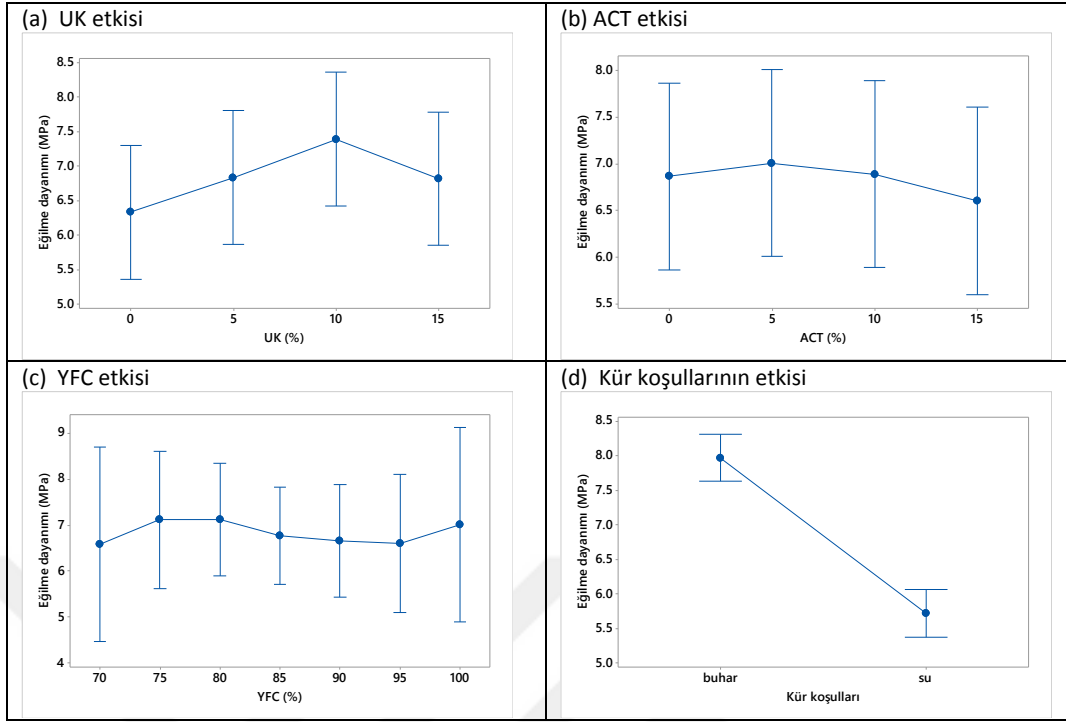


Şekil 4.26 GP numunelerinde 90 günlük eğilme dayanımı değişimi

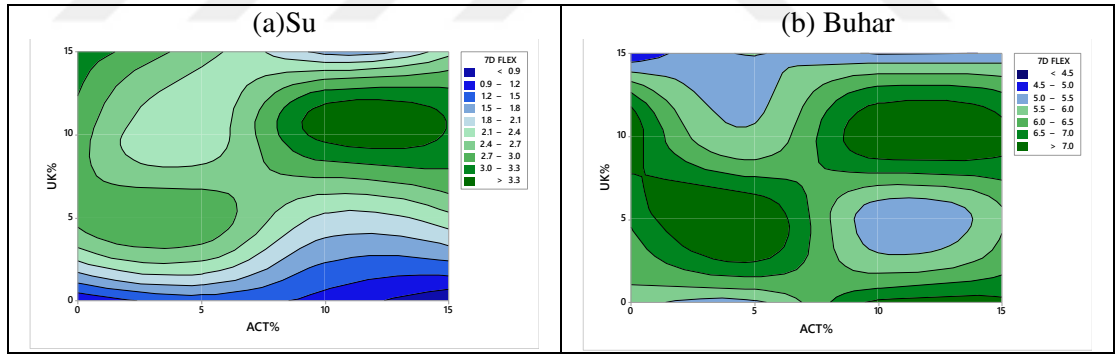
Şekil 4.26 (a)'da incelendiğinde 90.günde %15 UK ve %85 YFC kullanımı eğilme dayanımlarını azaltmaktadır. Ancak UK ve ACT kullanmadan %100 YFC kullanımı ile eğilme dayanımının yaklaşık 9 MPa olduğu gözlenmiştir. ACT oranındaki artış genellikle 90 günlük eğilme dayanımlarını azaltmaktadır.

Şekil 4.26 (b)'de incelendiğinde ACT oranındaki artış su küründe 90 günlük eğilme dayanımlarını genellikle azaltmaktadır. Özellikle UK kullanılmadığı takdirde 90 günlük eğilme dayanımlarının 4,0-4,5 MPa değerleri arasında olduğu Şekil 4.26 (b)'de görülmektedir. 90. günde UK ve ACT oranının % 10 olması durumunda yaklaşık 7 MPa eğilme dayanımının elde edileceği gözlenmiştir. Su kürü uygulamasında GP karışımları için ACT ve UK'nın birlikte kullanılmasının olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Şekil 4.27 (a)'da incelendiğinde UK oranındaki artış (%10'a kadar) 90 günlük eğilme dayanımlarının artmasını sağlamaktadır. ACT oranındaki artışın sonucunda, özellikle %15 oranında kullanılması durumunda eğilme dayanımları azalmaktadır. GP karışımlarına su kürü uygulanması 90 günlük eğilme dayanımlarını azaltmaktadır (Şekil 4.27d). Su kürü uygulamasında 90. günde eğilme dayanımı değerleri yaklaşık 5,5 MPa değerinde olmaktadır. Buhar kürü uygulanması 90 günlük GP karışımlarında 8 MPa ve üzeri eğilme dayanımı elde edilmesini sağlamıştır.



Şekil 4.27GP üretimde kullanılan atıkların 90 günlük eğilme dayanımına etkisi

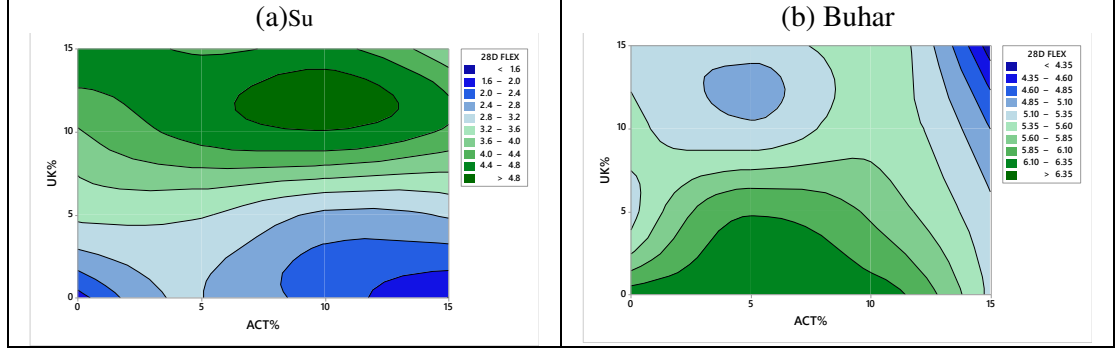


Şekil 4.28GP numunelerinde 7 günlük eğilme dayanımına göre optimum oranları

Şekil 4.28 (a)'da GP karışımlarına su kürü uygulandığında 7 günlük eğilme dayanımları için optimum oranlar görülmektedir. ACT oranının %10-15 UK'nın ise %10 olması durumunda 3,30 MPa üzeri eğilme dayanımı değerleri elde edilmektedir.

Şekil 4.28 (b)'de GP karışımlarına buhar kürü uygulandığında 7 günlük eğilme dayanımları için optimum oranlar görülmektedir. ACT ve UK oranının %5, YFC

oranının %90 yada ACT ve UK oranının %10, YFC oranının %80 olması durumunda 7 günlük eğilme dayanımı değerleri yaklaşık 7 MPa olmaktadır.



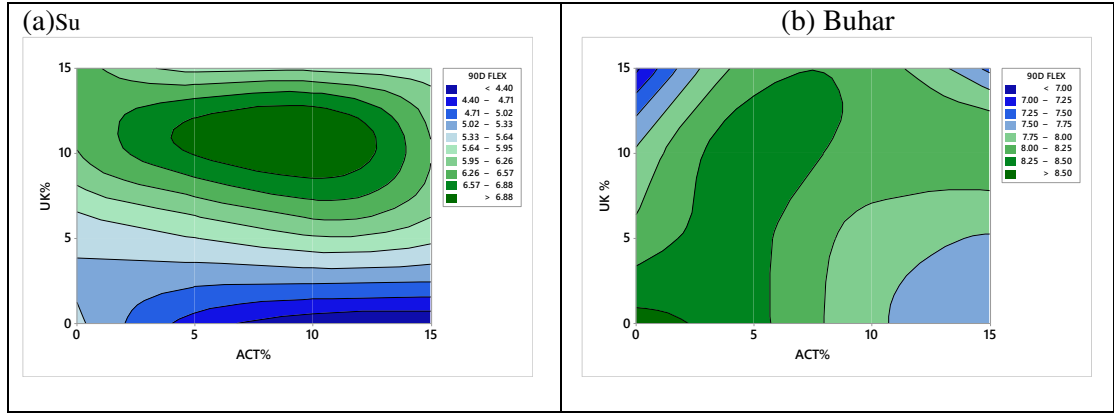
Şekil 4.29 GP numunelerinde 28 günlük eğilme dayanımına göre optimum oranları

Şekil 4.29 (a)'da GP karışımlarına su kürü uygulandığında 28 günlük eğilme dayanımları için optimum oranlar görülmektedir. ACT oranının %10 UK'nın ise %10 olması durumunda 4,5 MPa üzeri eğilme dayanımı değerleri elde edilmektedir.

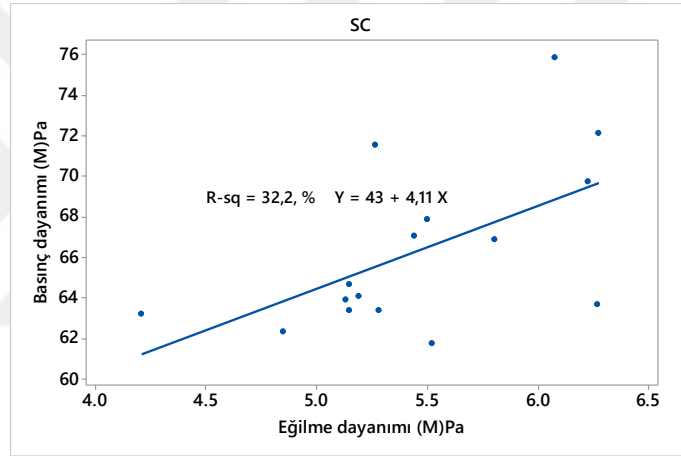
Şekil 4.29 (b)'de GP karışımlarına buhar kürü uygulandığında 28 günlük eğilme dayanımları için optimum oranlar görülmektedir. ACT oranının %5, YFC oranının %95 olması durumunda 28 günlük eğilme dayanımı değerleri yaklaşık 6,50 MPa olmaktadır.

Şekil 4.30 (a)'da GP karışımlarına su kürü uygulandığında 90 günlük eğilme dayanımları için optimum oranlar görülmektedir. ACT oranının %5-10 UK'nın ise %5 olması durumunda 7,5 MPa üzeri eğilme dayanımı değerleri elde edilmektedir. Benzer durum ACT kullanılmadan %10 ve üzeri UK kullanımı ile de elde edilmektedir.

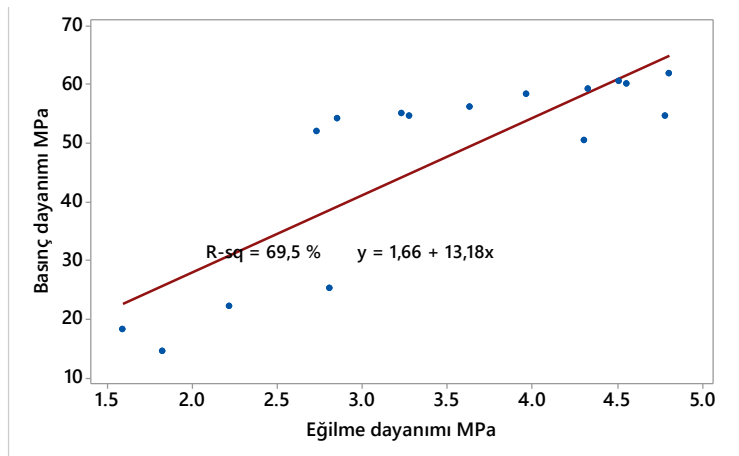
Şekil 4.30 (b)'de GP karışımlarına buhar kürü uygulandığında 90 günlük eğilme dayanımları için optimum oranlar görülmektedir. ACT ve UK oranının %5, YFC oranının %90 olması durumunda 90 günlük eğilme dayanımı değerleri yaklaşık 7,50 MPa olmaktadır.



Şekil 4.30 GP numunelerinde 90 günlük eğilme dayanımına bağlı optimum oranlar



Şekil 4.31 Buhar kürü uygulanan GP 'da eğilme-basınc dayanımı (28. gün) ilişkisi



Şekil 4.32 Su kürü uygulanan GP 'da eğilme-basınc dayanımı (28. gün) ilişkisi

Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de incelendiğinde; genellikle basınç dayanımı arttıkça eğilme dayanımı da artış göstermektedir. Buhar küründe uygulanan ısıtma işlemi basınç ve eğilme dayanımı arasındaki korelasyonu zayıflatmıştır.

4.5. Kurumu Büzülmesi Deneyi Sonuçları

Numunelerin kuruma büzülmesi 25x25x285 mm prizma numuneler ile ölçülmüştür. Harç numunelerinin ilk boyları kalıp sökme işleminden hemen sonra gerçekleştirilmiştir. Numune boyları ilk 42 gün boyunca 7 günde bir, daha sonrasında 56, 90 ve 180 günlerde ölçülmüştür. Test sonuçları Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.5 Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının zamana bağlı boy değişimleri

Numune kodu	Boy değişimi, μm										
	Gün										
	2	3	7	14	21	28	35	42	56	90	180
K	88	70	174	191	563	556	567	511	523	566	565
5C	-16	119	134	476	488	506	478	472	485	525	528
10C	-145	195	215	516	518	559	521	516	516	561	566
15C	-50	148	342	456	475	437	443	446	534	564	568
5U	-15	2	9	35	47	62	82	85	100	125	128
5C5U	-8	3	17	41	70	87	108	128	153	188	195
10C5U	-172	111	283	277	292	278	267	267	283	330	323
15C5U	-242	-217	150	154	189	142	120	111	113	153	155
10U	-23	-2	31	51	73	143	162	192	207	257	257
5C10U	-20	-2	21	31	37	40	63	111	128	148	148
10C10U	-41	17	41	73	112	169	224	234	264	274	266
15C10U	-83	31	65	84	90	109	101	106	104	146	149
15U	-20	12	109	140	140	140	144	152	172	215	210
5C15U	-62	23	41	68	74	93	113	135	160	168	165
10C15U	-73	6	55	77	87	105	128	135	145	158	190
15C15U	-70	-22	2	25	52	66	93	116	116	133	132

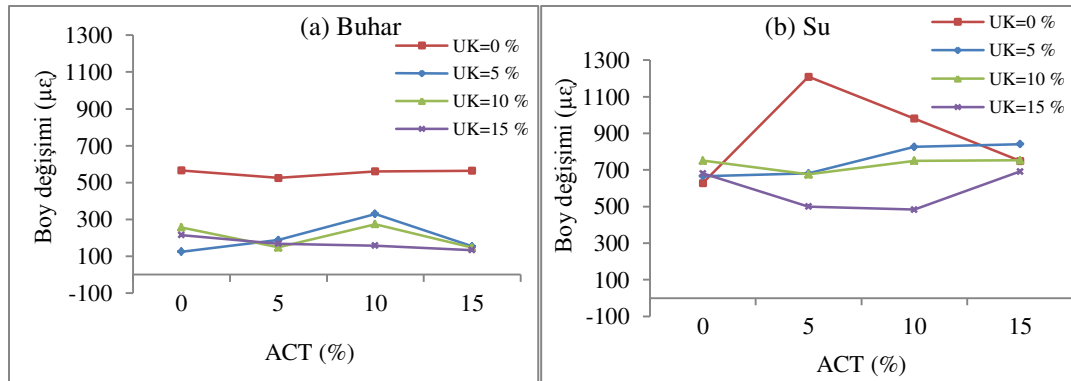
Tablo 4.5'de incelendiğinde zamanla kuruma büzülmesi değerleri artmaktadır. 42. günden itibaren kuruma büzülmesi değerlerindeki artışın azaldığı görülmektedir. Buhar kürü uygulanan GP karışımlarında ACT oranındaki artış ile birlikte kuruma büzülmesi değerleri artmaktadır. UK oranındaki artış ile birlikte kuruma büzülmesi

artış göstermektedir. UK kullanılan GP karışımlarında ACT oranının % yada 15 olması kuruma büzülmesi değerlerini azaltmaktadır.

Tablo 4.6 Su kürü uygulanan GP karışımlarının zamana bağlı boy değişimleri

Numune kodu	Boy değişimi $\mu\epsilon$									
	Gün									
No	3	7	14	21	28	35	42	56	90	180
K	35	129	233	621	632	655	596	580	618	628
5C	39	499	1147	1161	1241	1169	1167	1172	1207	1209
10C	99	44	767	845	952	924	929	943	974	981
15C	0	189	570	618	596	614	698	714	744	749
5U	11	211	407	529	566	599	611	634	664	666
5C5U	26	152	398	503	530	568	601	641	681	681
10C5U	25	668	893	1030	1019	1023	1033	1061	1118	826
15C5U	134	646	964	1045	1037	1037	1038	1058	1050	841
10U	64	533	599	615	623	650	680	703	750	751
5C10U	429	453	485	529	571	620	665	675	677	676
10C10U	81	366	466	529	570	663	678	721	748	750
15C10U	56	99	257	393	578	680	708	735	758	753
15U	85	164	289	456	601	631	642	660	680	681
5C15U	11	78	181	348	398	425	462	490	503	500
10C15U	89	212	250	269	334	394	426	454	479	483
15C15U	130	352	405	435	531	601	654	659	684	691

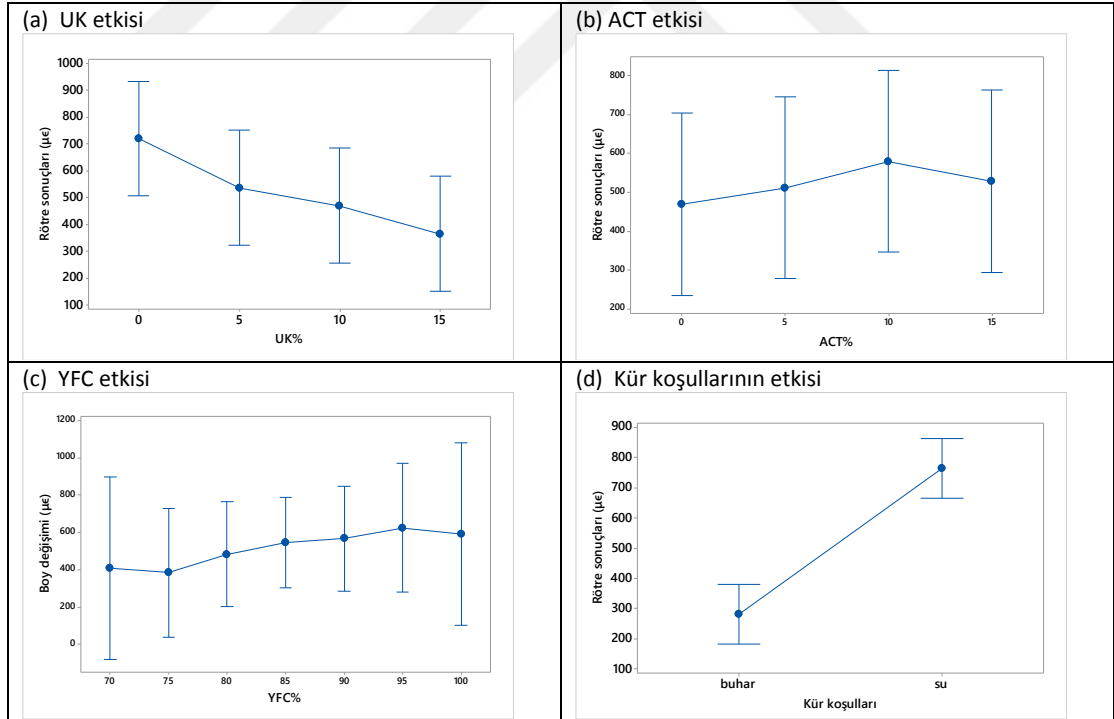
Tablo 4.6’da incelendiğinde su kürü uygulanması durumunda kuruma büzülmesi değerleri artış göstermiştir. Su kürü uygulanan GP karışımlarında ACT oranındaki artış kuruma büzülmesi değerlerini azaltmaktadır. UK oranındaki artış ise genellikle kuruma büzülmesi değerlerini azaltmıştır.



Şekil 4.33 GP numunelerinde 90. gündeki kuruma büzülmesi değişimi

Şekil 4.33 (a), buhar kürünün GP karışımlarındaki kuruma büzülmesine etkisi görülmektedir. Şekil 4.33(a)'da incelendiğinde buhar kürü uygulanan GP karışımlarının kuruma büzülmesi değerlerinin daha düşük olduğu gözlenmektedir. 90 gün sonunda, buhar kürü uygulanan GP karışımlarının boy değişimi 100 ile 600 μe arasında değişmektedir. Su kürü uygulanan GP karışımlarının kuruma büzülmesi değerleri ise 400 ile 1500 μe arasında değişmektedir (Şekill 4.33 (b)).

Şekil 4.34 (d)'de incelendiğinde su kürü uygulanması durumunda GP karışımlarının kuruma büzülmesi değerleri buhar kürüne göre oldukça artış göstermektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, geopolimerlerin kimyasal reaksiyon süreci sırasında su kaybı oluşabilmektedir. Su kürü uygulanan, numuneler bünyelerindeki su kaybettikleri ilk iki hafta içinde önemli ölçüde kuruma büzülmesi gerçekleştirmiştir. Ayrıca, UK oranı arttıkça kuruma büzülmesinin azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.34 GP üretimde kullanılan atıkların 90. gündeki kuruma büzülmesi üzerindeki etkisi

Yapılan bazı çalışmalarda geopolimerlerin kuruma büzülmesinin küçük bir değeresahip olduğu belirtilmiştir. Bu özellik y daha çok yüksek kür sıcaklığına

sahip olan UKesaslı geopolimerler için geçerlidir. Wallah ve Rangan (2006), sadece UKesaslı ortam sıcaklığında kürlenene geopolimer betonun, ısı kürü uygulanmış geopolimer betondan çok daha yüksek bir büzölme gösterdiğini bildirmiştir.

Kuruma büzölmesive çatlak yayılımından korunmak için yapılan çalışmalarda, gözenek yapısını değiştirmeye ve kürlenmenin ortasında su kaybını kontrol etmeye yoğunlaşmıştır. (Provis ve Deventer , 2007; Duxson ve diğerleri., 2007).

UK harçta, bu, gözenek hacmini ve su kaybını arttıran daha yüksek toplam porozitenin bir sonucudur. YFCesaslı geopolimerdedaha iyi bir gözenek yapısı olduğu için kapiler basınç önemli ölçüde artabilmektedir. YFC'nin boyutsal kararlılığı, böylece, su kaybına karşı daha duyarlı olmaktadır. Bu teori, Ma ve Ye (2013) tarafından açıklanan bulgular ile tutarlıdır. Ayrıca, ACT içeren numunelerde sodyum oksit konsantrasyonundaki artış, rötrede azalmaya yol açmıştır. Bu durum, azaltılmış gözenekliliğin ve arttırılmış rijitliğin sonrasında ortaya çıkan olası bir etkidir. ACT ve YFC içeren numunelerde, sodyum oksit ve silika modülü katsayılarında meydana gelen artışlar, mukavemeti iyileştirmesine rağmen rötrenin artışına yol açmıştır. Bu, gözenekliliğin azaltılmasına ya da su kaybı duyarlılığına etki eden, gözenek inceliğinin arttırılmasına bağlı olabilir. Teorik olarak, yüksek $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı serbest silikat iyonlarının içeriğini arttırmış ve alüminosilikat parçacıklarının geopolimerizasyonunu hızlandırmıştır. Bu şekilde, alüminosilikat fazları ve alkali metal iyonları arasında daha ileri bir reaksiyon, hızlandırılmış reaksiyon ile engellenmiştir. Dolayısıyla, arttırılmış $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı, otojenik büzölme azaltmıştır (Song Mu ve diğerleri., 2018).

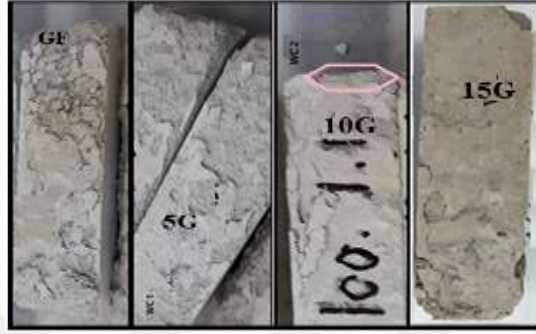
4.6. Donma-Çözölme Dayanıklılığı Testi

GPM karışımlarının donma-çözölme dayanıklılığı için, 50-100-150 çevrimden oluşan bir döngü gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, fiziksel görünüm, ağırlık kaybı ve basınç dayanımı ile donma-çözölme dayanıklılığı incelenmiştir.

