

T.C
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**UÇUCU KÜL ESASLI HAFİF GEOPOLİMER HARÇLARIN TAZE VE
SERTLEŞMİŞ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ, MODELLENMESİ VE
OPTİMİZASYONU**

Şevin EKMEN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
2.1. Geopolimerlerin Taze Özelliklerinin Belirlenmesi	4
2.2. Geopolimerlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi	5
2.3. Geopolimerlerin Rötire Davranışının İncelenmesi	8
2.4. Geopolimerlerin Dayanıklılık ve Mikro Yapı Özelliklerinin Belirlenmesi	10
2.5. Geopolimerler Üzerine Yapılan Çalışmalarda İstatistiksel Analiz ve Optimizasyon	13
3. MATERYAL ve YÖNTEM	18
3.1. Materyal	18
3.2. Yöntem	21
3.2.1. Karışım parametreleri ve prosedürünün belirlenmesi	22
3.2.2. Kullanılan test yöntemleri	25
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	34
4.1. Taze Özellikler	34
4.1.1. İşlenebilirlik	34
4.1.2. Reoloji sonuçları	35
4.1.3. Birim ağırlık sonuçları	41
4.2. Mekanik Özellikler	42
4.2.1. Basınç dayanımı	42
4.2.2. Eğilme dayanımı	49
4.2.3. Ultrases geçiş hızı	52
4.3. Dayanıklılık Özellikleri	54
4.3.1. Su emme deneyi	54
4.3.2. Kılcal su emme deneyi	56
4.3.3. Rötire ölçümü	58
4.3.4. Termal iletkenlik tayini	65
4.4. Mikro Yapı İncelemesi	67
4.4.1. XRD analizi	67
4.4.2. TGA ve DTA sonuçları	69
4.4.3. FTIR analizi	75
4.4.4. SEM analizi	78
4.5. İstatistiksel Analiz ve Modelleme	82
4.5.1. Basınç dayanım sonuçlarının değerlendirilmesi	82
4.5.2. Rötire sonuçlarının değerlendirilmesi	88
4.6. Optimizasyon	93
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	103
5.1. Sonuçlar	103
5.2. Öneriler	106
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	118

ÖZET

Doktora Tezi

UÇUCU KÜL ESASLI HAFİF GEOPOLİMER HARÇLARIN TAZE VE SERTLEŞMİŞ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ, MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Şevin EKMEN

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Kasım MERMERDAŞ
2. Danışman: Doç. Dr. Zeynep ALĞIN
Yıl: 2021, Sayfa: 120

Bu çalışma, karışım parametrelerinin ve bileşenlerin özelliklerinin hafif geopolimer harçların mühendislik özellikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için kapsamlı bir deneysel çalışma sunmaktadır. Farklı sodyum hidroksit (SH) çözelti molariteleri, sodyum silikat/sodyum hidroksit (SS/SH) alkali çözelti oranları ve alkali/uçucu kül (A/UK) oranları dikkate alınarak harç numuneleri hazırlanmıştır. Taze halde iken, hafif geopolimer harçların reolojisi ve işlenebilirlik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, sertleşmiş harçların mekanik ve durabilite özelliklerini değerlendirmek için birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı, su emme, kılcal su emme, rötre (kuruma, otojen) ve termal iletkenlik değerleri incelenmiştir. Kimyasal bileşenlerin ve iç yapı analizinin belirlenmesi için mikro yapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Son aşamada genetik algoritma tabanlı esnek hesaplama yöntemi olan gen ekspresyon programlama (GEP) ve çoklu doğrusal regresyon (ÇDR) kullanılarak istatistiksel analiz ve modelleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, deneysel çalışmanın sonuçları dikkate alınarak tepki yüzey metodu (TYM) ile optimizasyon çalışması yapılmıştır. Sonuçlar, SS/SH ve A/UK oranlarının taze harç karışımların reolojik davranışını önemli ölçüde etkilediğini ve taze harçların kayma incelmeleri davranışı ile Herschel-Bulkley reolojik modeline iyi uyum sağladığını göstermiştir. Sertleşmiş harçların mekanik özellikleri, oksit bileşimleri ile güçlü bir korelasyon göstermiştir. A/UK, SS/SH oranlarının düşmesi ve sodyum hidroksit molaritesinin artması, basınç dayanımının artmasına rötre değerlerinin ise azalmasına neden olmuştur. Mikroyapısal özelliklerin incelenmesi sonucunda ise, harçların karışım oranlarının ve oksit bileşimlerinin geopolimerizasyon sürecinde büyük önem taşıdığı belirlenmiştir. Yapılan istatistiksel analiz ve modellemelerde GEP modeli kullanılarak ulaşılan veri tahminlerinin ÇDR modeli ile tahmin edilen verilere göre hedeflenen değerlere daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. TYM kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışması sonucunda ulaşılan optimum A/UK, SS/SH oranları ve SH molarite değeri sırasıyla 0.45, 1.586 ve 14 M olarak bulunmuştur.

ANAHTAR KELİMELEER: Pomza agregası, Geopolimer, Reoloji, Modelleme, Optimizasyon

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATING, MODELLING AND OPTIMIZATION OF FRESH AND HARDENED PROPERTIES OF FLY ASH BASED LIGHTWEIGHT GEOPOLYMER MORTARS

Şevin EKMEN

**Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kasım MERMERDAŞ
Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Zeynep ALĞIN
Year: 2021, Page: 120**

This study provides a comprehensive experimental study to evaluate the effect of mixture parameters and properties of components on the engineering properties of lightweight geopolymer mortars. Mortar samples were prepared considering different sodium hydroxide (SH) solution molarities, sodium silicate/sodium hydroxide (SS/SH) alkaline solution ratios and alkaline/fly ash (A/FA) ratios. The rheology and workability properties of fresh lightweight geopolymer mortars were investigated. Besides, unit weight, compressive strength, flexural strength, ultrasound pulse velocity, water absorption, water sorptivity, shrinkage (drying, autogenous), and thermal conductivity values were examined to evaluate the mechanical and durability properties of hardened mortars. A microstructural investigation was carried out to determine the chemical components and to analyze the internal structure of the geopolymer mortars. In the last stage, statistical analysis and modeling processes were conducted by using gene expression programming (GEP) and multiple linear regression (MLR). Besides, an optimization study with the response surface method (RSM) was carried out considering the results of the experimental study. The results showed that SS/SH and A/FA ratios significantly affect the rheological behavior of fresh mortar mixes and the shear-thinning behavior of fresh mortars well matched to the Herschel-Bulkley rheological model. The mechanical properties of the hardened mortars showed a strong correlation with their oxide composition. The decrease in A/FA ratio, SS/