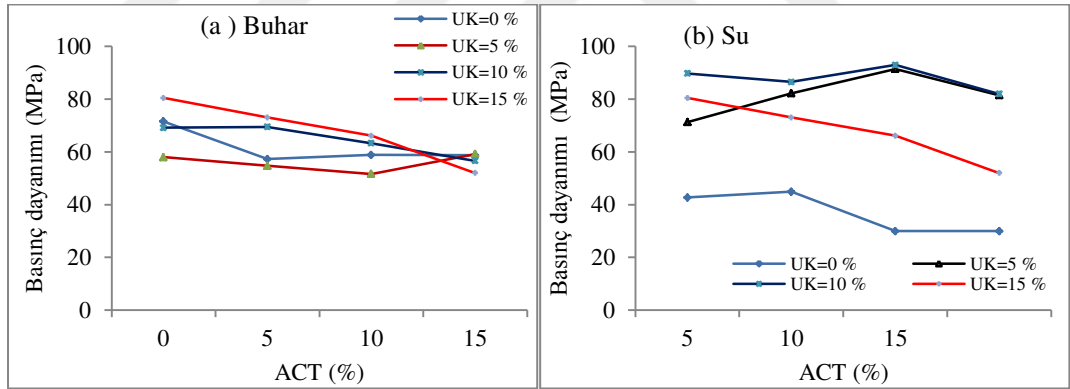
4.6.1. Ağırlık Kaybı ve Basınç Dayanımı Deneyi

4.6.1.1 50 çevrim için ağırlık kaybı ve basınç dayanımı deneyi sonuçları

50 çevrim sonucu, su kürü uygulanan K, 5C, 10C ve 15CGP karışımlarında fiziksel bozulmalar tespit edilmiştir (Şekil 4.35).

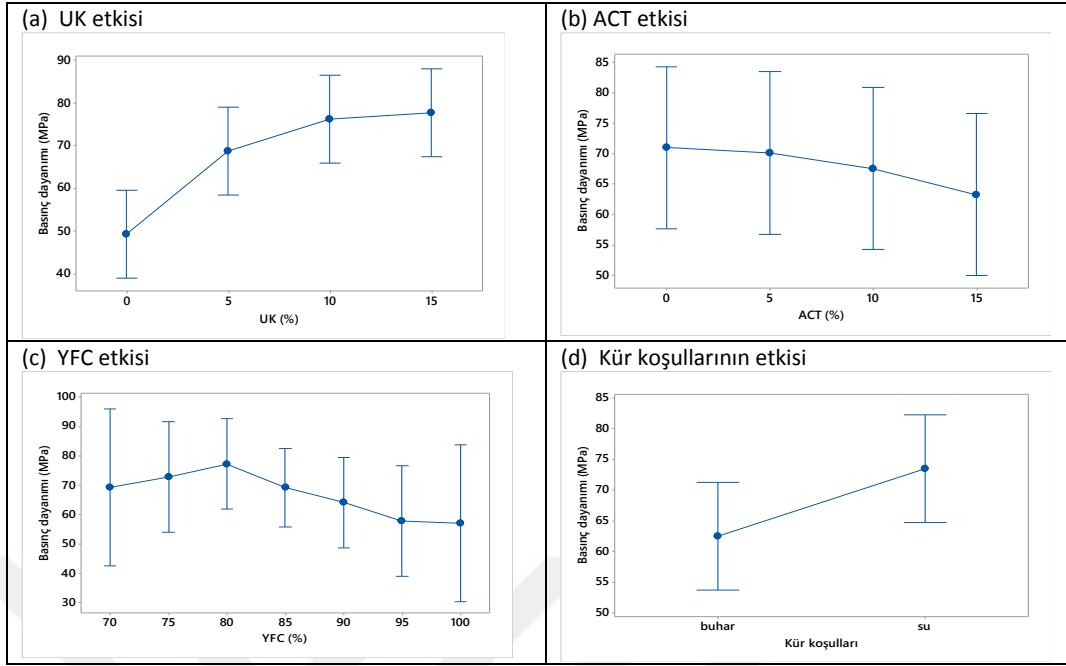


Şekil 4.35GP numunelerinde 50 donma-çözülme çevrimi sonrası fiziksel hasarlar



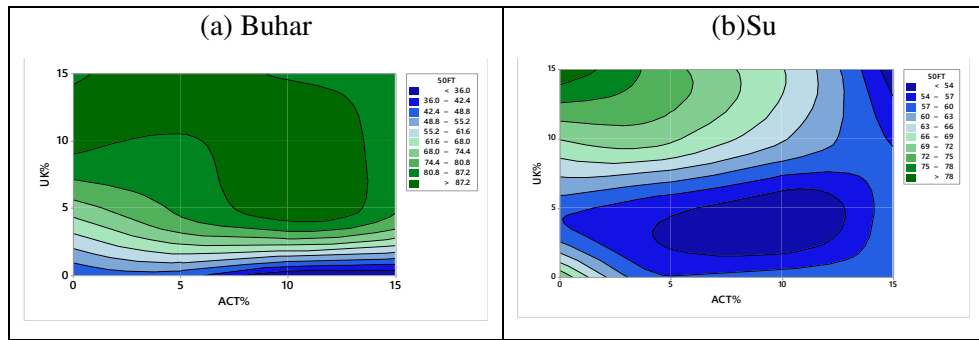
Şekil 4.36GP numunelerinde 50 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki basınç dayanımları

Şekil 4.36 (a ve b)'de UK oranı arttıkça GP karışımlarının 50 çevrimden sonraki basınç dayanımı artmakta, ACT oranı arttığında ise basınç dayanımı azalmaktadır. Ayrıca, donma-çözülme çevriminden sonra, YFC/ACT bazlı GP karışımlarının basınç dayanımı değerleri, YFC/UK esaslı karışımlardaki harçların basınç dayanımı değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 4.37GP numunelerinde 50 donma-çözülmenin basınç dayanımına etkisi

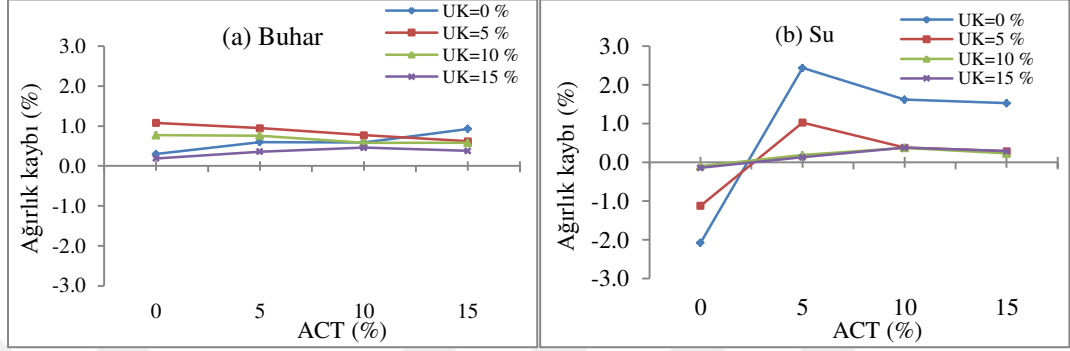
Şekil 4.37 (d)'de buhar kürü uygulanan GP karışımlarında 50 donma-çözülme çevriminden sonra daha yüksek basınç dayanımı elde edildiği görülmektedir. UK oranındaki artış GP karışımlarının 50 donma-çözülme çevriminden sonraki basınç dayanımlarını arttırmaktadır. UK oranındaki artış ise GP karışımlarının 50 donma-çözülme çevriminden sonraki basınç dayanımlarını azaltmaktadır.



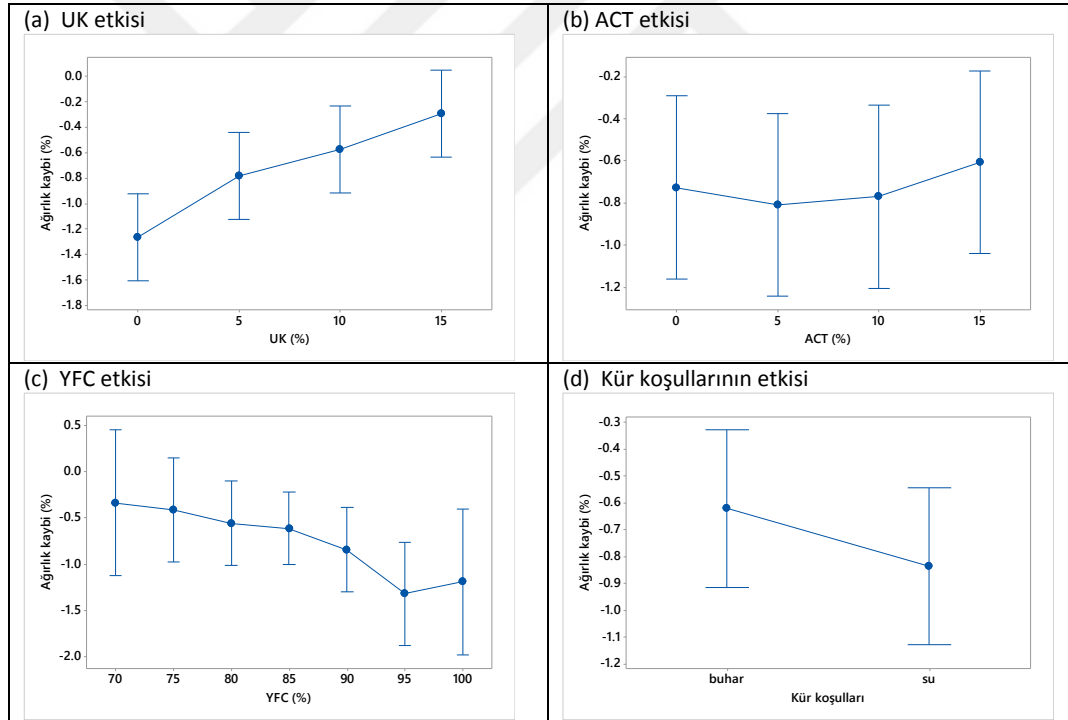
Şekil 4.38GP karışımların 50 donma-çözülme çevrimi sonrasında basınç dayanımına göre optimum oranları

Şekil 4.38 (a)'da, buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 50 donma-çözülme çevrimi sonrası basınç dayanımı açısından UK, ACT ve YFC için optimum oranlar sırasıyla %15, %5, %80 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.38 (b)'de su kürü uygulanan

GP karışımlarının 50 donma-çözülme çevrimi sonrası basınç dayanımı açısından UK, ACT ve YFCiğin optimum oranlar sırasıyla %15, %0, %85olarak elde edilmiştir.



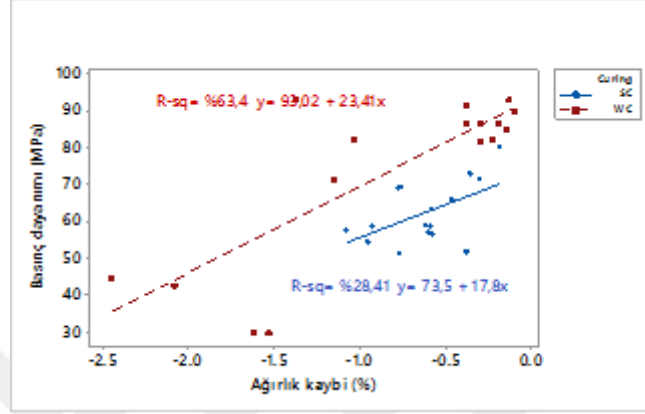
Şekil 4.39GP numunelerinde 50 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki ağırlık kayıpları



Şekil 4.40GP numunelerinde 50 donma-çözülme çevriminin ağırlık kaybına etkisi

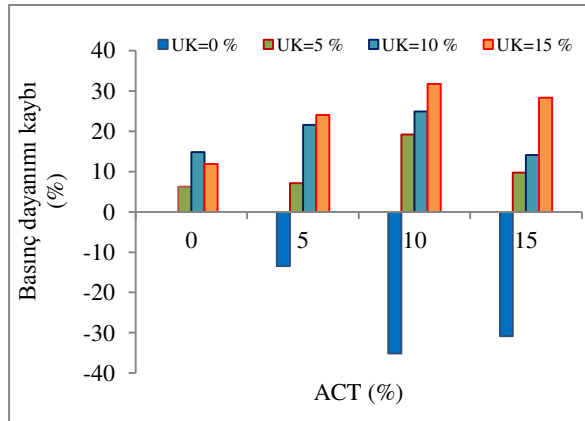
Şekil 4.39'da buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 50 donma-çözülme çevrimi sonrasında ağırlık kaybı değerleri %1'in altındadır. Uçucu kül ağırlık kaybı açısından oldukça önemli bir faktördür. Ayrıca, Şekil 4.39(b)'de görüldüğü üzere, su kürü uygulanan bazı GP karışımlarında ağırlık artışı gözlenmiştir.

50 donma-çözülme çevriminden sonra, GP karışımlarının ağırlık kayıpları Şekil 4.40'de gösterilmiştir. UK ve ACT oranındaki artış ağırlık kayıplarını azaltmaktadır. Bu etki harçlarda sağlanan geçirimsizlik ile orantılıdır. GP karışımlarına uygulanan buhar kürüde ağırlık kaybını azaltmaktadır.



Şekil 4.4150 donma-çözülme çevriminde ağırlık kaybı-basınç dayanımı arasındaki ilişki

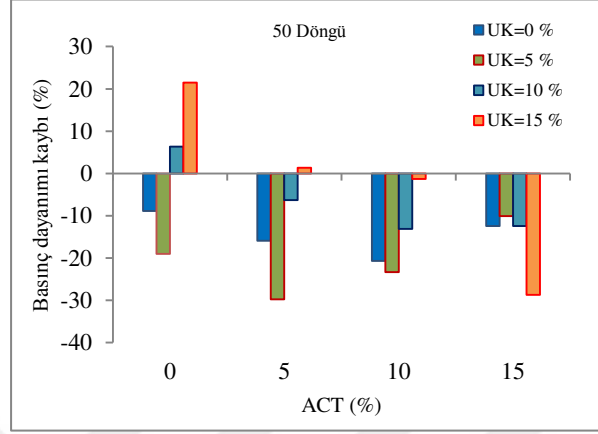
Şekil 4.41 GP karışımlarının 50 donma-çözülme çevriminden sonraki basınç dayanımı-ağırlık kaybı ilişkisini göstermektedir, GP karışımlarının ağırlık kayıpları arttıkça, basınç dayanımı azalmaktadır.



Şekil 4.42Su kürü uygulanan GP karışımlarının 50 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki dayanım kayıpları

Şekil 4.42'de incelendiğinde su kürü uygulanan GP karışımlarında kullanılan ACT oranının artması 50 donma-çözülme sonrasında basınç dayanımında azalmaya yol

açmıştır. ACT'nin UK ile birlikte kullanılması durumunda ise basınç dayanımı artış göstermektedir. %10 ACT ve %15 UK kullanılması durumunda basınç dayanımındaki artışın yaklaşık %30 olduğu gözlenmiştir.

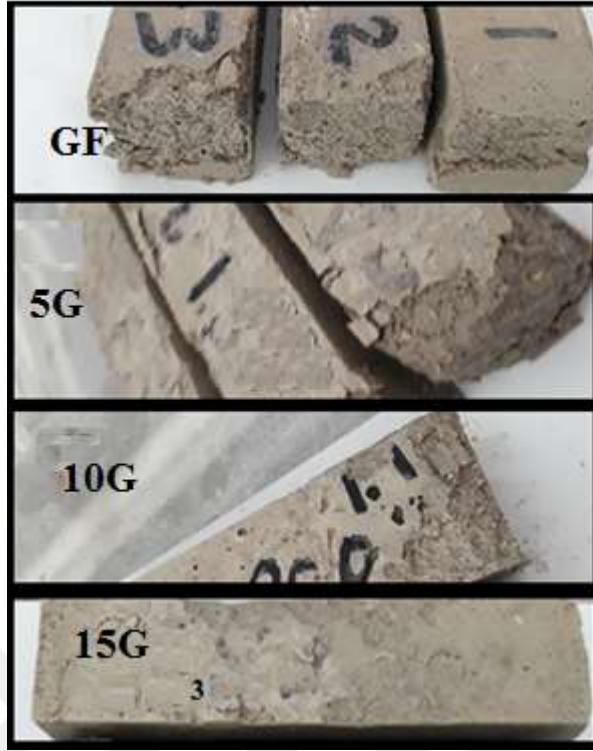


Şekil 4.43Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 50 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki dayanım kayıpları

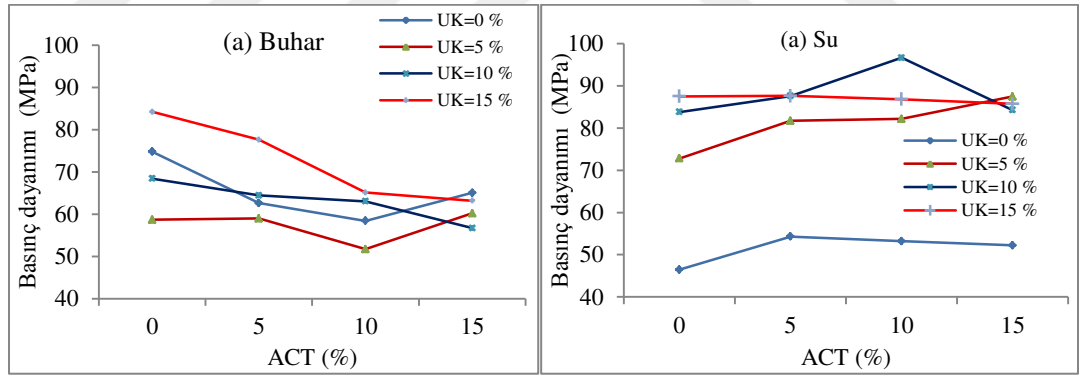
Şekil 4.43’de incelendiğindebuhar kürü uygulanan GP karışımlarında UK oranı arttıkça harçlarda dayanım kaybı oluşmamakta aksine dayanımın arttığı gözlenmiştir. Sadece YFC/ACT esaslı karışımlarda ise donma-çözülme etkisi ile dayanım kaybı oluşmaktadır. Buhar kürü uygulanan GP karışımlarında ise 50 donma-çözülme çevrimi sonucunda dayanım kaybı meydana gelmiştir.

4.6.1.2 100 çevrim için ağırlık kayıpları ve basınç dayanımı deneyi sonuçları

100 donma-çözülme çevrimisonrası, su kürü uygulananK, 5C, 10C ve 15Ckodlu GPM karışımlarında fiziksel hasar oluşmuştur (Şekil 4.44).

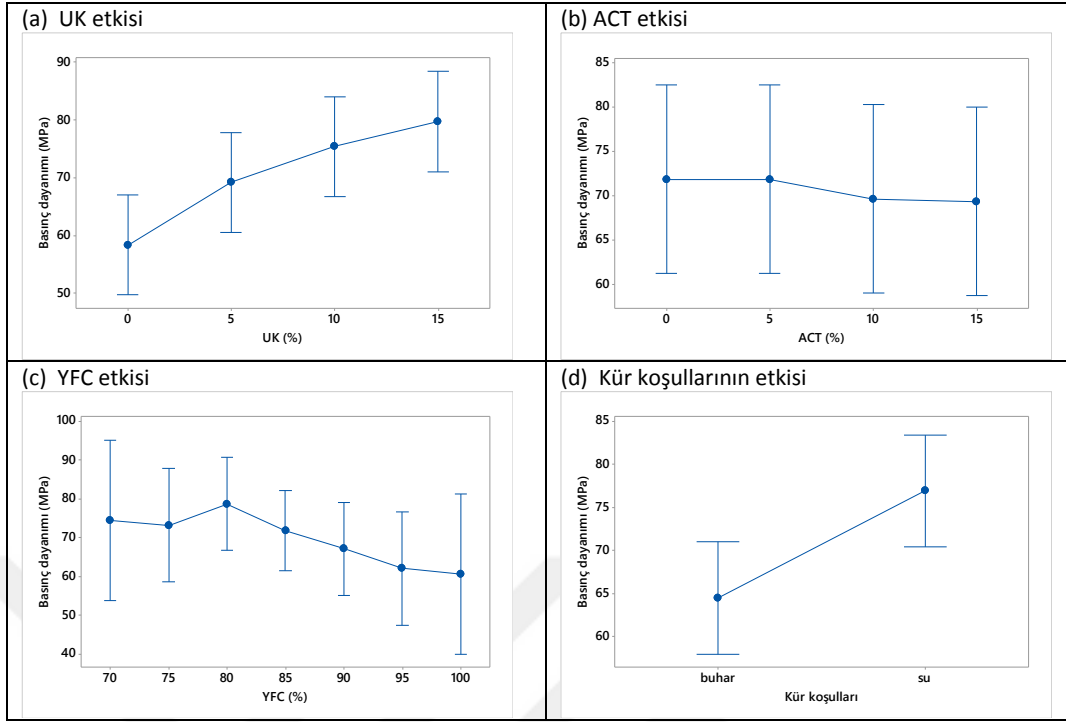


Şekil 4.44 GP numunelerinde 100 donma-çözülme çevrimi sonrası fiziksel hasar



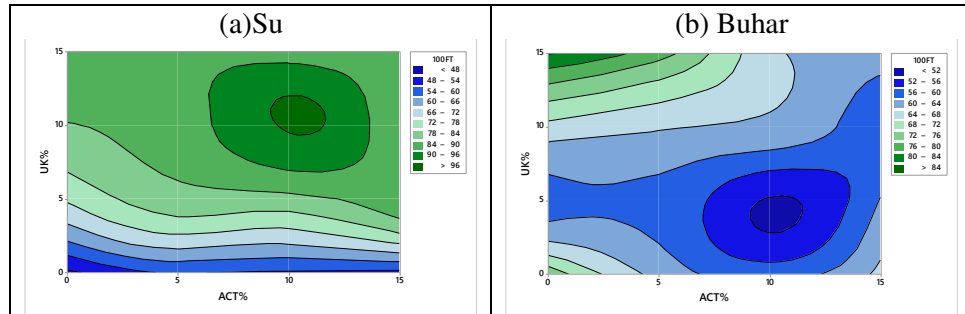
Şekil 4.45 GP numunelerinde 100 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki basınç dayanımları

Şekil 4.45 GP karışımlarının 100 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki basınç dayanımını göstermektedir. GP karışımlarında YFC/UK oranı arttıkça donma-çözülme çevrimi sonrasındaki basınç dayanımı artmakta, YFC/ACT oranı arttıkça ise basınç dayanımı azalmaktadır.



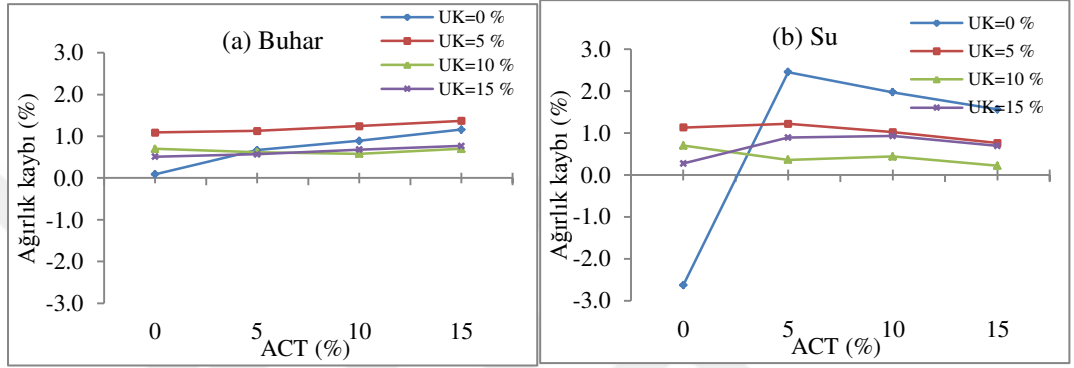
Şekil 4.46GP numunelerinde 100 donma-çözülme çevrimini basınç dayanımına etkisi

100 çevrimden sonraki basınç dayanımı üzerindeki etkenler Şekil 4.46 a, b, c, d’de verilmiştir. Şekil 4.46(d), GP karışımlarında su kürü uygulanması 100 donma-çözülme çevrimi sonrasında basınç dayanımlarını arttırmaktadır. Donma-çözülme çevriminden sonra, YFC/ACT esaslı GP karışımlarının basınç dayanımı değerlerinin, YFC/UK esaslı karışımlardan çok daha düşük olduğu gözlenmiştir. UK oranı arttıkça basınç dayanımının arttığı ACT oranı arttıkça basınç dayanımının azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.47GP karışımların 100 donma-çözülme çevrimi sonrasında basınç dayanımı için optimum oranları

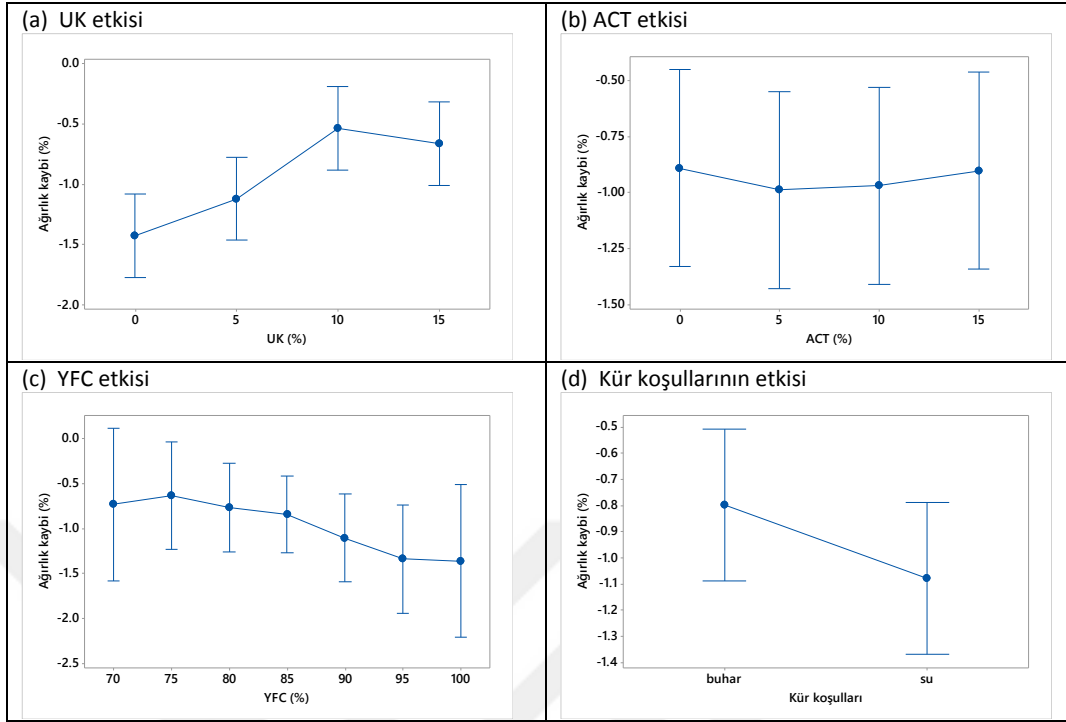
Şekil 4.47’de 100 donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen basınç dayanımları için optimum oranlar verilmiştir. Buhar kürü sonucunda; 100 donma-çözülme çevrimi sonrasında optimum oranlar UK, ACT ve YFC için sırasıyla % 15,%0,% 85 olarak belirlenmiştir. Donma-çözülme çevrimi sonrasında yaklaşık 85 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Su küründe ise bu oranlar ACT, UK ve YFC için sırasıyla %10,10 ve %80 olarak belirlenmiştir.



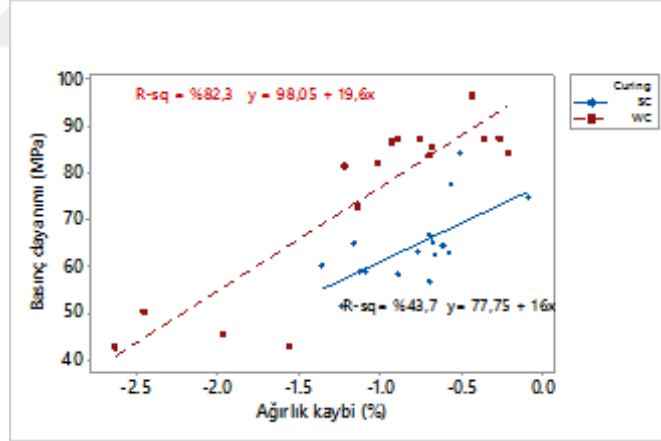
Şekil 4.48GP numunelerinde 100 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki ağırlık kayıpları

Şekil 4.48’de buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 100 donma-çözülme çevrimi sonrasında ağırlık kaybı değerleri %2’nin altındadır. Ancak ACT oranının artması sonucu ağırlık kaybı artış göstermektedir. Şekil 4.48’de görüldüğü üzere, su kürü uygulanan bazı GP karışımlarında da genellikle ACT oranındaki artış ağırlık kaybını arttırmaktadır.

GPM karışımlarında YFC/UK oranı arttığında, harçların ağırlık kayıpları azalırken, YFC/ACT oranı arttığında ağırlık kayıpları da artmaktadır (Şekil 4.49 a ve b). Şekil 4.49 (d)’de incelendiğinde su kürü uygulanan GP karışımlarının ağırlık kaybı daha fazla olmaktadır.

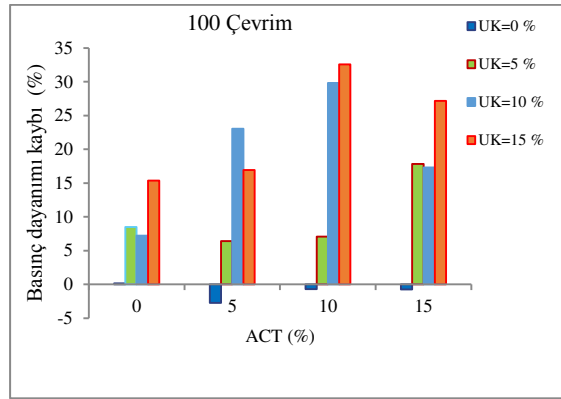


Şekil 4.49GP numunelerinde 100 donma-çözülme çevrimindeki ağırlık kaybı etkisi



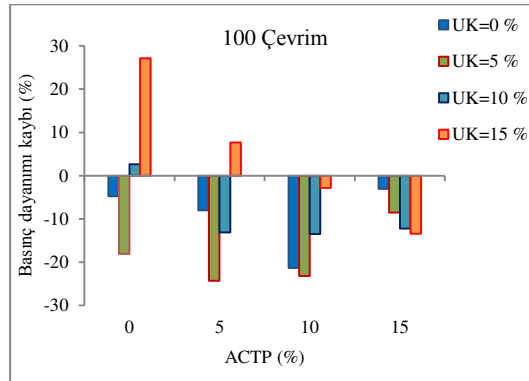
Şekil 4.50100 Donma çözülme çevrimi sonrasında GP karışımlarının ağırlık kaybı-basınç dayanımı ilişkisi

Şekil 4.50'de incelendiğinde ağırlık kaybı arttıkça GPkarışımlarının basınç dayanımı da azalmaktadır.



Şekil 4.51 Su kürü uygulanan GP karışımların 100 donma-çözülme çevrimindeki dayanım kayıpları

Şekil 4.51’de görüldüğü GP karışımlarında 100 çevrimden sonra dayanım kaybı oluşmamıştır. 100 çevrimden sonra sadece K, 5C, 10C ve 15C kodlu su kürü uygulanan GP karışımlarında fiziksel hasarlar elde edilmiştir. 100 çevrimden sonra GP karışımlarının basınç dayanımları 4,59 % ile 32 % değerleri arasında artış göstermiştir.



Şekil 4.52 Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 100 donma-çözülme çevrimindeki dayanım kayıpları

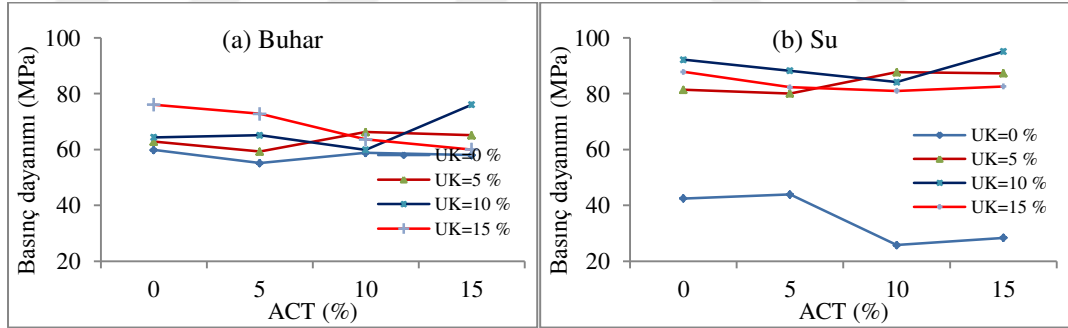
Buhar kürü uygulanan GP karışımlarında genellikle dayanım kaybı meydana gelmektedir (Şekil 4.52). UK oranının %15, ACT oranının maksimum %5 olması durumunda ise dayanım değerleri artış göstermiştir. Buhar küründe ACT oranındaki artış 100 çevrimden sonra basınç dayanımlarını azaltmıştır.

4.6.1.3 150 çevrim için ağırlık kayıpları ve basınç dayanımı deneyi sonuçları

Donma-çözülme çevrimleri sırasında, K, 5C, 10C, 15C, 5U ve 5C5U numunelerinin kütlesi değişmiştir (cismin yüzeyi, donma-çözülme çevrimleri sırasında hasar gördü) ve diğer numunelerin kütlesi ise donma-çözülme döngüleri sırasında değişmemiştir (yüzeyde dağılma meydana gelmedi) (şekil 4.53).

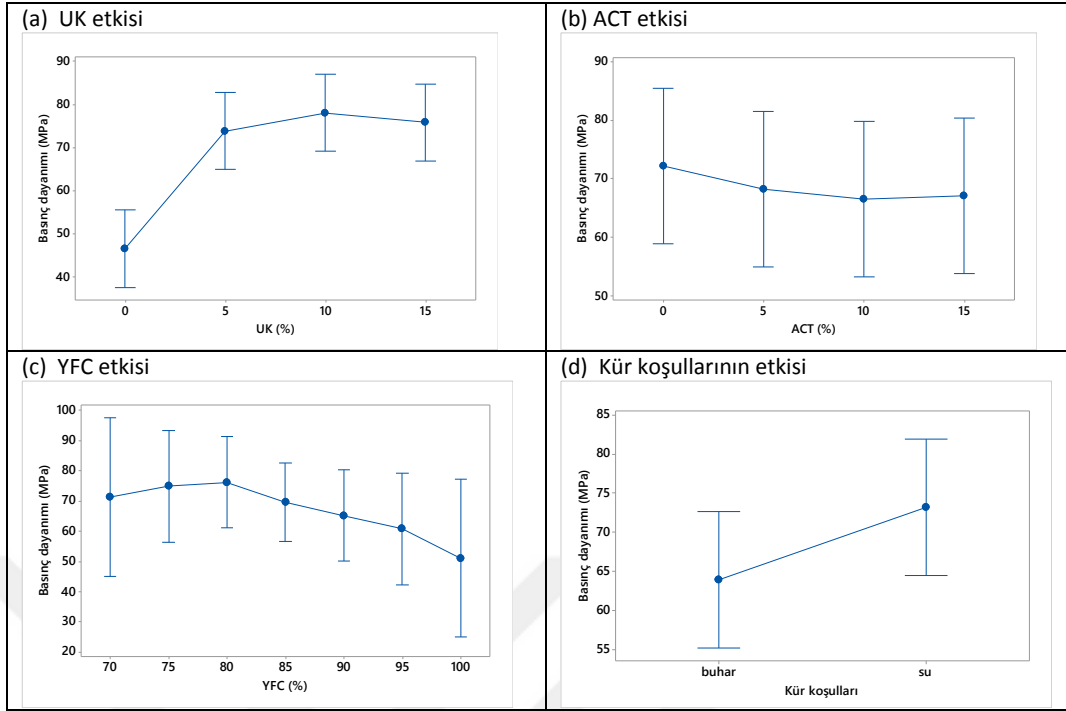


Şekil 4.53GP numunelerinde 150 donma-çözülme çevrimindeki fiziksel hasar



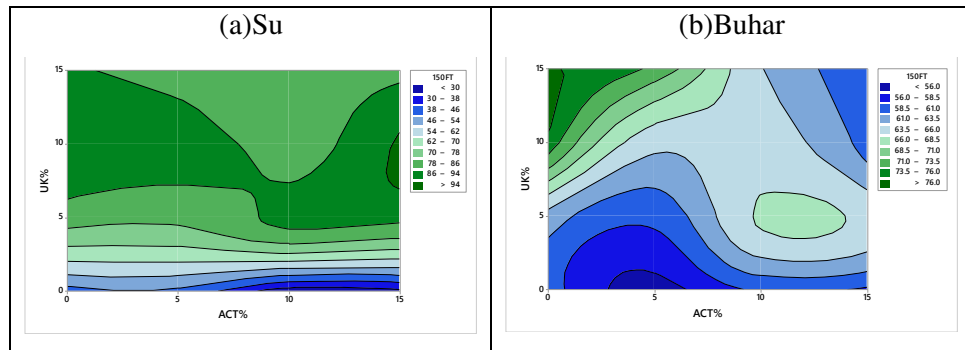
Şekil 4.54GP numunelerinde 150 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki basınç dayanımları

Şekil 4.54 GP karışımlarının 150 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki basınç dayanımını göstermektedir. GP karışımlarında YFC/UK oranı arttıkça donma-çözülme çevrimi sonrasındaki basınç dayanımı artmakta, YFC/ACT oranı arttıkça ise basınç dayanımı azalmaktadır. Su kürü uygulanan GP karışımlarının basınç dayanımı UK kullanılmadığı durumda 40 MPa altında bir değere sahip olmaktadır. Su kürü uygulanan GP karışımlarında %10 UK ve %15 ACT kullanılması durumunda 150 donma-çözülme çevriminden sonra yaklaşık 100 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir.



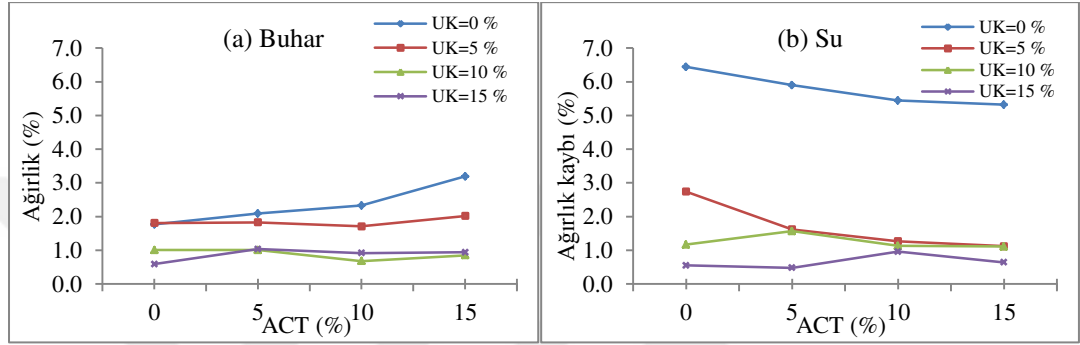
Şekil 4.55 GP numunelerinde 150 donma-çözülme sonrasındaki basınç dayanımları üzerindeki etkenler

Şekil 4.55 GP karışımlarının 150 donma-çözülme çevriminden sonraki basınç dayanımını göstermektedir. GP karışımlarında YFC/UK oranı arttığında, karışımların basınç dayanımı artarken, YFC/ACT oranı arttığında basınç dayanımı azalmaktadır. Şekil 4.55(d) 150 donma çözülme çevrimi sonrasında su kürü uygulamasının daha yüksek basınç dayanımı sağladığını göstermektedir.



Şekil 4.56 GP numunelerinde 150 donma-çözülme çevrimi sonrasında basınç dayanımı için optimum oranları

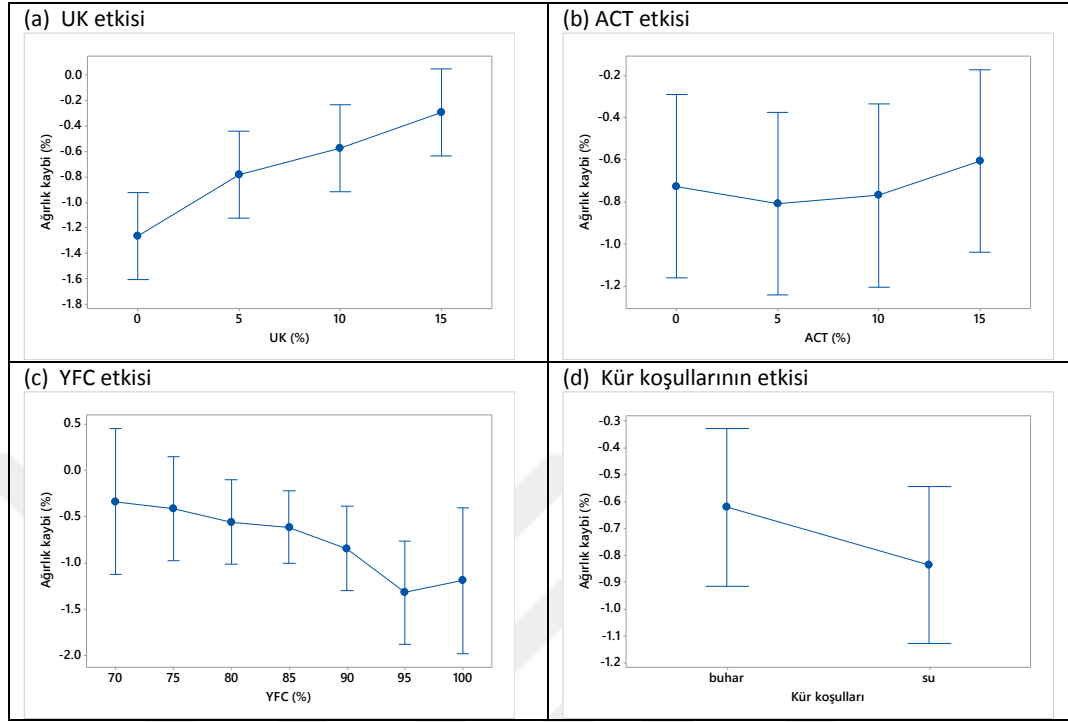
Şekil 4.56’da su kürü uygulanan GP karışımlarında 150 donma çözülme çevrimi için verilen optimum oranlar UK, ACT ve YFC için sırasıyla, %10, %15, ve <%5 olarak bulunmuştur. Su kürü uygulanan %10-15 ACT katkılı GP karışımlarında fiziksel hasarlar gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, GP karışımlarında UK kullanılması durumunda mükemmel bir donma çözülme direnci elde edilmektedir.



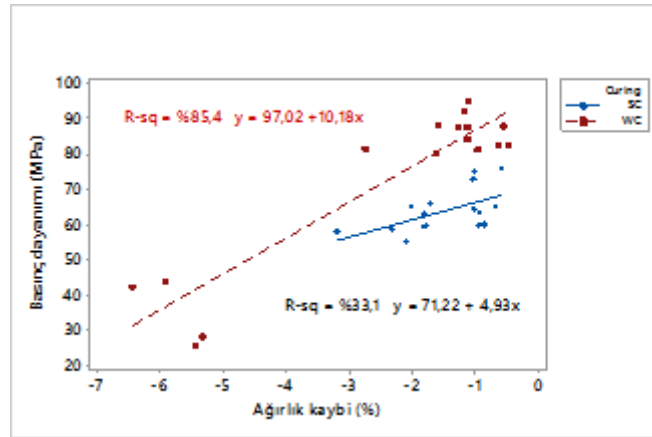
Şekil 4.57 GP numunelerinde 150 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki ağırlık kayıpları

Şekil 4.57’de buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 150 donma-çözülme çevrimi sonrasında ağırlık kaybı değerleri %3’ün altındadır. Ancak ACT oranının artması sonucu ağırlık kaybı artış göstermektedir. Şekil 4.57’de görüldüğü üzere, su kürü uygulanan ve UK kullanılmayan GP karışımlarında %6 ve üzeri ağırlık kaybı oluşmuştur.

GP karışımlarında UK oranının artması ağırlık kaybını azaltırken ACT’nin %10’a kadar artması, ağırlık kayıpları artmıştır (Şekil 4.58 (a,b)). Şekil 4.58(d), 150 donma-çözülme çevriminden sonra ağırlık kayıpları karşılaştırıldığında, su kürü uygulanan GP karışımlarının daha fazla ağırlık kaybına uğradığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlardan, UK kullanılması durumunda mükemmel bir donma çözülme direnci elde edilmektedir.



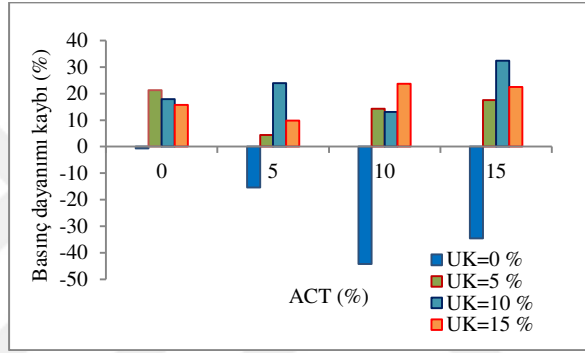
Şekil 4.58 GP numunelerinde 150 donma-çözülme çevriminin ağırlık kaybına etkisi



Şekil 4.59 GP numunelerinde 150 Donma çözülme çevriminin ağırlık kaybı-bağınc dayanımı ilişkisi

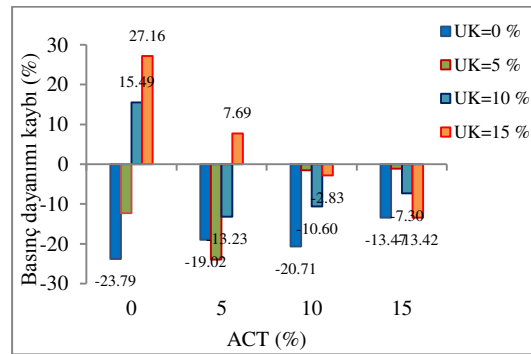
Şekil 4.59’de incelendiğinde 150 donma-çözülme çevrimi sonucunda ağırlık kaybı arttıkça GP karışımlarının bağınc dayanımı da azalmaktadır.

Deneysel çalışmada, dayanım kaybı azalması yerine bir artış meydana gelmesi ise dikkat çekicidir. Bu esas olarak Geopolimerik matrisin kompakt olması gerçeğiyle ilgilidir ve donma-çözülme etkisine karşı dayanıklılık sağlayan iyi bir aderansile açıklanabilmektedir. Buna ek olarak, donma-çözülme çevrimleri sırasında matristeki reaksiyonların devam etmesi ile dayanım artışı elde edilmektedir. Literatür taramasında, dayanım azalmasına ilişkin önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu bulgular, geopolimerler için donma-çözülme hakkında yapılmış olan önceki çalışmalarla uyumludur (Fu ve ark., 2011).



Şekil 4.60 Su kürü uygulanan GP karışımlarının 150 donma-çözülme çevrimindeki basınç dayanımı kayıpları

150 donma-çözülme sonrasında K, 5C, 10C, 15C, 5U ve 5C5U kodlu GP karışımlarında fiziksel hasarlar oluşmuştur. Su kürü uygulanan karışımların 150 çevrim sonrasında basınç dayanımları 0.66, 15.4%, 44%, 34.6% oranlarında azalmıştır. 150 çevrim sonrasında 15C5U kodlu GP karışımında yaklaşık 95 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir (Şekil 4.60).



Şekil 4.61 Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 150 donma-çözülme çevrimindeki dayanımı kayıpları

Şekil 4.61’de buhar kürü uygulanan GP karışımlarında 150 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki basıncı dayanımı kayıpları verilmiştir. Düşük ACT oranlarında (<%5) UK oranının %15 olması durumunda basınç dayanımı kaybı engellenmektedir. Ancak ACT oranındaki artış 150 çevrim sonrasındaki basınç dayanımı kaybını nispeten azaltmaktadır.

4.6.2. Ultrases Geçiş Hızı Testi Deney Sonuçları

Ultrases geçiş hızı belirlenen GP Karışımlarının test sonuçları Tablo 4.7’den Tablo 4.12’ye kadar verilmiştir.

Tablo 4.7 Su kürü uygulanan GP karışımlarının 50 donma-çözülme çevriminden sonraki ultrases geçiş hızları

Karışım No.	Çevrim öncesi ultrases geçiş hızı Km/sec	Çevrim sonrası ultrases geçiş hızı km/s	50 çevrim sonrası basınç dayanımı MPa	Ta
K	2,854	2,735	38,8	blo
5C	2,861	2,895	50,7	
10C	2,792	2,947	62,5	4.7
15C	2,73	2,883	51,3	’de
5U	3,34	2,991	59,5	inc
5C5U	3,299	3,019	54,8	
10C5U	3,156	3,478	90,87	ele
15C5U	3,226	3,441	81,05	
10U	3,048	3,333	87,3	ndi
5C10U	3,137	3,232	86,5	ğın
10C10U	3,285	3,556	93	
15C10U	3,107	3,272	82,4	de
15F	3,419	3,433	86,9	su
5C15U	3,232	3,478	93	
10C15U	2,783	3,478	86,2	kür
15C15U	2,878	3,478	87,3	ü

uygulanan GP Karışımlarında 50 donma-çözülme çevrimi sonucunda ultrases geçiş hızları genellikle artış göstermektedir. Sadece 5U ve 5C5U kodlu GP karışımlarının ultrases geçiş hızları azalmıştır. Ultrases geçiş hızlarının artması sonucunda basınç dayanımları artış göstermektedir. Özellikle ultrases geçiş hızının yaklaşık 3,5 km/s olması durumunda basınç dayanımı 90 MPa ve üzeri değerler almaktadır.

Tablo 4.8 Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 50 donma-çözülme çevriminde sonraki ultrases geçiş hızları

Karışım No.	Çevrim öncesi ultrases geçiş hızı Km/sec	Çevrim sonrası ultrases geçiş hızı Km/sec	Çevrim sonrası basınç dayanımı MPa
K	3,299	3,168	73,13
5C	2,857	2,759	60,00
10C	3,20	2,520	60,50
15C	2,974	2,540	59,96
5F	2,957	2,759	59,50
5C5U	3,162	2,443	57,90
10C5U	2,837	2,807	54,08
15C5U	2,832	2,462	59,00
10U	2,619	2,842	69,16
5C10U	3,200	2,883	69,50
10C10U	3,053	2,759	63,00
15C10U	2,878	2,759	56,70
15U	2,899	3,478	80,40
5C15U	3,333	3,265	73,00
10C15U	3,137	2,763	66,16
15C15U	3,306	3,019	64,30

Tablo 4.8’de incelendiğinde buhar kürü uygulanan GP Karışımlarında 50 donma-çözülme çevrimi sonucunda ultrases geçiş hızları genellikle artış göstermektedir. Buhar kürü uygulanan GP karışımlarında su kürü uygulanan GP karışımlarına göre ultrases geçiş hızlarında nispeten daha düşük değerler elde edilmiştir. Buhar kürü uygulanan GP karışımlarında 50 donma-çözülme çevrimden sonra ultrases geçiş hızları genellikle azalmaktadır. Bu sonuçlara göre buhar kürü uygulanan karışımlarda donma-çözülme hasarının daha etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 4.9’da su kürü uygulanan GP karışımlarının 100 donma-çözülme çevriminden sonraki ultrases geçiş hızları verilmiştir. 100 donma-çözülme çevriminden sonrada ultrases geçiş hızları artış göstermektedir. Bu durum su kürünün hidratasyonu devam ettirerek basınç dayanımını da arttırdığını göstermektedir. En yüksek ultrases geçiş 3,636 km/s değeri ile 10C10U kodlu GP karışımında elde edilirken basınç dayanımının 91,87 MPa olduğu gözlenmiştir. En düşük ultrases geçiş hızı ise %100 YFC’li K kodlu (referans) GP karışımında elde edilmiştir.

Tablo 4.9 Su kürü uygulanan GP karışımlarının 100 donma-çözülme çevriminden sonraki ultrases geçiş hızları

Karışım No.	Çevrim öncesi ultrases geçiş hızı Km/sec	Çevrim sonrası ultrases geçiş hızı Km/sec	Çevrim sonrası basınç dayanımı MPa
K	2,712	2,832	46,40
5C	2,783	2,857	58,40
10C	2,540	2,991	57,70
15C	2,606	2,581	52,70
5U	3,013	3,232	80,20
5C5U	2,974	3,200	79,80
10C5U	3,089	3,168	80,90
15C5U	3,232	3,265	87,50
10U	3,680	3,168	83,80
5C10U	3,042	3,456	87,80
10C10U	3,107	3,636	91,87
15G10U	3,232	3,206	84,40
15U	3,200	3,390	87,60
5C15U	3,368	3,587	90,00
10C15U	3,333	3,071	87,00
15G15U	2,712	3,125	85,50

Tablo 4.10 Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 100 donma-çözülme çevriminden sonraki ultrases geçiş hızları

Karışım No.	Çevrim öncesi ultrases geçiş hızı Km/sec	Çevrim sonrası ultrases geçiş hızı Km/sec	Çevrim sonrası basınç dayanımı MPa
K	3,292	3,200	74,80
5C	3,077	3,162	62,60
10C	3,137	2,947	58,40
15C	2,842	2,857	66,20
5U	3,219	2,759	64,00
5C5U	3,404	2,424	61,50
10C5U	3,036	2,540	54,50
15C5U	2,883	2,712	60,22
10U	2,792	2,991	69,50
5C10U	3,048	2,759	67,40
10G10U	3,200	2,698	63,06
15C10U	2,930	2,544	56,80
15U	3,019	3,376	84,00
5C15U	3,232	3,279	77,70
10C15U	3,077	2,581	65,13
15C15U	3,232	2,540	63,16

Tablo 4.10’da buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 100 donma-çözülme çevriminden sonraki ultrases geçiş hızları verilmiştir. Buhar kürü uygulanan GP karışımlarında 100 donma-çözülme çevrimi sonucunda ultrases geçiş hızları genellikle azalmaktadır. Ultrases hızında en fazla azalma oranı %28,8 ile 5C5U kodlu GP karışımında elde edilmiştir.

Tablo 4.11 Su kürü uygulanan GP karışımlarının 150 donma-çözülme çevriminden sonraki ultrases geçiş hızları

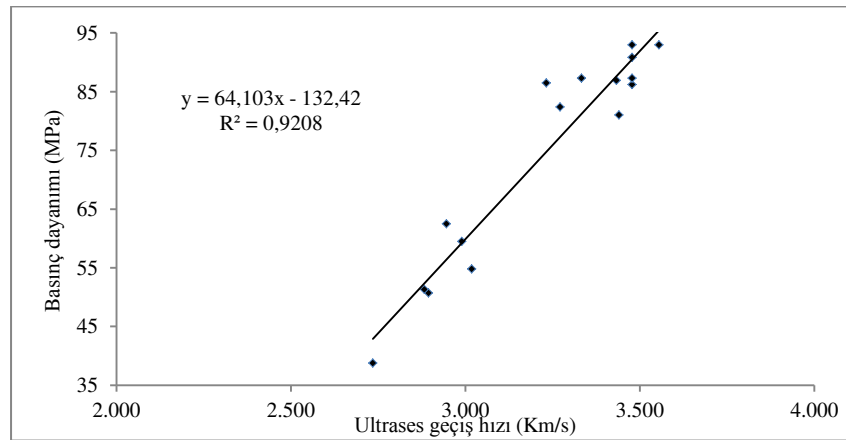
Karışım No.	Çevrim öncesi ultrases geçiş hızı Km/sec	Çevrim sonrası ultrases geçiş hızı Km/sec	150 çevrim sonrası basınç dayanımı MPa
K	2,586	2,609	42,84
5C	2,832	2,698	45,00
10C	2,707	2,421	30,40
15C	2,600	2,087	30,00
5U	3,019	3,292	83,80
5C5U	3,137	3,158	79,40
10C5U	3,133	3,292	87,70
15C5U	3,025	3,175	87,34
10U	3,324	3,481	92,15
5C10U	3,158	3,540	88,60
10C10U	3,306	3,448	84,20
15C10U	3,183	3,653	97,10
15U	3,089	3,678	87,80
5C15U	3,299	3,563	82,30
10C15U	3,008	3,404	81,00
15C15U	3,105	3,313	82,60

Tablo 4.11’de su kürü uygulanan GP karışımlarının 150 donma-çözülme çevriminden sonraki ultrases geçiş hızları verilmiştir. GP karışımlarında UK kullanılması durumunda ultrases geçiş hızları genellikle artış göstermektedir. Ancak sadece ACT kullanılan GP karışımlarının ultrases geçiş hızları azalmaktadır. Bu durum UK’nın donma çözülme etkisinde puzolanik aktivitesinin devam etmesi ile açıklanabilmektedir.

Tablo 4.12 Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 150 donma-çözülme çevriminden sonraki ultrases geçiş hızları

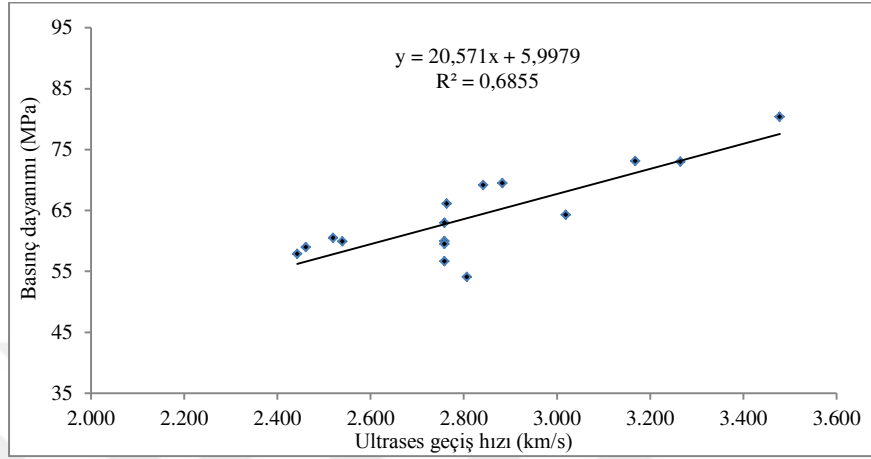
Karışım No.	Çevrim öncesi ultrases geçiş hızı Km/sec	Çevrim sonrası ultrases geçiş hızı Km/sec	150 çevrim sonrası basınç dayanımı MPa
K	3,228	2,792	59,80
5C	2,892	2,533	57,11
10C	3,053	2,460	57,80
15C	3,063	2,477	56,70
5U	3,097	3,294	82,40
5C5U	3,156	2,388	59,30
10C5U	2,989	2,948	66,30
15C5U	3,085	2,907	65,50
10U	3,107	3,385	75,30
5C10U	3,237	2,824	64,60
10C10U	2,981	2,952	62,50
15C10U	3,004	2,817	60,00
15U	3,087	3,387	76,30
5C15U	3,125	3,170	73,80
10C15U	3,019	2,685	63,95
15C15U	3,185	2,595	60,01

Tablo 4.12’de buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 150 donma-çözülme çevriminden sonraki ultrases geçiş hızları verilmiştir. GP karışımlarında 150 donma-çözülme çevrimi sonucunda ultrases geçiş hızları azalmaktadır. Ancak sadece %5,10 VE oranlarında UK kullanılan GP karışımlarının ultrases geçiş hızları artış göstermektedir. UK’nın ACT ile birlikte kullanılması durumunda 150 donma-çözülme çevriminden sonra ultrases geçiş hızlarını azaltmaktadır.



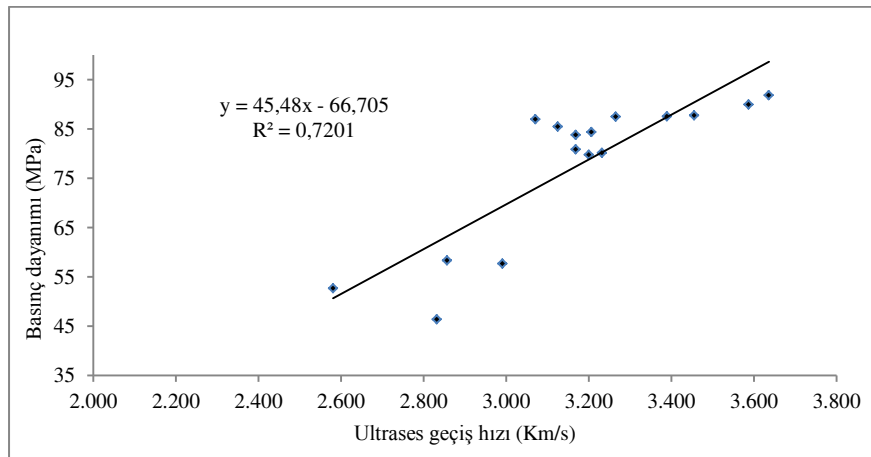
Şekil 4.62 Su kürü uygulanan GP karışımlarının 50 çevrim sonrasındaki basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisi

Şekil 4.62’de incelendiğinde su kürü uygulanan GP karışımlarında 50 donma çözülme çevrimi sonucunda ultrases geçiş hızları belirlenmiş ve basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasında pozitif ve kuvvetli korelasyon elde edilmiştir.



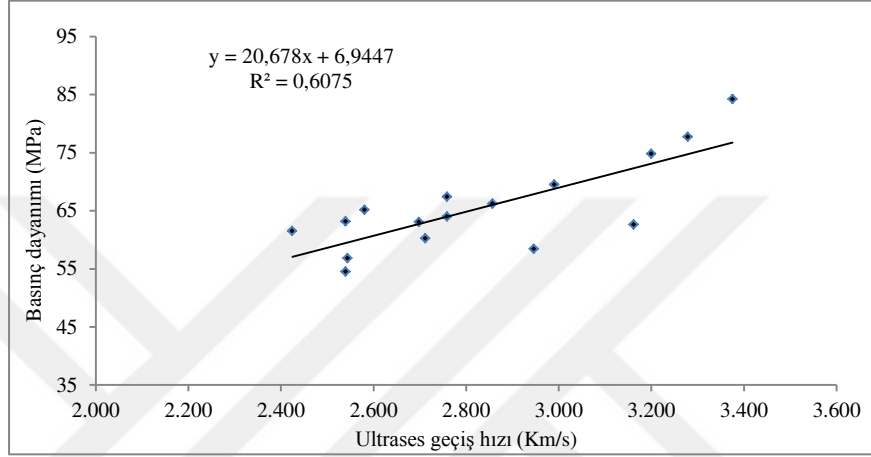
Şekil 4.63Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 50 çevrim sonrasındaki basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisi

Şekil 4.63’de incelendiğindebuhar kürü uygulanan GP karışımlarında 50 donma çözülme çevrimi sonucunda ultrases geçiş hızları belirlenmiş ve basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasında pozitif korelasyon elde edilmiştir. Buhar kürü uygulanan GP karışımlarında basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı arasındaki R^2 değerinin daha düşük olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.64Su kürü uygulanan GPM karışımlarının 100 çevrim sonrasındaki basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisi

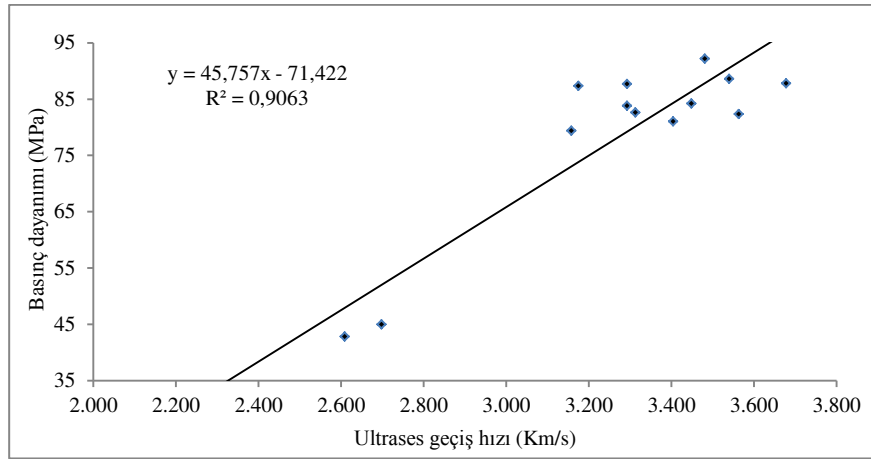
Şekil 4.64’de incelendiğinde su kürü uygulanan GP karışımlarında 100 donma çözülme çevrimi sonucunda ultrases geçiş hızları belirlenmiş ve basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasında pozitif ve kuvvetli korelasyon elde edilmiştir. Ancak sadece ACT kullanılan GP karışımlarının daha düşük basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızına sahip olduğu belirlenmiştir.



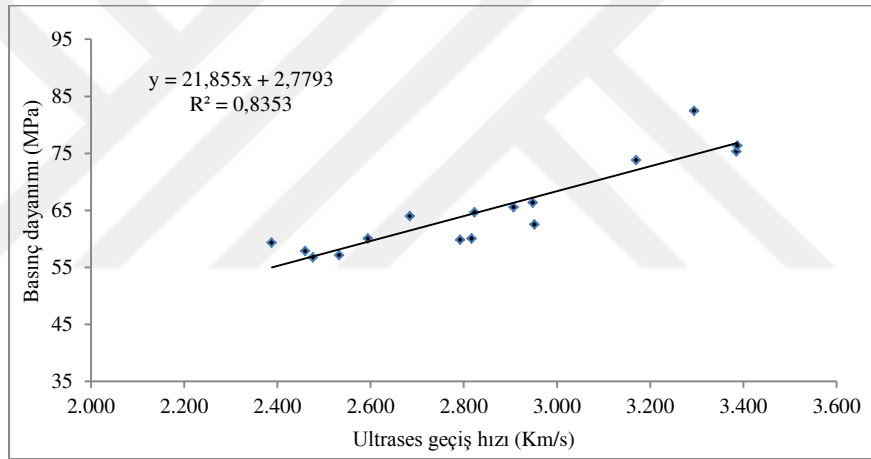
Şekil 4.65Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 100 çevrim sonrasındaki basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisi

Şekil 4.65’de incelendiğindebuhar kürü uygulanan GP karışımlarında 100 donma çözülme çevrimi sonucunda ultrases geçiş hızları belirlenmiş ve basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasında pozitif korelasyon elde edilmiştir. Buhar kürü uygulanan GP karışımlarında basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı arasındaki R^2 değerinin daha düşük olduğu (0,60) gözlenmiştir.

Şekil 4.66’da incelendiğinde su kürü uygulanan GP karışımlarında 150 donma çözülme çevrimi sonucunda ultrases geçiş hızları belirlenmiş ve basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasında pozitif ve kuvvetli korelasyon elde edilmiştir. Basınç dayanımı arttığı takdirde ultrases geçiş hızlarında artış göstermektedir.



Şekil 4.66 Su kürü uygulanan GP karışımlarının 150 çevrim sonrasındaki basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisi



Şekil 4.67 Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının 150 çevrim sonrasındaki basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisi

Şekil 4.67’de incelendiğinde buhar kürü uygulanan GP karışımlarında 150 donma çözülme çevrimi sonucunda ultrases geçiş hızları belirlenmiş ve basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasında pozitif ve kuvvetli korelasyon elde edilmiştir. Buhar kürü uygulanan GP karışımlarında basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı arasındaki R^2 değerinin daha düşük olduğu (0,83) gözlenmiştir.

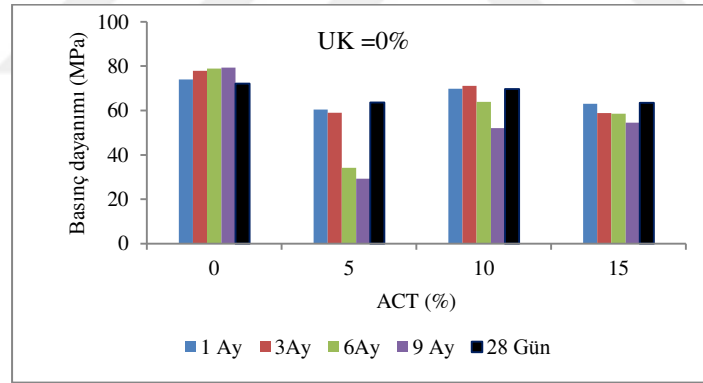
Buhar kürü uygulanan GP karışımları yüksek basınç dayanımına sahip olsalar bile, su ile kürlenmiş karışımlara göre daha düşük ultrases geçiş hızı göstermiştir. GP karışımlarının daha düşük yoğunluğuna rağmen, ultrases geçiş hızının

geleneksel betonun geçiş hızından daha düşük olduğu görülmektedir. Yüksek geçiş hızı, genellikle, yüksek basınç dayanımının ve iyi niteliğe sahip bir geopolimerin göstergesidir.

4.7. Sülfat Dayanıklılığı Deneyi Sonuçları

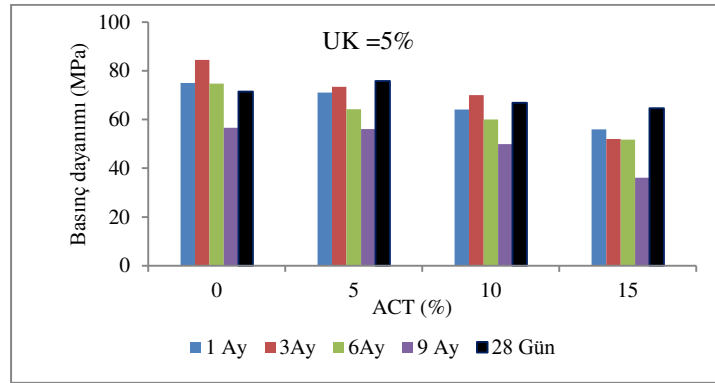
4.7.1. $MgSO_4$ Etkisine Maruz Karışımların Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

Farklı koşullarda kürlenmiş numuneler arasındaki basınç dayanımı değişimlerini değerlendirmek için, numuneler sülfat etkisine tabi tutulmuştur. Sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin dayanıklılığı Bölüm 3.4'te bahsedilen kurallara göre belirlenmiştir. Numuneler çözeltiden çıkarıldıktan sonra, 50 °C sıcaklıkta etüv yardımıyla kurutulmuştur. Daha sonra, numunelerin ağırlık kayıpları ve basınç dayanımı özellikleri belirlenmiştir. GP karışımlarının, sülfat etkisi sonrasındaki basınç dayanımları, Şekil 4.68'den Şekil 4.87'ye kadar gösterilmiştir.



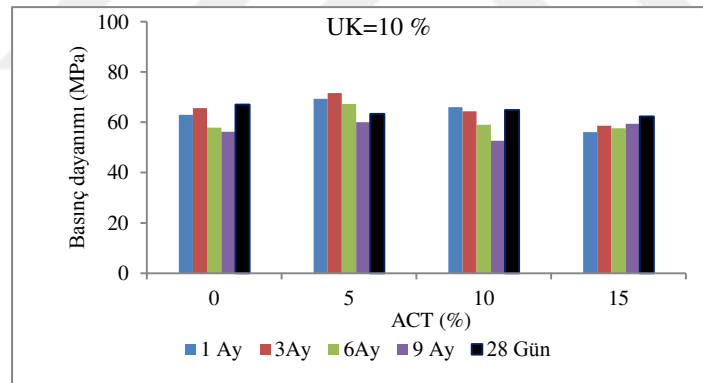
Şekil 4.68 $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış %0 UK esaslı GP karışımlarının basınç dayanımları

Şekil 4.68'de incelendiğinde $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış %0 UK'lı karışımlarda ACT kullanımı ile basınç dayanımı azalmaktadır. %5 ACT kullanıldığı takdirde 6 ve 9. Aylarda basınç dayanımı $MgSO_4$ etkisi ile 40 MPa'nın altına düşmüştür. Ancak %15 ACT kullanılan karışımlarda önemli farklar gözlenmemiş ve basınç dayanımı değerleri yaklaşık 60 MPa olarak bulunmuştur.



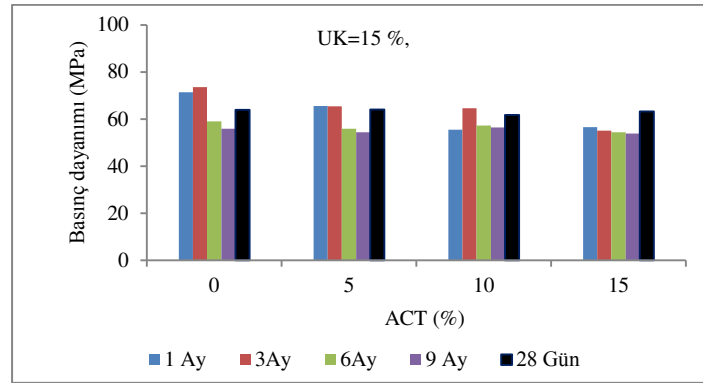
Şekil 4.69 $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış %5 UK esaslı GP karışımlarının basınç dayanımları

Şekil 4.69'de incelendiğinde $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış %5 UK'lı karışımlarda ACT kullanımı ile basınç dayanımı azalmaktadır. $MgSO_4$ etkisine maruz kalma süresi arttıkça basınç dayanımları azalmaktadır. Özellikle 6 ay $MgSO_4$ etkisinden sonra basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin altına düşmektedir.



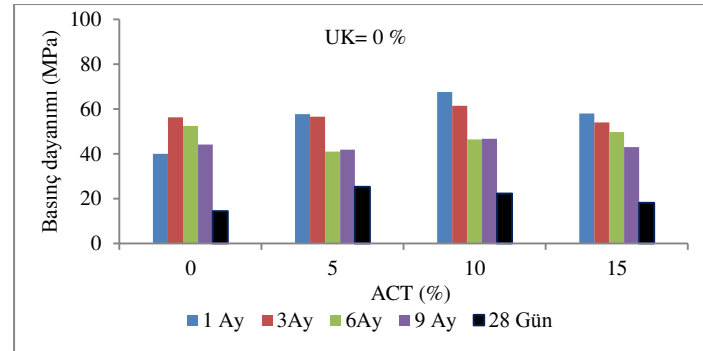
Şekil 4.70 $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış %10 UK esaslı GP karışımlarının basınç dayanımları

Şekil 4.70'de incelendiğinde $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış %10 UK'lı karışımlarda ACT kullanımı ile basınç dayanımı azalmaktadır. $MgSO_4$ etkisine maruz kalma süresi arttıkça basınç dayanımları azalmaktadır. Özellikle %10 ve üzeri ACT kullanımı durumunda; 6 ay $MgSO_4$ etkisinden sonra basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin altına düşmektedir.



Şekil 4.71 $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış %15 UK esaslı GP karışımlarının basınç dayanımları

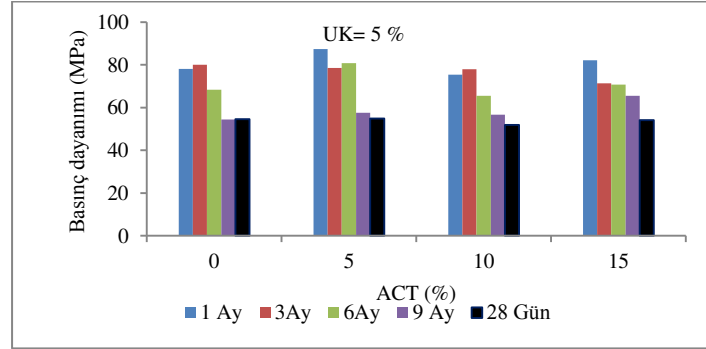
Şekil 4.71’de incelendiğinde $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış %15 UK’lı karışımlarda ACT kullanımı ile ihmal edilebilir derecede basınç dayanımı azalmaktadır. $MgSO_4$ etkisine maruz kalma süresi arttıkça basınç dayanımları azalmaktadır. Özellikle ACT kullanımı durumunda; 6 ay $MgSO_4$ etkisinden sonra basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin altına düşmektedir. %15 UK ve ACT kullanıldığı durumda 9 ay $MgSO_4$ etkisinden sonra yaklaşık 55 MPa gibi yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir.



Şekil 4.72 $MgSO_4$ etkisine maruz su kürü uygulanmış %0 UK esaslı GP karışımlarının basınç dayanımları

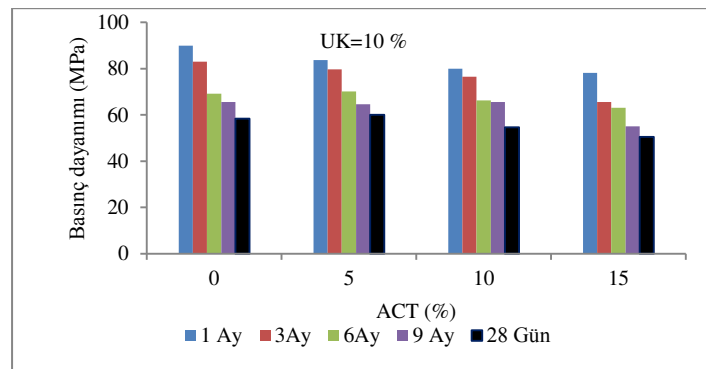
Şekil 4.72’de $MgSO_4$ etkisine maruz su kürü uygulanmış %0 UK’lı karışımlarda zamana bağlı basınç dayanımları görülmektedir. %0 ve 5 ACT kullanılan GP karışımlarında 3 ay boyunca $MgSO_4$ etkisine maruz kalma işlemi basınç dayanımlarını arttırmıştır. Ancak 6 aydan itibaren $MgSO_4$ etkisi ile basınç dayanımları azalmaktadır. Su kürü uygulanan GP karışımlarında ortaya çıkan en

önemli fark $MgSO_4$ etkisi sonucu elde edilen basınç dayanımlarının 28 günlük basınç dayanımından daha yüksek olmasıdır. Bu durum $MgSO_4$ etkisinin mineral katkıları aktive etmesi ile açıklanabilir.



Şekil 4.73 $MgSO_4$ etkisine maruz su kürü uygulanmış %5 UK esaslı GP karışımlarının basınç dayanımları

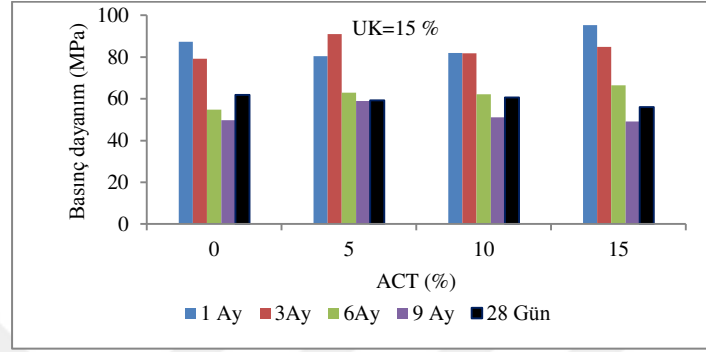
Şekil 4.73’de $MgSO_4$ etkisine maruz su kürü uygulanmış %5 UK’lı karışımlarda zamana bağlı basınç dayanımları görülmektedir. %0 ve 10 ACT kullanılan GP karışımlarında 3 ay boyunca $MgSO_4$ etkisine maruz kalma işlemi basınç dayanımlarını arttırmıştır. Ancak 6 aydan itibaren $MgSO_4$ etkisi ile basınç dayanımları azalmaktadır. %5 UK’lı karışımlarda da $MgSO_4$ etkisi sonucu elde edilen basınç dayanımlarının 28 günlük basınç dayanımından daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 4.74 $MgSO_4$ etkisine maruz su kürü uygulanmış %10 UK esaslı GP karışımlarının basınç dayanımları

Şekil 4.74’de $MgSO_4$ etkisine maruz su kürü uygulanmış %10UK’lı karışımlarda zamana bağlı basınç dayanımları görülmektedir. ACT oranı arttıkça GP

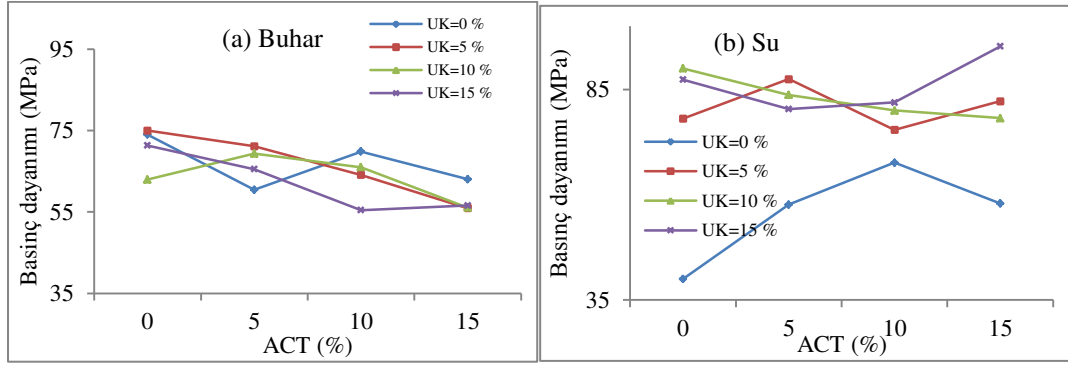
karışımlarının basınç dayanımları $MgSO_4$ etkisi ile azalmaktadır. Ancak 9 ay $MgSO_4$ etkisi sonucunda %15 ACT ve UK kullanılan karışımlarda 55 MPa gibi basınç dayanımı elde edilmiştir. $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımlarının 28 günlük basınç dayanımından daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 4.75 $MgSO_4$ etkisine maruz su kürü uygulanmış %15 UK esaslı GP karışımlarının basınç dayanımları

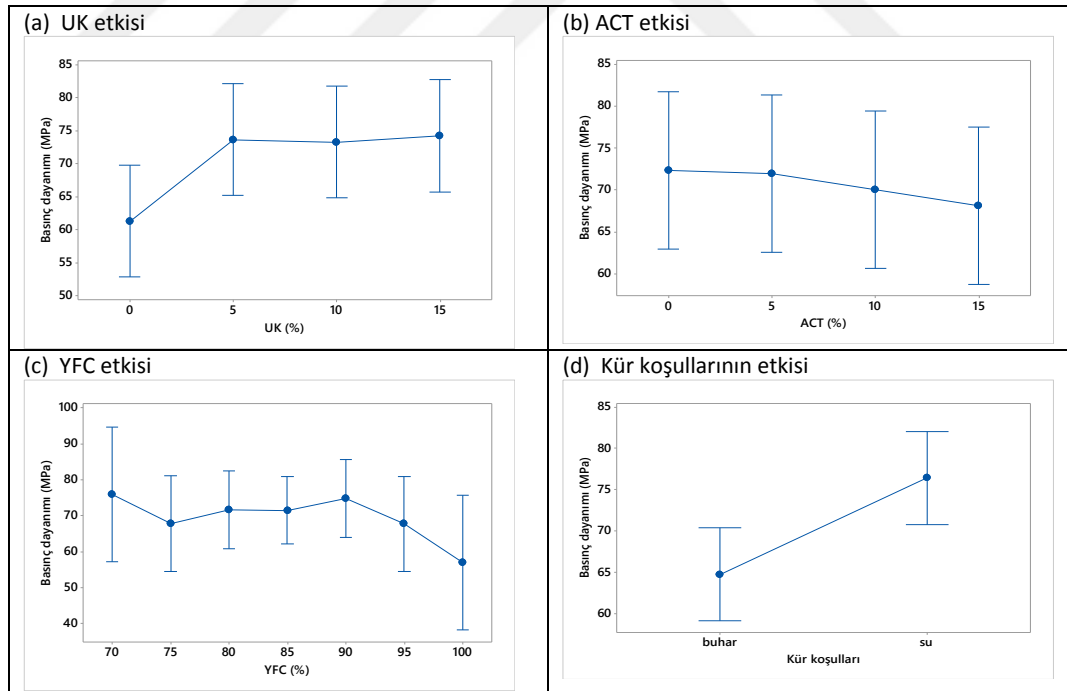
Şekil 4.75’de $MgSO_4$ etkisine maruz su kürü uygulanmış %15 UK’lı karışımlarda zamana bağlı basınç dayanımları görülmektedir. ACT oranı artıktıkça (%10’a kadar) GP karışımlarının basınç dayanımları $MgSO_4$ etkisi ile azalmaktadır. %15 UK ve ACT kullanımı durumunda ise basınç dayanımlarında bir miktar artış gözlenmiştir. %15 UK ve %5 ACT kullanılan GP karışımlarında 3 ay $MgSO_4$ etkisi sonucunda yaklaşık 90 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir.

GP karışımlarında sülfat etkisi ile birlikte basınç dayanımı genellikle 6 aydan sonra azalmaktadır. Buna rağmen, sülfat etkisinde çok belirgin dayanım kayıpları oluşmamış hatta, bazı numunelerde basınç dayanımının arttığı belirlenmiştir. Örneğin, K, 5U ve 10U için, 28 günlük basınç dayanımı ile 1 aylık $MgSO_4$ etkisine maruz karışımların basınç dayanımları karşılaştırıldığında, sırasıyla 74 MPa, 75 MPa, 71,33 MPa değerleri elde edilmiştir. K, 5U ve 10U için, sülfat etkisi sonucu sırasıyla, %2.29, %4.6, ve %11, 22’lik bir basınç dayanımı artışı bulunmuştur. Tüm GP karışımlarında oluşan dayanım kaybı -%3,70 ile -%41,3 arasında değişmektedir (Şekil 4.68-Şekil 4.75).



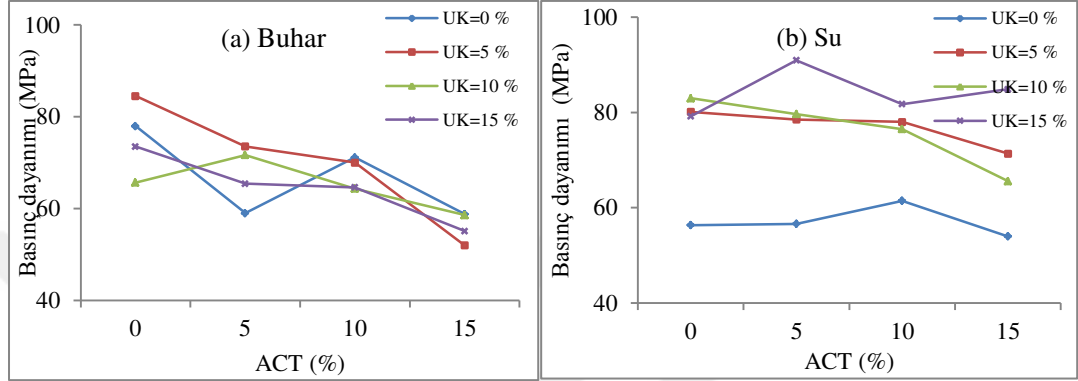
Şekil 4.76 1 ay süresince $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımları

Şekil 4.76 (a)'da incelendiğinde 1 ay $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış GP karışımlarında ACT oranı arttıkça basınç dayanımı genellikle azalmaktadır. Şekil 4.76 (b)'de ise bazı durumlarda ACT oranındaki artış basınç dayanımını arttırmaktadır. Özellikle %15 ACT ve UK'lı GP karışımlarında 1 ay $MgSO_4$ etkisi sonucu 95 MPa basınç dayanımı gözlenmiştir.



Şekil 4.77 1 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımı üzerindeki etkenler

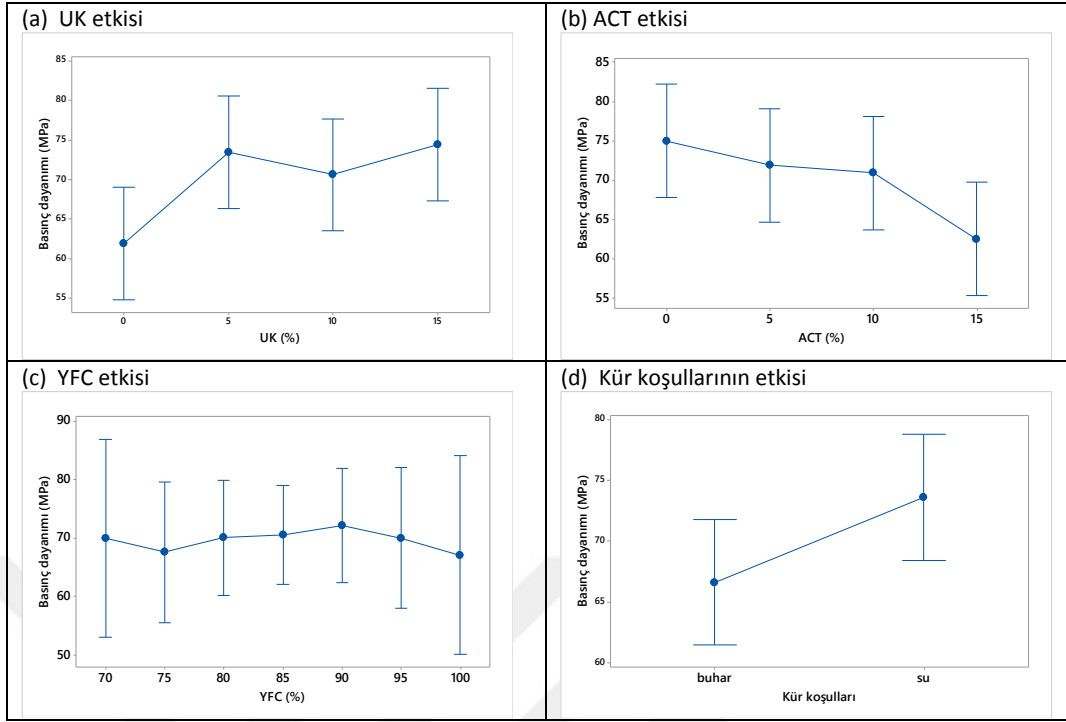
Şekil 4.77’de 1 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarında, UK oranının artması ve ACT oranının azalması sonucunda basınç dayanımının arttığı görülmektedir. Ayrıca su kürü uygulanan GP karışımlarının daha yüksek basınç dayanımı sağladığı da tespit edilmiştir. Bu durum su kürü uygulanan GP karışımlarında hidrasyonun henüz tamamlanmadığı $MgSO_4$ etkisi ile aktivasyonun devam ettiği görülmektedir.



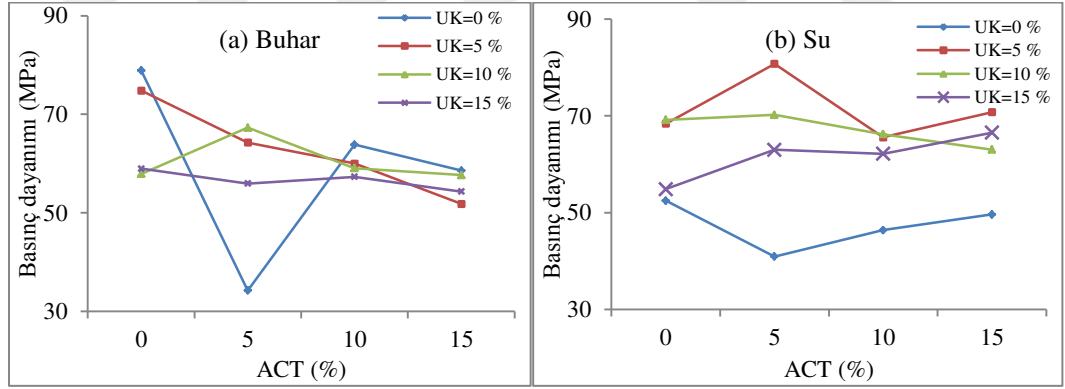
Şekil 4.783 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımları

Şekil 4.78 (a)’da incelendiğinde 3 ay $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış GP karışımlarında ACT oranı arttıkça basınç dayanımı genellikle azalmaktadır. Şekil 4.78 (b)’de aynı durum gözlenmiştir ve ACT oranındaki artış basınç dayanımını genellikle azaltmaktadır. Özellikle %5 ACT ve %15UK’lı GP karışımlarında 3 ay $MgSO_4$ etkisi sonucu 90 MPa basınç dayanımı gözlenmiştir.

Şekil 4.79’da 3 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarında, UK oranının artması ve ACT oranının azalması sonucunda basınç dayanımının arttığı görülmektedir. Su kürü uygulanan GP karışımlarının daha yüksek basınç dayanımı sağladığı da tespit edilmiştir. YFC oranının %85 olması durumunda ise basınç dayanımındaki değişimin daha az olduğu belirlenmiştir.

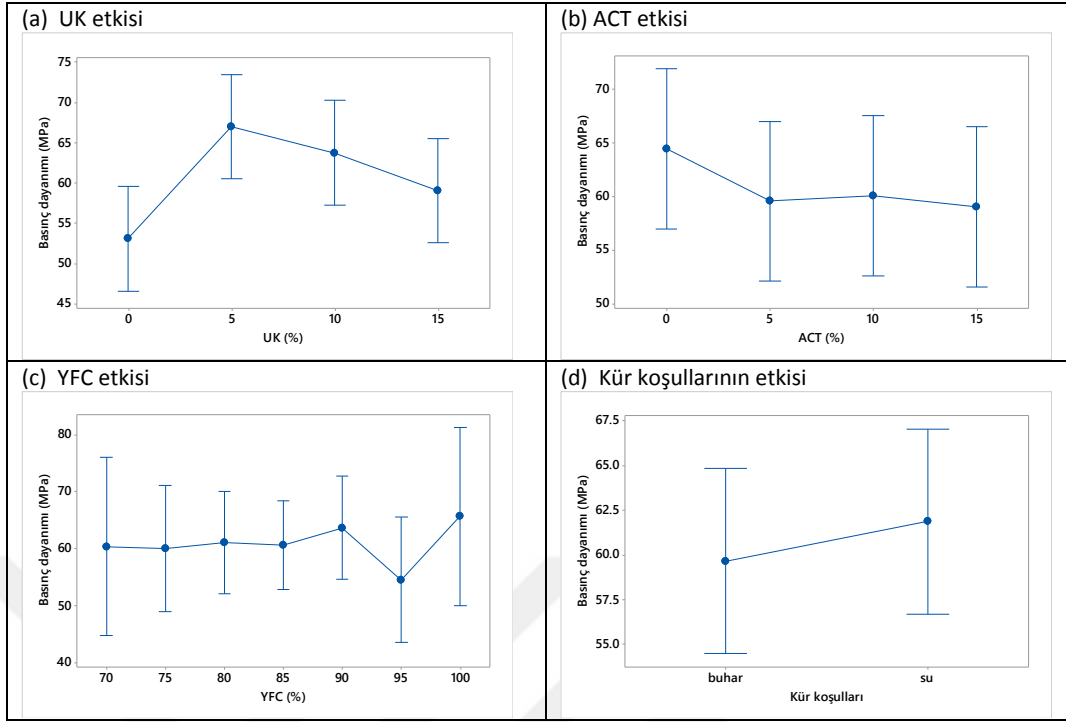


Şekil 4.793 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımı üzerindeki etkenler



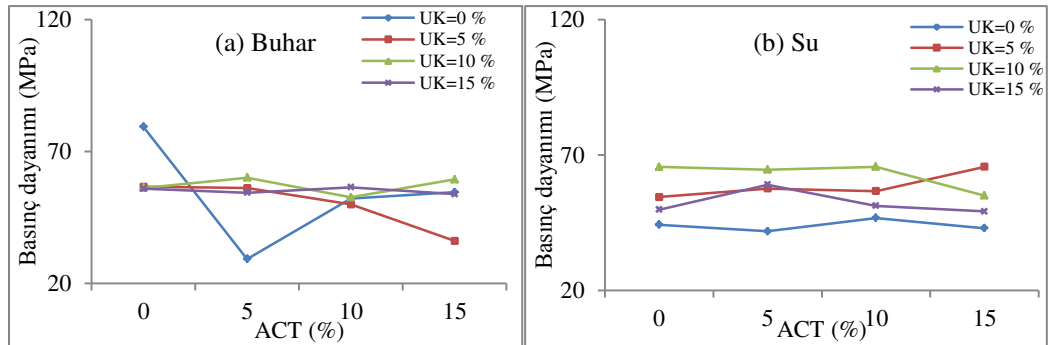
Şekil 4.806 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımları

Şekil 4.80 (a)'da incelendiğinde 6 ay $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış GP karışımlarında ACT oranı arttıkça basınç dayanımı genellikle azalmaktadır. Şekil 4.80 (b)'de %15 UK kullanılması durumunda ACT oranındaki artış ile basınç dayanımı artmaktadır. Özellikle %5 ACT ve UK'lı GP karışımlarında 6 ay $MgSO_4$ etkisi sonucu 80 MPa basınç dayanımı gözlenmiştir.



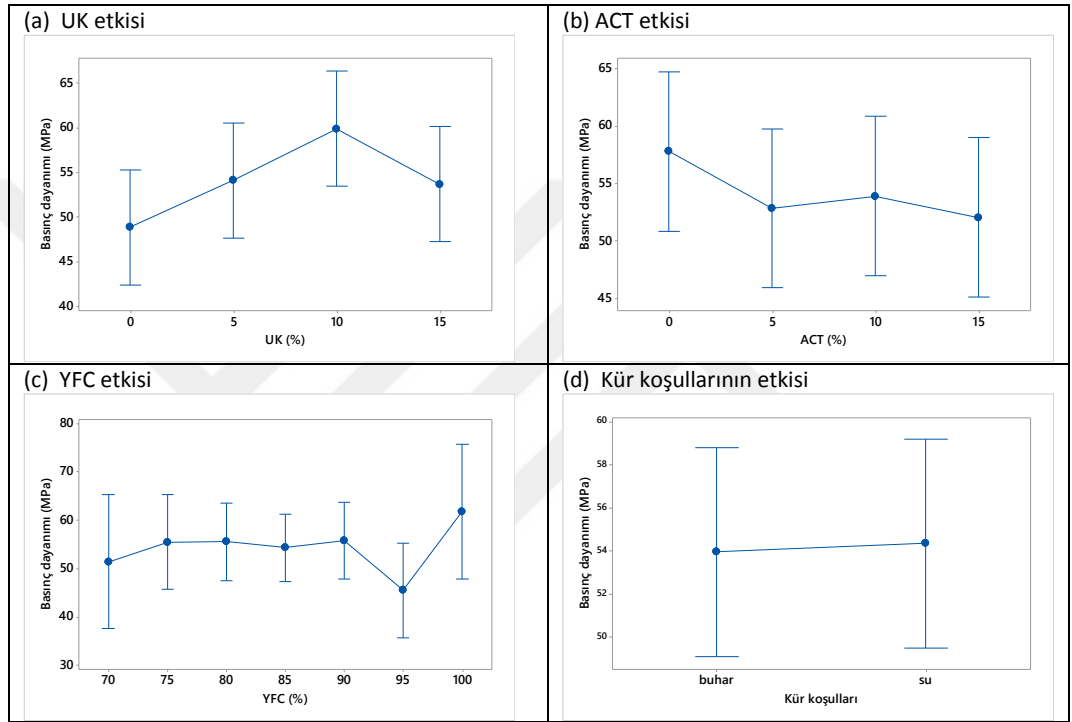
Şekil 4.816 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımı üzerindeki etkenler

6 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarında, UK ve ACT oranının artması basınç dayanımı azaltmaktadır (Şekil 4.81). Bu etki 6. aydan itibaren GP karışımlarında $MgSO_4$ etkisi ile fiziksel hasarında başladığının bir göstergesidir. Su kürü uygulanan GP karışımlarının daha yüksek basınç dayanımı sağladığı gözlenmiştir. YFC oranının %95 olması durumunda ise basınç dayanımının 45 MPa'a kadar düştüğü de belirlenmiştir.



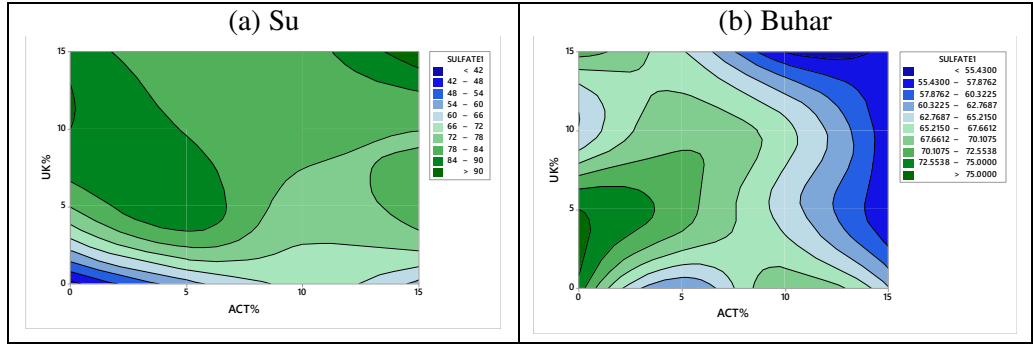
Şekil 4.829 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımları

Şekil 4.82 (a)'da incelendiğinde 9 ay $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış GP karışımlarında %5 UK kullanıldığı takdirde ACT oranı arttıkça basınç dayanımı genellikle azalmaktadır. %10 ve 15 UK'lı karışımların 9 ay $MgSO_4$ etkisinde birbirine benzer özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. Şekil 4.82 (b)'de %5 ve 10 oranında UK kullanımının 9 ay $MgSO_4$ etkisi açısından daha uygun olduğu belirlenmiştir.



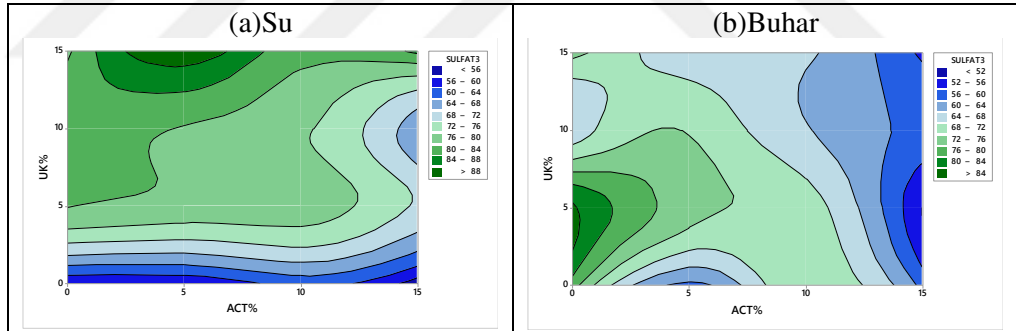
Şekil 4.83 9 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımı üzerindeki etkenler

Şekil 4.83'de 9 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarında, UK oranının artması ve ACT oranının azalması durumunda basınç dayanımını arttığı görülmektedir. 9. ayda su be buhar kürü uygulanan GP karışımlarının basınç dayanımları arasında belirgin farklar tespit edilmemiştir. YFC oranının %95 olması durumunda ise basınç dayanımının 35 MPa'a kadar düştüğü de belirlenmiştir.



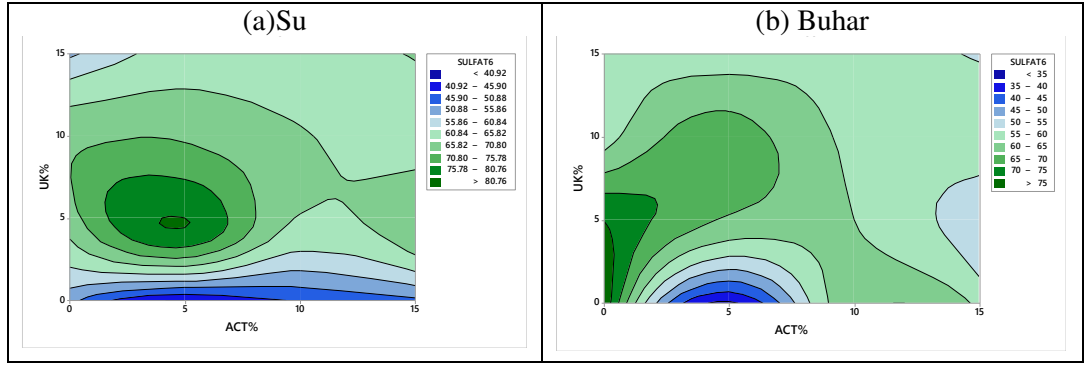
Şekil 4.841 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımı için optimum oranları

Şekil 4.84’de 1 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımları için optimum malzeme oranları görülmektedir. Su kürü uygulanan GP karışımlarında ACT, UK ve YFC oranı sırasıyla %0, %10 ve %90 yada %15, %15 ve %70 olmalıdır. Buhar kürü uygulanan GP karışımlarında ACT, UK ve YFC oranı sırasıyla %0, %5 ve %95 olmalıdır.



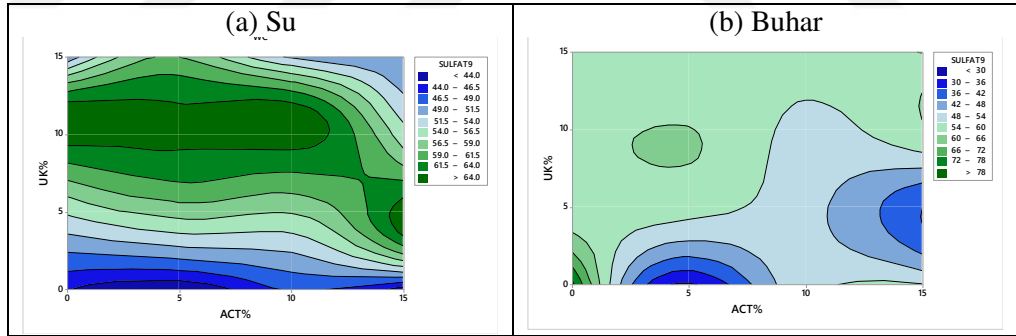
Şekil 4.853 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımı için optimum oranları

Şekil 4.85’de 3 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımları için optimum malzeme oranları görülmektedir. Su kürü uygulanan GP karışımlarında ACT, UK ve YFC oranı sırasıyla %5, %15 ve %80 olmalıdır. Buhar kürü uygulanan GP karışımlarında ACT, UK ve YFC oranı sırasıyla %0, %5 ve %95 olmalıdır.



Şekil 4.866 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımı için optimum oranları

Şekil 4.86’da 6 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımları için optimum malzeme oranları görülmektedir. Su kürü uygulanan GP karışımlarında ACT, UK ve YFC oranı sırasıyla %5, %5 ve %90 olmalıdır. Buhar kürü uygulanan GP karışımlarında ACT, UK ve YFC oranı sırasıyla %0, %5 ve %95 olmalıdır.



Şekil 4.879 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının basınç dayanımı için optimum oranları

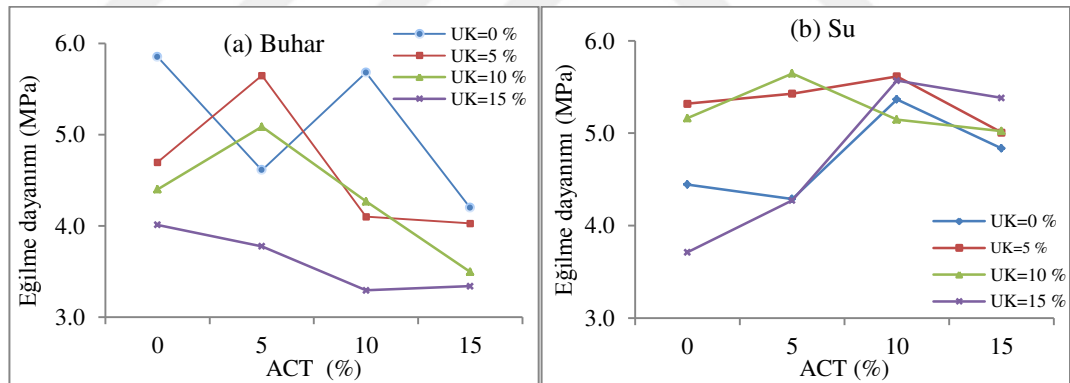
Şekil 4.87’de 9 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımları için optimum malzeme oranları görülmektedir. Su kürü uygulanan GP karışımlarında ACT, UK ve YFC oranı sırasıyla %10, %10 ve %80 yada %15, %5 ve %80 olmalıdır. Buhar kürü uygulanan GP karışımlarında ACT, UK ve YFC oranı sırasıyla %0, %0 ve %100 olmalıdır.

Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonlar, alüminosilikat jelin içerisinde ağ bozucu katyonlar olarak yerleştirilebilmektedir (Bakharev, 2005). Alüminosilikat jele bağ kuran iyonların, UK geopolimer harçların mukavemetini arttırdığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde bekletilen buhar kürü uygulanmış GPM karışımlarında, önemli bir dayanım kaybı yaşamıştır. Bu dayanım kaybının nedeni, yüzey alanında etrenjit oluşumu neden olmuş olabilir. Dolayısıyla, magnezyum sülfat çözeltisi ile etkileşimin bir sonucu olarak, su ve buhar kürü uygulanmış GPM karışımlarında farklı reaksiyon ürünleri oluşmuştur.

4.7.2. MgSO_4 etkisine maruz GP karışımlarının Eğilme Dayanımı Deneyi

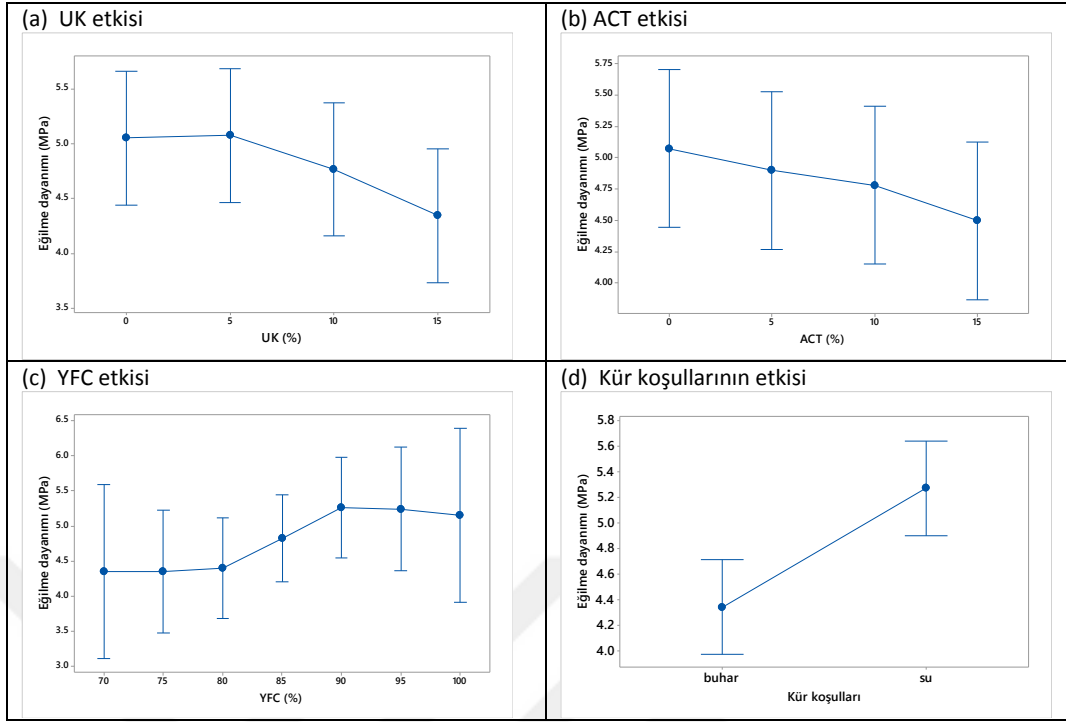
Sonuçları

GP karışımları için eğilme dayanımı, 40x40x160 mm boyutlarında olan prizma örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı deneyine ait sonuçlar Şekil 4.82 ve 4.91 arasında gösterilmektedir.



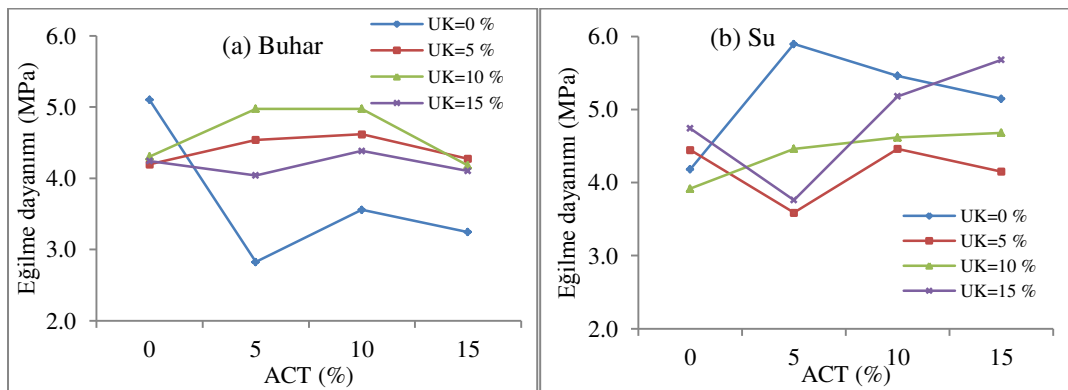
Şekil 4.88 1 ay boyunca MgSO_4 çözeltisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımları

Şekil 4.88 (a)'da incelendiğinde 1 ay MgSO_4 etkisine maruz buhar kürü uygulanmış GP karışımlarında ACT oranı arttıkça eğilme dayanımı genellikle azalmaktadır. %100 YFC'li GP karışımların eğilme dayanımı 5,85 MPa olarak gözlenmiştir. Şekil 4.88 (b)'de ACT oranının %10 olması durumunda 1 ay MgSO_4 etkisi sonucunda eğilme dayanımları artış göstermektedir. Ancak ACT oranının %15 olması durumunda eğilme dayanımları tekrar azalmaktadır.



Şekil 4.891 ay boyunca $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımına etkisi

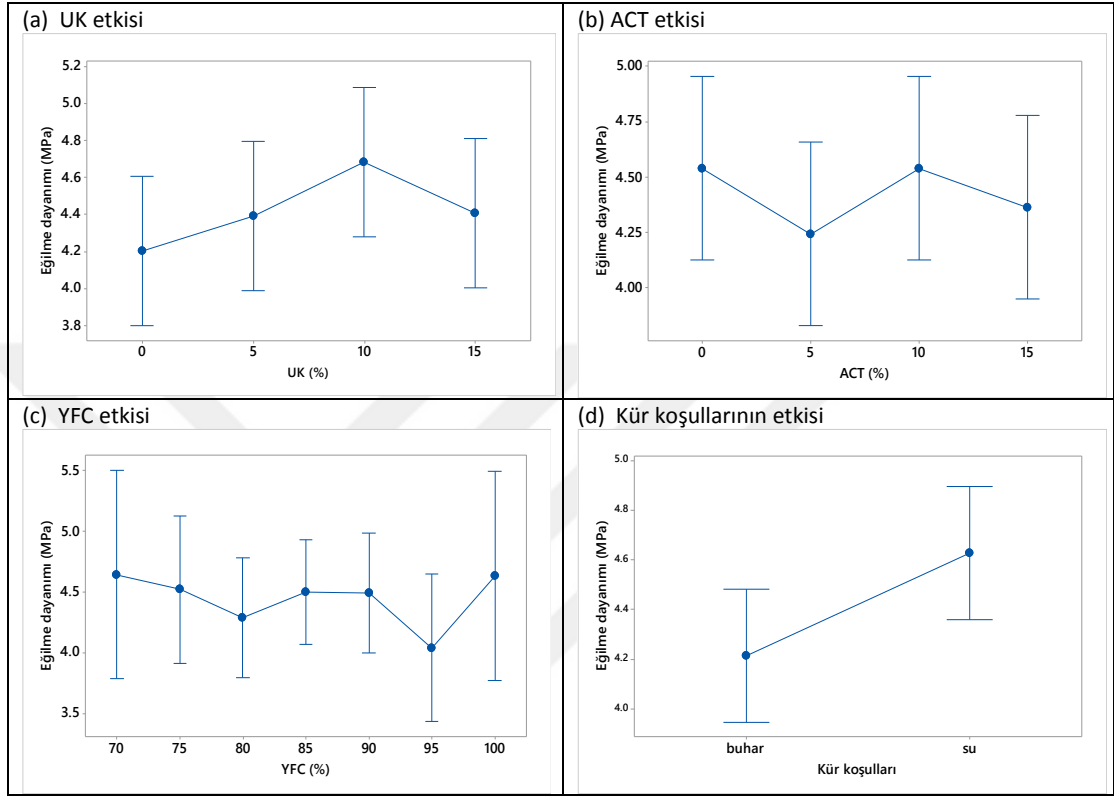
Şekil 4.90'da 1 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarında, UK ve ACT oranının artması sonucunda eğilme dayanımının azaldığı görülmektedir. Su kürü uygulanan GP karışımlarının daha yüksek eğilme dayanımı sağladığı da tespit edilmiştir. YFC oranının artması sonucunda eğilme dayanımı da artış göstermektedir.



Şekil 4.903 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımları

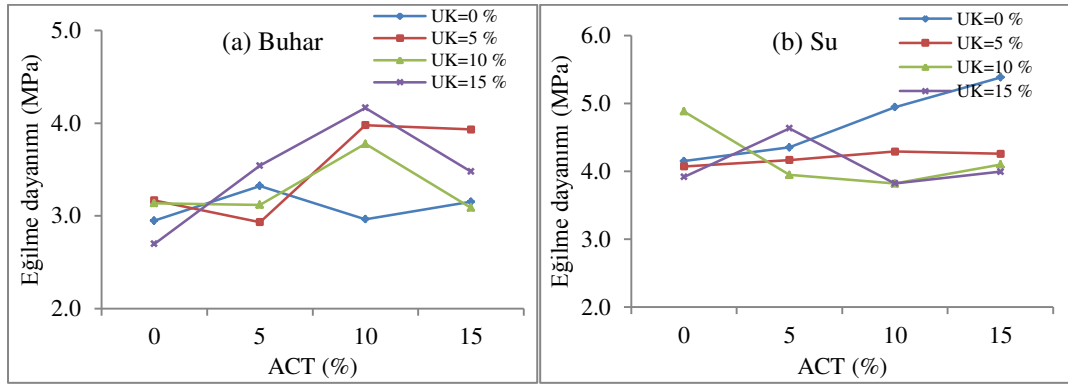
Şekil 4.90 (a)'da incelendiğinde 3 ay $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış GP karışımlarında %10'a kadar ACT oranındaki artış eğilme dayanımlarını

arttırmaktadır. %100 YFC'li GP karışımların eğilme dayanımı 5,10 MPa olarak gözlenmiştir. Şekil 4.90 (b)'de ACT oranının %10 UK oranının %15 olması durumunda 3 ay $MgSO_4$ etkisi sonucunda eğilme dayanımları artış göstermektedir.



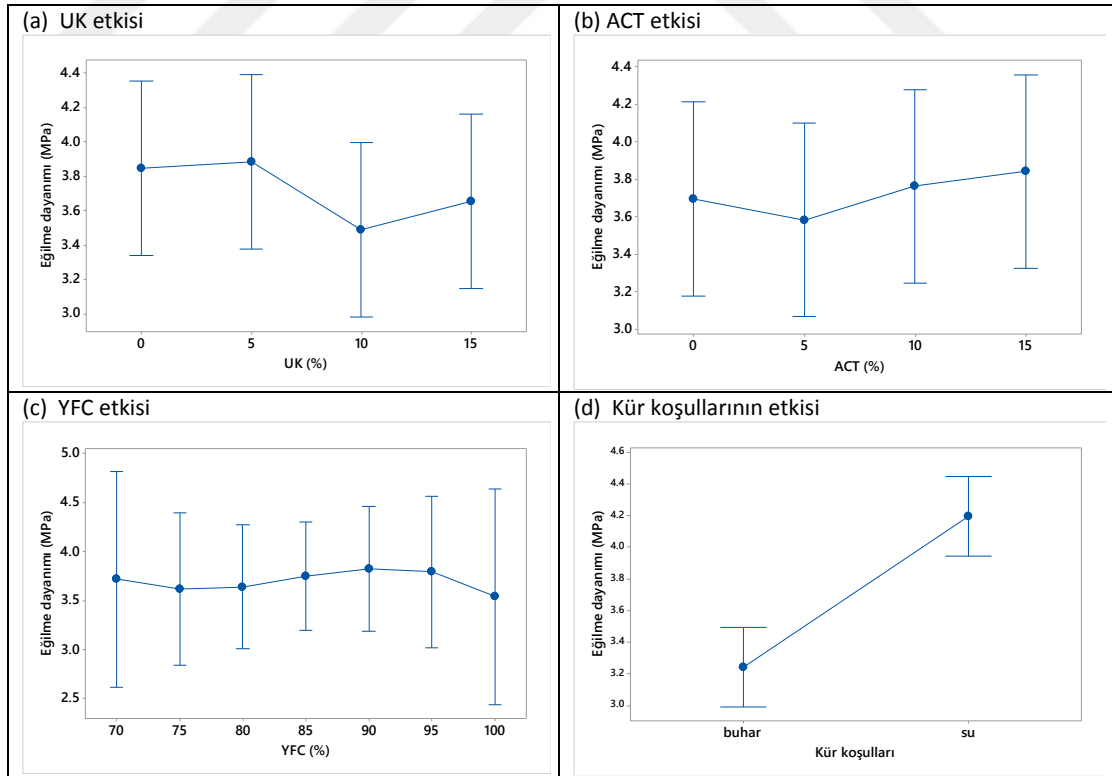
Şekil 4.913 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımı üzerindeki etkenler

Şekil 4.91'de 3 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarında, UK ve ACT oranlarındaki değişim eğilme dayanımlarında farklı değerler elde edilmesini sağlamıştır. ACT ve UK değerinin %10 olması durumunda eğilme dayanımı artarken %15 oranında ACT ve UK kullanımı eğilme dayanımlarını azaltmaktadır. Su kürü uygulanan GP karışımlarının daha yüksek eğilme dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir. YFC oranının %95 olması durumunda eğilme dayanımı 3,50 MPa değerinin altına düşebilmektedir.



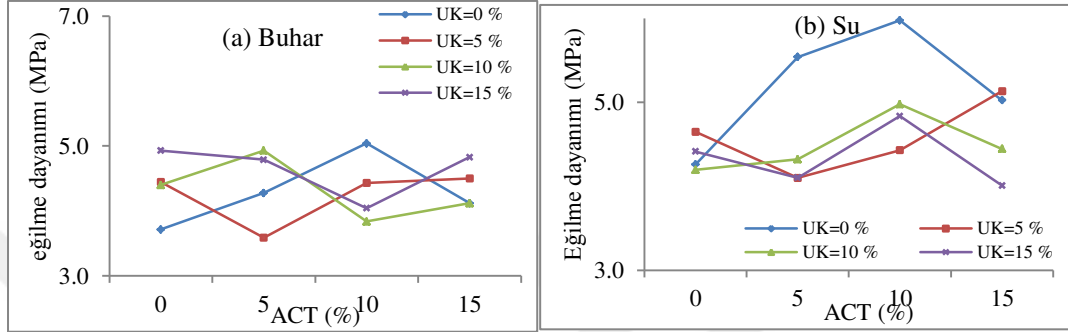
Şekil 4.926 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımları

Şekil 4.92 (a)'da incelendiğinde 6 ay $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış GP karışımlarında %10'a kadar ACT oranındaki artış eğilmedayanımlarını genellikle arttırmaktadır. %15 UK ve %10 ACT esaslı GP karışımların eğilme dayanımı 4,10 MPa olarak gözlenmiştir. Şekil 4.90 (b)'de UK kullanılmadan sadece ACT oranındaki artış ile eğilme dayanımlarında artışlar elde edilmiştir.



Şekil 4.936 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımı üzerindeki etkenler

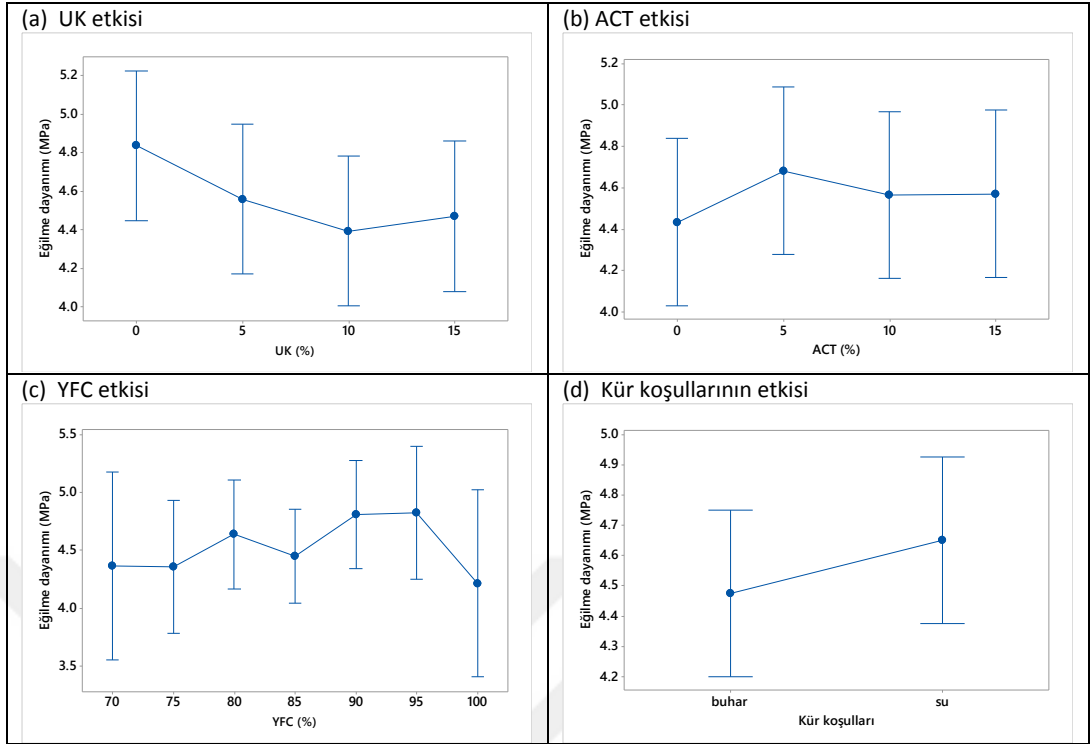
Şekil 4.93’de 6 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarında, UK ve ACT oranlarındaki değişim eğilme dayanımlarında farklı değerler elde edilmesini sağlamıştır. UK oranının %10 ve 15 olması durumunda eğilme dayanımı azalırken, ACT oranındaki artış ile birlikte eğilme dayanımı artmaktadır. Su kürü uygulanan GP karışımlarının daha yüksek eğilme dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir.



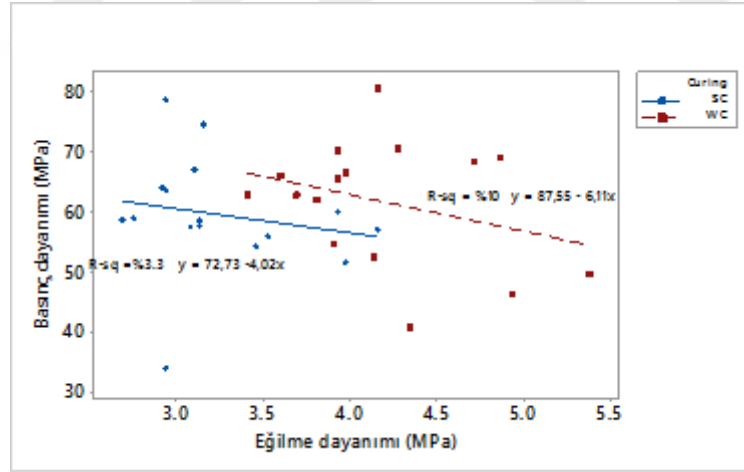
Şekil 4.94 9 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımları

Şekil 4.94 (a)’da incelendiğinde 9 ay $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış GP karışımlarında ACT ve UK oranındaki değişimler eğilme dayanımı üzerinde oldukça farklı sonuçlar ortaya koymuştur. %0 UK ve %10 ACT esaslı GP karışımların eğilme dayanımı 5,00 MPa olarak gözlenmiştir. Şekil 4.94 (b)’de UK kullanılmadan sadece %5 ve 10 oranında ACT kullanımı ile eğilme dayanımlarında artışlar elde edilmiştir.

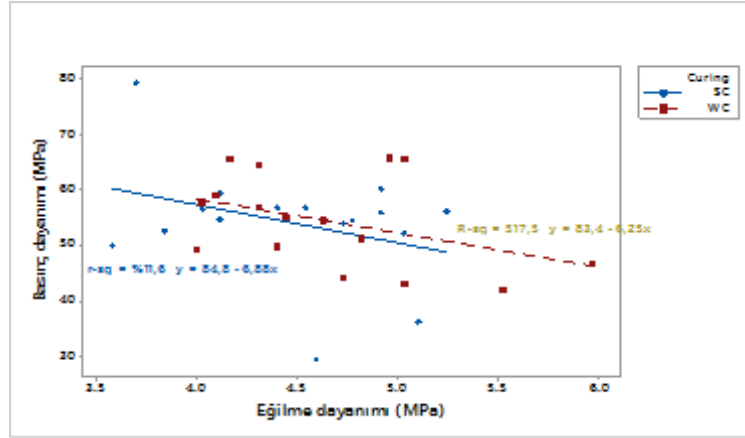
Şekil 4.95’de 9 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarında, UK ve ACT oranlarındaki değişim eğilme dayanımlarında farklı değerler elde edilmesini sağlamıştır. UK oranındaki artış sonucunda eğilme dayanımı azalırken, ACT oranındaki artış ile birlikte eğilme dayanımları nispeten artmaktadır. Su kürü uygulanan GP karışımlarının daha yüksek eğilme dayanımı gösterdiği tespit edilmiş ancak bu fark ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır.



Şekil 4.959 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımı üzerindeki etkenler



Şekil 4.966 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımı- basınç dayanımı arasındaki ilişki

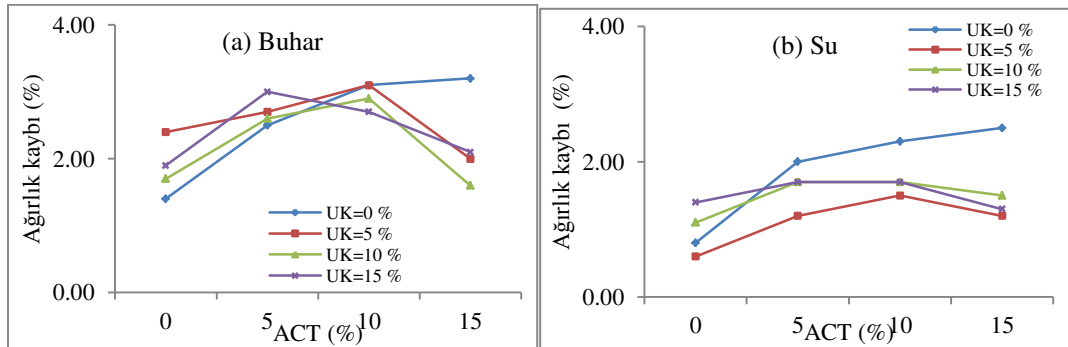


Şekil 4.97 9 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının eğilme dayanımı- basınç dayanımı arasındaki ilişki

Şekil 4.96 ve Şekil 4.97’de incelendiğinde genellikle basınç dayanımı arttığında eğilme dayanımı azalmaktadır. Ancak eğilme-basınç dayanımı arasındaki R^2 değerinin düşük olduğu da unutulmamalıdır.

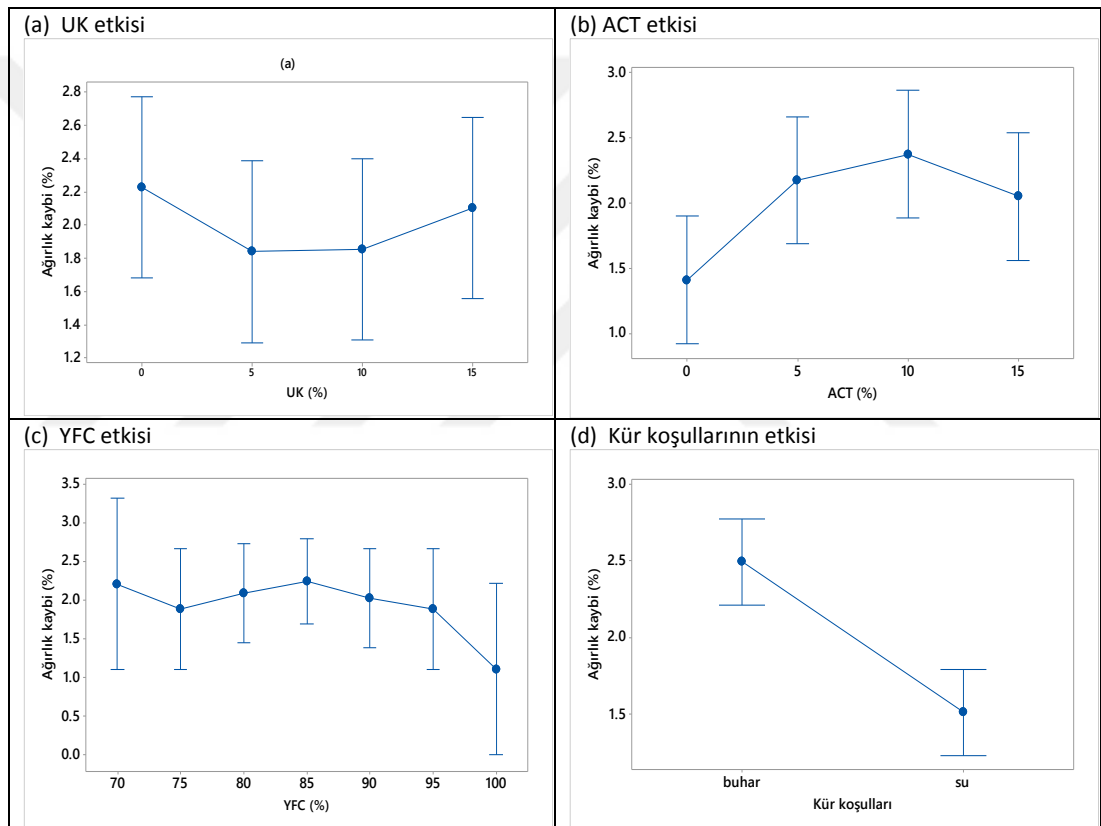
4.7.3. $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının Ağırlık Kaybı Deneyi Sonuçları

$MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybını ölçmek için zamana bağlı testler yapılmıştır. Numunelerin $MgSO_4$ etkisine maruz kalmadan önce, numunelerin ağırlıkları ölçülmüştür. Numuneler fırında $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de kurutulduktan sonra, oda sıcaklığında doğal bir şekilde soğumaya bırakılmış ve ağırlıkları tekrar ölçülmüştür. GP karışımlarının $MgSO_4$ etkisine maruz kaldıktan sonraki ağırlık kayıpları Şekil 4.98-Şekil 4.109 arasında verilmiştir.



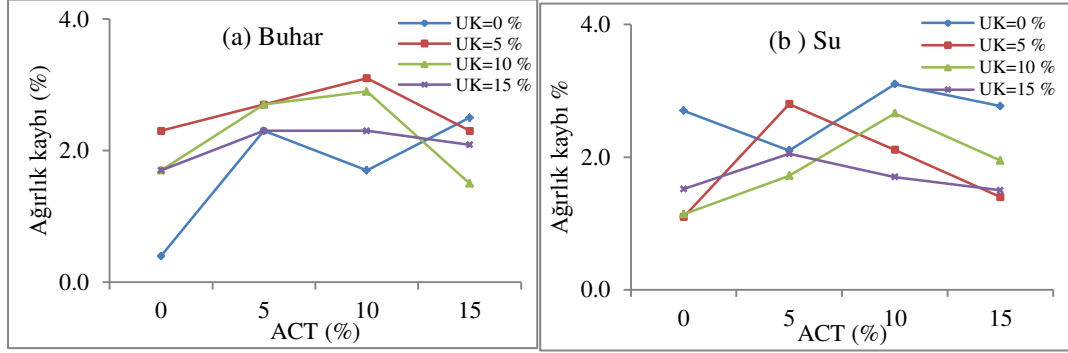
Şekil 4.98 9 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının ağırlık kayıpları

Şekil 4.98 (a)'da incelendiğinde 1 ay $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış GP karışımlarında %5 ve 10 ACT kullanılması durumunda ağırlık artışı artarken %15 ACT kullanımında ağırlık artışı azalmaktadır. Şekil 4.98 (b)'de incelendiğinde buhar kürüne benzer sonuçlar elde edilmiştir. GP karışımlarında %5 ve 10 ACT kullanılması durumunda ağırlık artışı artarken %15 ACT kullanımında ağırlık artışı nispeten azalmaktadır. GP Karışımlarında ağırlık kaybı oluşmazken harçların ağırlıklarında artışlar elde edilmiştir.



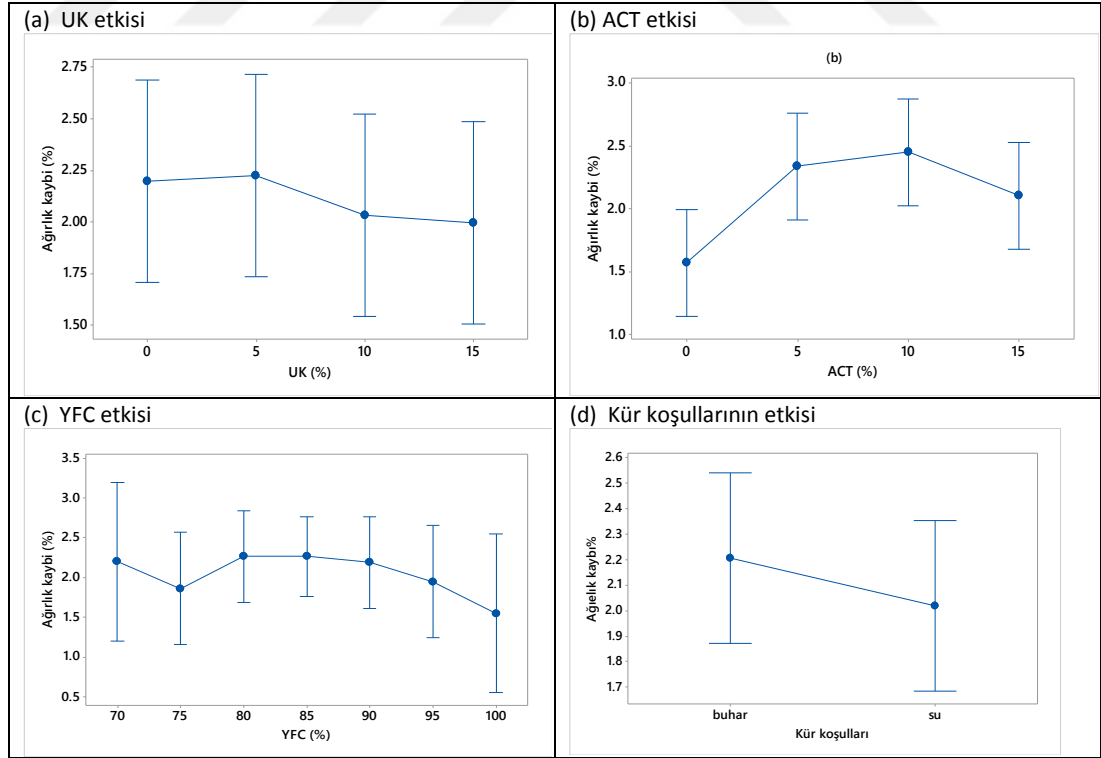
Şekil 4.99 1 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybı üzerindeki etkenler

Şekil 4.99'da incelendiğinde 1 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarında, UK oranı arttıkça ağırlık artışı azalırken, ACT oranının artması sonucunda ağırlık artışı artmaktadır. Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının daha çok ağırlık artışına uğradığı gözlenmiştir. Ayrıca YFC oranındaki artış ile birlikte ağırlık artışı da nispeten azalmaktadır. %100 YFC'li karışımlarda fazla ağırlık artışı oluşmamıştır.



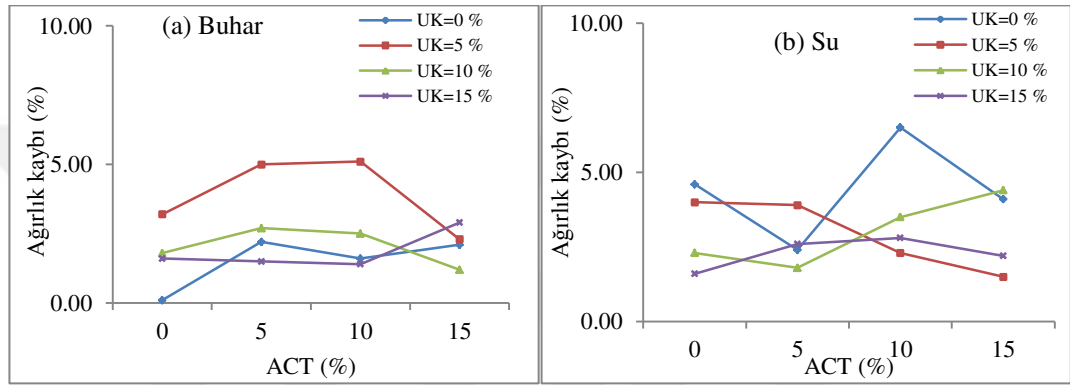
Şekil 4.1003 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının ağırlık kayıpları

Şekil 4.100 (a)'da incelendiğinde 3 ay $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış GP karışımlarında % 15 ACT kullanılması durumunda ağırlık artışı genellikle azalmaktadır. Özellikle %10 UK ve %15 ACT kullanımı ağırlık artışı değerini %1,5'a kadar düşürmektedir. Şekil 4.100 (b)'de görüldüğü GP karışımlarında %15 ACT kullanılması durumunda ağırlık artışı azalmaktadır.



Şekil 4.1013 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybı üzerindeki etkenler

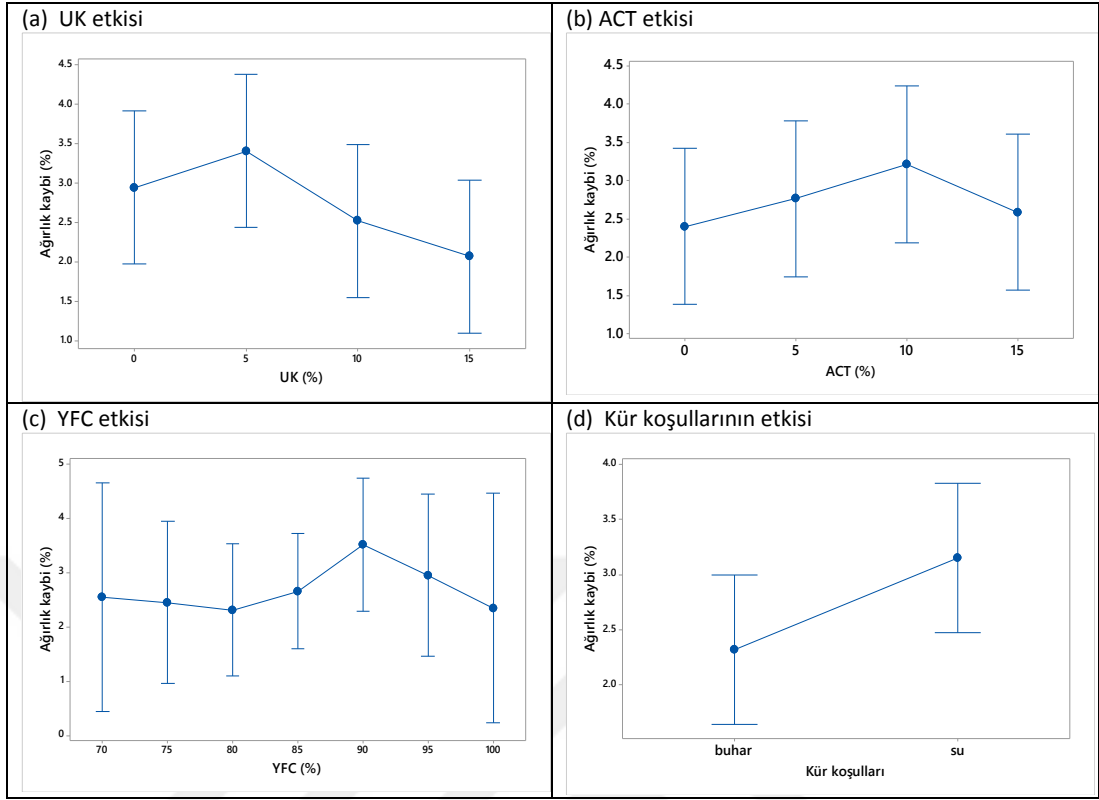
Şekil 4.101’de incelendiğinde 3 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarında, UK oranı arttıkça ağırlık artışı azalırken, ACT oranının artması sonucunda ağırlık artışı daha fazla olmaktadır. %15 ACT kullanımında ağırlık artışı yaklaşık %2 olmaktadır. Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının daha çok ağırlık artışına uğradığı gözlenmiştir. Ayrıca YFC oranındaki artış ile birlikte ağırlık artışı da azalmaktadır. Özellikle %100 YFC’li karışımlarda ağırlık artışı yaklaşık %0,5 olmuştur.



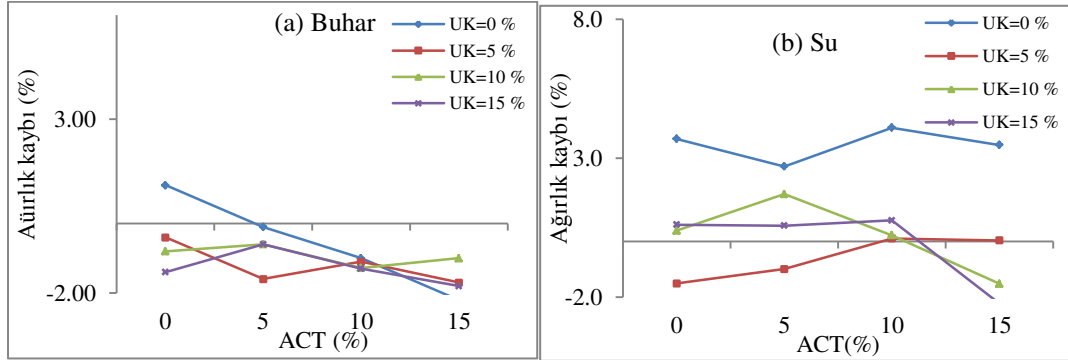
Şekil 4.1026 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının ağırlık kayıpları

Şekil 4.102 (a)’da incelendiğinde 6 ay $MgSO_4$ etkisine maruz buhar kürü uygulanmış GP karışımlarında % 5 UK kullanılması durumunda ağırlık artışı oranı oldukça artmaktadır. %5 UK ve %15 ACT kullanımı ağırlık artışı değerini %2,3’e kadar düşürmektedir. Şekil 4.100 (b)’de görüldüğü GP karışımlarında %15 ACT kullanılması durumunda ağırlık artışı oranı genellikle azalmaktadır (%10’a göre). %15 ACT ve % UK esaslı GP karışımlarının ağırlık artışı %1,5 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.103’de incelendiğinde 6 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarında, UK oranı arttıkça ağırlık artışı azalırken, ACT oranının %10’a kadar artması sonucunda ağırlık artışı daha fazla olmaktadır. %15 ACT kullanımında ağırlık artışı yaklaşık %2,5 olmaktadır. Buhar kürü uygulanan GP karışımlarının daha çok ağırlık artışına uğradığı gözlenmiştir. %80 YFC kullanımına kadar ağırlık artışı azalırken bu orandan sonra ağırlık artışları nispeten artmaktadır.

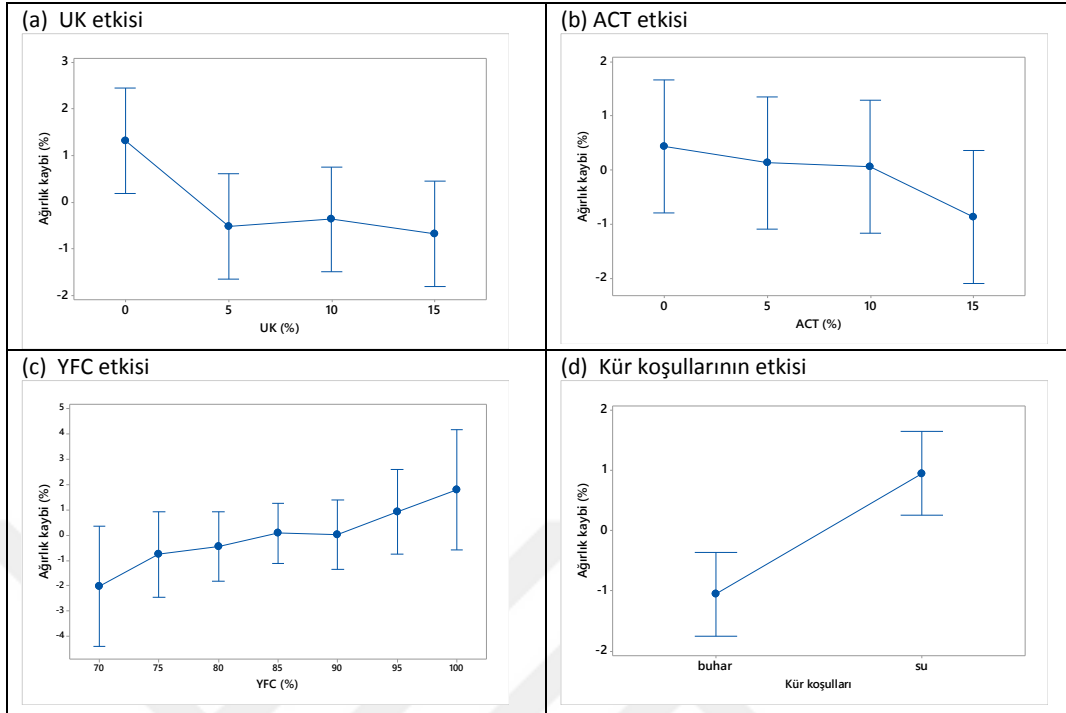


Şekil 4.1036 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybı üzerindeki etkenler



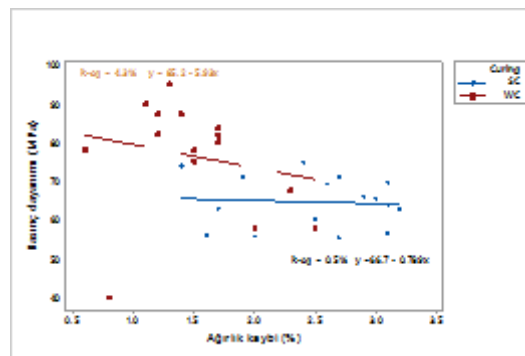
Şekil 4.1049 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisine maruz GP karışımlarının ağırlık kayıpları

Şekil 4.104 (a)'da incelendiğinde 9 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarında ancak ağırlık kaybı oluşmuştur. Genellikle 515 oranında ACT kullanımı ağırlık kayıplarını arttırmıştır. %5 UK ve ACT kullanımında da ağırlık kaybı yaklaşık %2 olmuştur. Şekil 4.104 (b)'de incelendiğinde %15 ACT ve %10-15 UK kullanılması durumunda ağırlık kayıpları artış göstermektedir. Sadece ACT kullanılan GP karışımlarında ağırlık kaybı gözlenmemiştir.



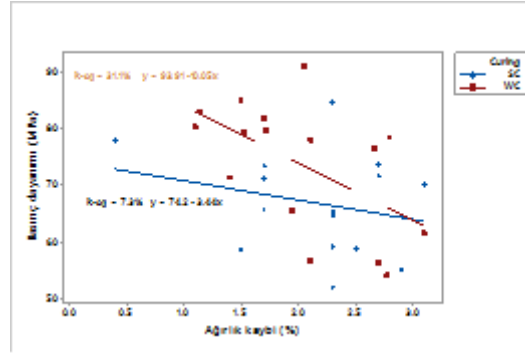
Şekil 4.1059 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybı üzerindeki etkenler

Şekil 4.105’de incelendiğinde UK ve ACT oranındaki artış ile birlikte ağırlık kaybı da artmaktadır. Bu yüzden $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarında %100 YFC’li karışımlar ağırlık kaybı açısından daha olumlu sonuçlar sağlamıştır. Su kuru uygulanan GP karışımlarında da ağırlık kaybından çok ağırlık artışı gözlenmiştir.



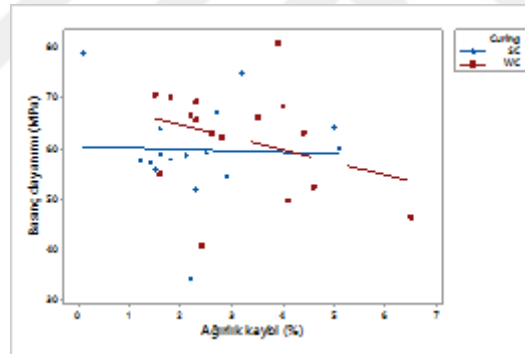
Şekil 4.1061 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybı- basınç dayanımı arasındaki ilişki

Şekil 4.106’da incelendiğinde 1 ay $MgSO_4$ etkisine maruz hem su hem de buhar kuru uygulanan GP karışımlarında ağırlık kaybı oluşmamıştır. Basınç dayanımı ve ağırlık değişimi arasında ise negatif ve zayıf korelasyon elde edilmiştir.



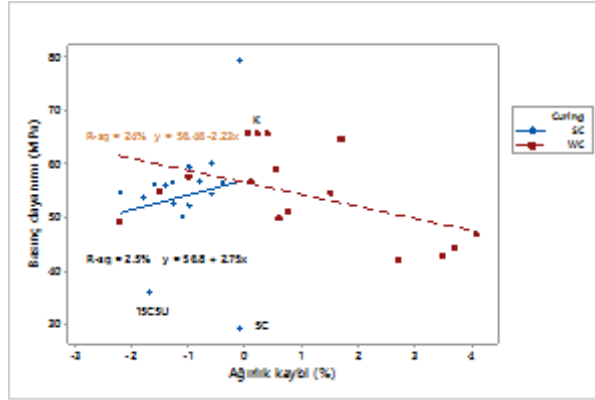
Şekil 4.1073 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybı- basınç dayanımı arasındaki ilişki

Şekil 4.107’de incelendiğinde 3 ay $MgSO_4$ etkisine maruz hem su hem de buhar kürü uygulanan GP karışımlarında ağırlık kaybı oluşmamıştır. Basınç dayanımı ve ağırlık değişimi arasında ise negatif ve zayıf korelasyon elde edilmiştir.



Şekil 4.1086 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybı- basınç dayanımı arasındaki ilişki

Şekil 4.108’de incelendiğinde 6 ay $MgSO_4$ etkisine maruz hem su hem de buhar kürü uygulanan GP karışımlarında ağırlık kaybı oluşmamıştır. Basınç dayanımı ve ağırlık değişimi arasında ise negatif ve zayıf korelasyon elde edilmiştir.



Şekil 4.1099 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarının ağırlık kaybı- basınç dayanımı arasındaki ilişki

Şekil 4.109'da incelendiğinde 9 ay $MgSO_4$ etkisine maruz hem su hem de buhar kürü uygulanan GP karışımlarında ağırlık kaybı oluşmuştur. Su kürü uygulanan GP karışımlarında negatif ve zayıf korelasyon elde edilirken, buhar kürü uygulanan GP karışımlarında pozitif ve zayıf korelasyon elde edilmiştir.

$MgSO_4$ çözeltisi konsantrasyonu %10 olmasına rağmen, harç örneklerinin ağırlığı ilk değerlere oranla %3'ten fazla değişmemektedir. Numunelerdeki ağırlık artışı, muhtemelen, 50 °C'de 7 gün boyunca etüvde gerçekleştirilen kurutma işleminden sonra çözeltinin katı maddesinin kalmasından dolayı kaynaklanmaktadır. Ayrıca, $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen GP karışımlarında ağırlık kaybının beklenenden az olması, harç numunelerinin sülfat etkisinden etkilenmediğini göstermektedir. Bu nedenle, bu çalışmada test edilen GP karışımlarının sülfata dayanıklı olduğu düşünülmektedir. Geopolimerizasyonun ana ürünü hidratasyon ürünlerinde olduğu gibi sülfat etkisine duyarlı değildir. Geopolimerizasyonun ana ürünlerinde kalsiyum hidroksit, alçı taşı ve etrenjit oluşmaması ve düşük kalsiyumlu uçucu kül kullanılması sonucunda sülfat etkisi reaksiyonları oluşmamaktadır.

4.7.4. GP Numunelerindeki Görsel Hasar Tespiti

Şekil 4.110'da, $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilmiş, (kurutma öncesi ve sonrası) GP karışımlarının yüzeyleri görülmektedir. $MgSO_4$ çözeltisinde altı ay boyunca bekletilen numunelerin görsel görünümü, çözeltiye daldırılmamış numunelerin

görünümü ile kıyaslandığında, bir miktar benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte, numuneler yakından incelendiğinde, küçük beyaz lekeler dışında yüzeyde herhangi bir görsel hasar, erozyon ve çatlama tespit edilmemiştir.



Şekil 4.110 WC ve SC için daldırılmış $MgSO_4$ ağırlık kaybı

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Basınç ve Eğilme Dayanımı Sonuçları

Buhar ve su kürü uygulanan numunelerin basınç ve eğilme dayanımları için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Buhar kürü su kürü uygulanan numunelere göre daha yüksek mekanik dayanım değerleri sağlamış, hızlandırılmış kür yöntemi basınç ve eğilme dayanımına olumlu katkı sağlamıştır.
- YFC ve ACT'nun birlikte kullanıldığı karışımlarda su kürünün etkili olmadığı, bu tip karışımlarda buhar kürü gibi daha etkin olan ısıtma işlemi ihtiyaç duyulduğu görülmüştür.
- YFC ve UK karışımlarında her iki kür yönteminin de uygun olduğu, özellikle su küründe UK'ün ACT'na göre daha yüksek dayanım değerleri verdiği belirlenmiştir.
- Buhar ve su kürü uygulaması numunelerin eğilme dayanımı değerlerini önemli ölçüde arttırmıştır.
- Su ve buhar kürü uygulanan numunelerin basınç ve eğilme dayanım değerleri arasında genellikle doğrusal korelasyon gözlenmiştir.

5.2. Sülfat ($MgSO_4$) Etkisi

$MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen numuneler için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- 6 ay boyunca $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen numunelerin görsel görünümü ile referans numunelerin görünümü arasında benzerlikler görülmüştür. Numuneler yakından incelendiğinde, küçük beyaz lekeler dışında yüzeyde herhangi bir görsel hasar (erozyon ve çatlak gibi) tespit edilmemiştir.

- YFC ve ACT esaslı numunelerin mekanik özelliklerinin $MgSO_4$ 'den olumsuz etkilendiği, bunun daha çok ACT'den kaynaklandığı düşünülmektedir.
- YFC ve UK esaslı karışımlarda erken yaşlarda $MgSO_4$ 'ın basınç dayanımlarını arttırdığı, ilerleyen süreçte ise basınç dayanımlarını azalttığı görülmüştür.
- Su kürü uygulanmasının $MgSO_4$ etkisine maruz kalan numunelerde daha etkili olduğu görülmüştür.
- 9 ay $MgSO_4$ etkisine maruz GP karışımlarında hem su hem de buhar kürü uygulanmış numunelerde ağırlık kaybı olduğu gözlenmiştir. Su ve buhar kürü uygulanan GP karışımlarında zayıf korelasyon değerleri elde edilmiştir.
- Deneysel çalışma kapsamında üretilen GP karışımlarının $MgSO_4$ etkisine dayanıklı olduğu tespit edilmiştir.

5.3. Donma Çözülme Etkisi

GP karışımlarının donma-çözülme dayanıklılığına ait sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- Buhar kürü uygulanan numunelerde 150 çevrimden sonra gözle görülebilir herhangi bir hasar veya deformasyon gözlenmemiştir.
- YFC ve ACT kullanılarak elde edilen ikili karışımların 150 çevrimden sonra en yüksek ağırlık kaybına uğradığı belirlenmiştir.
- 150 çevim sonrası su kürü uygulanan YFC ve ACT katkılı karışımların basınç dayanımı kaybı değerlerinin diğer karışımlara göre daha yüksek olduğu, buhar kürü uygulanan ACT katkılı numunelerde basınç dayanımlarında oluşan kayıpları belirlenmiştir.

5.4. Kuruma Büzülmesi

- Numunelerdetoz içeriğinin yüksek olması nedeniyle (düşük agrega/bağlayıcı oranı) su kürü uygulaması kuruma büzülmesini biraz daha arttırmaktadır. Ancak su ve buhar kürleri arasında kuruma büzülmesi açısından çok büyük farklar gözlenmemiştir.
- Buhar kürü uygulanan numunelerin kuruma büzülmesi değerleri, basınç dayanımı ile benzerlik göstermektedir ancak basınç dayanımındaki gelişim hızı ile aynı oranda değildir. Kuruma büzülmesi değerlerinin 50 gün sonunda sabit kaldığı görülmüştür. Ayrıca, su kürü uygulanmış numunelerin kuruma büzülmesi değerleri, basınç dayanımı gelişiminden daha hızlı olmakta ve 10 gün sonunda sabit bir değere ulaşmaktadır.

5.5. Kapilerite ve Su Emme

- Su kürü uygulanan numunelerin kapiler su emme oranları, buhar kürü uygulanmış numunelere göre daha düşük olmaktadır.
- UK ve ACT miktarının artması sonucunda su emme oranı da artmaktadır.
- Kür yöntemlerindeki farklılıklar, su emme ile basınç dayanımı arasında belirgin bir değişikliğe yol açmamaktadır. Su emme oranını etkileyen ana parametre malzeme oranlarındaki değişikliklerdir.

5.6. Öneriler

Bu çalışma sonucunda daha sonraki çalışmalarafayda sağlayabilecek hususlar maddeler halinde aşağıda sunulmuştur.

- GP karışımları için farklı özellikteki aktivatörler ve bağlayıcılar kullanılarak daha detaylı araştırmalar yapılabilir.
- Geopolimer matriste, diatomit, zeolit, bentonit, nano malzemeler kullanılabilir.
- Nükleer manyetik rezonans (NMR) ve Fourier Transform Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) gibi moleküler ve mikroyapısal teknikler kullanılarak numunelerin özellikleri daha detaylı analiz edilebilir.
- Yapılan bu çalışmalar geopolimer beton uygulamalarına yönelik olarak geliştirilebilir.
- Özellikle prefabrik yapı elemanlarının üretimine yönelik olarak yapılacak çalışmalar, bu sektördeki mevcut çalışmalara önemli katkı sağlayabilir.
- Fore kazık vb. zemin uygulamaları için de farklı uygulamalar geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdulkareem, O. A., & Ramli, M, (2015). Optimization of Alkaline Activator Mixing and Curing Conditions for a Fly Ash-Based Geopolymer Paste System. *Modern Applied Science*; Vol. 9, No. 12.
- Al-Attas, S. M. N. (2014). *Prolegomena to the Metaphysics of Islam*. Penerbit UTM Press.
- Al-Majidi, M. H., Lampropoulos, A., Cundy, A., & Meikle, S. (2016). Development of Geopolymer Mortar under Ambient Temperature for in Situ Applications. *Construction and Building Materials*, 120, 198-211.
- ASTM C1437-15, (2015). "Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar", ASTM International.
- ASTM, C. 1437, (2015). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, 4.
- Atiş, C. D., Görür, E. B., Karahan, O., Bilim, C., Ilkentapar, S., & Luga, E. (2015). Very High Strength (120 MPa) Class F Fly Ash Geopolymer Mortar Activated at Different NaOH Amount, Heat Curing Temperature and Heat Curing Duration. *Construction and Building Materials*, 96, 673-678.
- Bakharev, T. (2005). Durability of Ggeopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1233-1246.
- Baščarević, Z., Komljenović, M., Miladinović, Z., Nikolić, V., Marjanović, N., & Petrović, R., (2015). Impact of Sodium Sulfate Solution on Mechanical Properties and Structure of Fly Ash Based Geopolymers. *Materials and Structures*, 48(3), 683-697.
- Bignozzi, M. C., Manzi, S., Natali, M. E., Rickard, W. D., & Van Riessen, A. (2014). Room Temperature Alkali Activation of Fly Ash: The Effect of Na₂O/SiO₂ Ratio. *Construction and Building Materials*, 69, 262-270.
- Bocullo, V., Vaičiukynienė, D., Vaitkevičius, V., & Kantautas, A. (2017). The Influence of the Silica/Sodium Ratio on the Fly Ash Geopolymer Binder. *Chemical Technology*, 68(1), 23-28.
- CEN., (2012). BS EN 450-1:(2012). Fly Ash for Concrete. Definition, Specifications.
- Davidovits, J. (2002). Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. In *Geopolymer 2002*

- Conference(Vol. 28, p. 29). Geopolymer Institute Saint-quentin (France), Melbourne (Australia).
- Deb, P. S., Nath, P., & Sarker, P. K. (2015). Drying Shrinkage of Slag Blended Fly Ash Geopolymer Concrete Cured at Room Temperature. *Procedia Engineering*, 125, 594-600.
- Degirmenci, F. N. (2017). Effect of Sodium Silicate to Sodium Hydroxide Ratios on Durability of Geopolymer Mortars Containing Natural and Artificial Pozzolans. *Ceram. Silikaty*, 61, 340-350.
- Dimas, D., Giannopoulou, I., & Papias, D. (2009). Polymerization in Sodium Silicate Solutions: a Fundamental Process in Geopolymerization Technology. *Journal of Materials Science*, 44(14), 3719-3730.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. (2007). Geopolymer Technology: the Current State of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917-2933.
- EN 15167-1 (2006). Ground Granulated Blast Furnace Slag for Use in Concrete, Mortar and Grout - Part 1: Definitions, Specifications and Conformity Criteria, European Committee for Standardization, Brussels .
- Fu, Y., Cai, L., & Yonggen, W. (2011). Freeze–Thaw Cycle Test and Damage Mechanics Models of Alkali-Activated Slag Concrete. *Construction and Building Materials*, 25(7), 3144-3148.
- He, Z., Zhong, C., Su, S., Xu, M., Wu, H., & Cao, Y. (2012). Enhanced Power-Conversion Efficiency in Polymer Solar Cells Using an Inverted Device Structure. *Nature photonics*, 6(9), 591.
- Hossain, M. U., Poon, C. S., Dong, Y. H., & Xuan, D. (2018). Evaluation of Environmental Impact Distribution Methods for Supplementary Cementitious Materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 597-608.
- Huseien, G. F., Ismail, M., Khalid, N. H. A., Hussin, M. W., & Mirza, J. (2018). Compressive Strength and Microstructure of Assorted Wastes Incorporated Geopolymer Mortars: Effect of Solution Molarity. *Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 3375-3386.
- IEA, (2009). Cement Technology Roadmap 2009. International Energy Agency
- Jamshidi, A., Kurumisawa, K., Nawa, T., & Hamzah, M. O. (2015). Analysis of Structural Performance and Sustainability of Airport Concrete Pavements Incorporating Blast Furnace Slag. *Journal of Cleaner Production*, 90, 195-210.
- Khater H.M., (2013). Studying the Effect of Thermal and Acid Exposure on Alkali Activated Slag Geopolymer. *Adv Cem Res*; 26:1–9.

- Kupaei, R. H., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. B. (2013). A Review on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 13(1).
- Lee, N. K., Jang, J. G., & Lee, H. K. (2014). Shrinkage Characteristics of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Paste and Mortar at Early Ages. *Cement and Concrete Composites*, 53, 239-248.
- Liu, J., Zhang, S., & Wagner, F. (2018). Exploring the Driving Forces of Energy Consumption and Environmental Pollution in China's Cement Industry at the Provincial Level. *Journal of Cleaner Production*, 184, 274-285.
- Luga, E., Atis, C. D., Karahan, O., Ilkentapar, S., & Gorur, E. B. (2017). Strength Properties of Slag/Fly Ash Blends Activated with Sodium Metasilicate. *Grđevinar*, 69(03.), 199-205.
- Ma, Y. (2013). Microstructure and Engineering Properties of Alkali Activated Fly Ash-as an Environment Friendly Alternative to Portland Cement.
- Maddalena, R., Roberts, J. J., & Hamilton, A. (2018). Can Portland Cement be Replaced by Low-Carbon Alternative Materials? A Study on the Thermal Properties and Carbon Emissions of Innovative Cements. *Journal of Cleaner Production*, 186, 933-942.
- Madloul, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., & Rahim, N. A. (2011). A Critical Review on Energy Use and Savings in the Cement Industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2042-2060.
- Malagavelli, V., & Rao, P. N. (2010). High Performance Concrete with GGBS and ROBO Sand. *International journal of Engineering Science and Technology*, 2(10), 5107- 5113.
- Mehta, P. K., (2004). High-performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development. In *Proceedings of the international workshop on sustainable development and concrete technology* (pp. 3-14). Ames, IA, USA: Iowa State University.
- Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., & Horvath, A. (2018). Carbon Dioxide Reduction Potential in the Global Cement Industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, 114, 115-124.
- Mittal, A., Kaisare, M. B., & Shetti, R. (2017). Experimental Study on Use of Fly Ash in Concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, e-ISSN: 2395-0056
- Monteiro, P.J.M., Miller, S.A., Horvath, A., (2017). Towards Sustainable Concrete. *Nat. Mater.* 16 (7), 698-699.

- Nasr, D., Pakshir, A. H., & Ghayour, H. (2018). The Influence of Curing Conditions and Alkaline Activator Concentration on Elevated Temperature Behavior of Alkali Activated Slag (AAS) Mortars. *Construction and Building Materials* 190 (2018) 108–119.
- Neupane, K. (2016). Fly Ash and GGBFS Based Powder-Activated Geopolymer Binders: A Viable Sustainable Alternative of Portland Cement in Concrete Industry. *Mechanics of Materials*, 103, 110-122.
- Omer, S. A., Demirboga, R., & Khushefati, W. H. (2015). Relationship between Compressive Strength and UPV of GGBFS Based Geopolymer Mortars Exposed to Elevated Temperatures. *Construction and Building Materials*, 94, 189-195.
- Ozbay, E., Erdemir, M., & Durmuş, H. İ. (2016). Utilization and Efficiency of Ground Granulated Blast Furnace Slag on Concrete Properties—A Review. *Construction and Building Materials*, 105, 423-434.
- P.C. Aitcin, *Science and Technology of Concrete Admixtures*, in: P.C. Aitcin.
- Patankar, S. V., Ghugal, Y. M., & Jamkar, S. S. (2014). Effect of Concentration of Sodium Hydroxide and Degree of Heat Curing on Fly Ash-Based Geopolymer Mortar. *Indian Journal of Materials Science*.
- Ponikiewski, T., & Gołaszewski, J. (2014). The Effect of High-Calcium Fly Ash on Selected Properties of Self-Compacting Concrete. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14(3), 455-465.
- Provis, J.L. and J.S.J. van Deventer, (2007) Direct Measurement of the Kinetics of Geopolymerisation by In-Situ Energy Dispersive X-ray Diffractometry. *Journal of Materials Science*. 42(9): p. 2974-2981.
- Qureshi, M. N., & Ghosh, S. (2014). Effect of Silicate Content on the Properties of Alkali-Activated Blast Furnace Slag Paste. *Arab J Sci Eng* (2014) 39:5905–5916.
- Qureshi, M. N., & Ghosh, S. (2013). Alkali-Activated Blast Furnace Slag as a Green Construction Material. *IOSR–JMCE*, 24-28.
- Revathi, V., Saravanakumar, R., & Thaarrini, J. (2014). Effect of molar ratio of $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio and curing mode on the compressive strength of ground bottom ash geopolymer mortar. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 7, 1511-1516.
- Roy, D. M. (1987). Hydration of Blended Cements Containing Slag, Fly Ash, or Silica Fume. Lecture Presented to the Institute of Concrete Technology, London.

- Samad, S., & Shah, A. (2017). Role of Binary Cement Including Supplementary Cementitious Material (SCM), in Production of Environmentally Sustainable Concrete: A Critical Review. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 663-674.
- Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., & Maity, S. (2018). Calcined Clay Limestone Cements (LC3). *Cement and Concrete Research*, 114, 49-56.
- Shafigh P, Jumaat MZ, Mahmud H, Alengaram UJ.(2013). Oil Palm Shell Lightweight Concrete Containing High Volume Ground Granulated Blast Furnace Slag. *Constr Build Mater* ;40:231–8.
- Shaikh, F. U. (2014). Effects of Alkali Solutions on Corrosion Durability of Geopolymer Concrete. *Advances in Concrete Construction*, 2(2), 109-123.
- Shen, W., Wang, Y., Zhang, T., Zhou, M., Li, J., & Cui, X. (2011). Magnesia Modification of Alkali-Activated Slag Fly Ash Cement. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 26(1), 121-125.
- Shi, C., D. Roy, and P. Krivenko, (2003). *Alkali-Activated Cements and Concretes*: CRC press.
- Siddique, R., & Khan, M. I. (2011). *Supplementary Cementing Materials*. Springer Science & Business Media.
- Song Mu., et al., (2018). Property and Microstructure of Waterborne Self-Setting Geopolymer Coating: Optimization Effect of SiO₂/Na₂O Molar Ratio. *Journal of Minerals Science*.
- Sumesh, M., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Mo, K. H., & Alnahhal, M. F. (2017). Incorporation of Nano-Materials in Cement Composite and Geopolymer Based Paste and Mortar—A Review. *Construction and Building Materials*, 148, 62-84.
- Sun, P. and H.-C. Wu, (2013). Chemical and Freeze–Thaw Resistance of Fly Ash-Based Inorganic Mortars. *Fuel*. 111: p. 740-745.
- Tang, Z., Li, W., Hu, Y., Zhou, J. L., & Tam, V. W. (2019). Review on Designs and Properties of Multifunctional Alkali-Activated Materials (AAMs). *Construction and Building Materials*, 200, 474-489.
- Temuujin, J., Minjigmaa, A., Davaabal, B., Bayarzul, U., Ankhtuya, A., Jadambaa, T., & MacKenzie, K. J. D., (2014). Utilization of Radioactive High-calcium Mongolian Fly Ash for the Preparation of Alkali-Activated Geopolymers for Safe Use as Construction Materials. *Ceramics International*, 40(10), 16475-16483.

- Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (2015). Waste Glass in the Geopolymer Preparation. Mechanical and Microstructural Characterisation. *Journal of Cleaner Production*, 90, 397-408.
- TS EN 1008, (2003). Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su da Dahil Olmak Üzere Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-1 (2012). Çimento Deney Metodları – Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN, B. (2012). 450-1, Fly Ash for Concrete—Definition, Specifications and Conformity Criteria. Turkish Standard Institution.
- UNEP, (2018). Sustainable, <https://www.unenvironment.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/cities/sustainable>
- Van Oss, H.G., 2017. Mineral Commodity Summaries: Cement. US Geological Survey.
- Wallah, S., & Rangan, B. V. (2006). Low-calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties.
- Wardhono, A., Gunasekara, C., Law, D. W., & Setunge, S. (2017). Comparison of Long Term Performance Between Alkali Activated Slag and Fly Ash Geopolymer Concretes. *Construction and Building Materials*, 143, 272-279.
- Wardhono, A., Law, D. W., & Strano, A. (2015). The Strength of Alkali-Activated Slag/Fly Ash Mortar Blends at Ambient Temperature. *Procedia Engineering*, 125, 650-656.
- Xiem Nguyen Thang, (2016). Influence of Curing and Water to the Mechanical Properties of Geopolymer Mortar. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* ISSN: 2278-0181.
- Xu, A., & Shayan, A. (2016). Effect of Activator and Water to Binder Ratios on Setting and Strength of Geopolymer Concrete. In *ARRB Conference*, 27th, 2016, Melbourne, Victoria, Australia.
- Zerfu, K. E. F. I. Y. A. L. E. W., & Ekaputri, J. J. (2016). Review on Alkali-activated Fly Ash Based Geopolymer Concrete. In *Materials Science Forum* (Vol. 841, pp. 162-169). Trans Tech Publications.
- Zhang, S., Ren, H., Zhou, W., Yu, Y., & Chen, C. (2018). Assessing Air Pollution Abatement Co-Benefits of Energy Efficiency Improvement In Cement Industry: A City Level Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 185, 761-771.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Abdoslam Abdallaa ALNKA
Doğum Yeri ve Yılı : 21.10. 1965 Yefren-Libya
Medeni Hali : Evli
Yabancı dil : Arapça, İngilizce ve Türkçe
E-posta : nankaa@rocketmail.com



EĞİTİM DURUMU

Lise : 28 march Yefren/Libya
Lisans : Triboli university/ Libya
Yüksek Lisans : Trablus Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği

YAYINLAR VE KONFERANS

Yaprak Hasbi, Alnkaa Abdoslam, Memiş Selçuk, Kaplan Gökhan (2018). The Effects of Steam Curing Time on the Geopolymer Mortar. ICELIS 2018, 224-224. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4307985)

Abdoslam Alnkaa, Hasbi Yaprak, Selçuk Memiş, Gökhan Kaplan (2018). Effect of Different Cure Conditions on the Shrinkage of Geopolymer Mortar, International Journal of Engineering Research and Development Volume 14, Issue 10, PP.51-55.

Gökhan Kaplan, Hasbi Yaprak, Selçuk Memiş and Abdoslam Alnkaa (2018), Artificial Neural Network Estimation of the Effect of Varying Curing, Conditions and Cement Type on Hardened Concrete Properties, Buildings Journal.

Hasbi Yaprak, Abdoslam Alnkaa, Selçuk Memiş, Gökhan Kaplan (2019), Effects of different curing conditions on the properties of geopolymeric Mortar, MOJ Civil Engineering, Volume 5 Issue 1 - 2019,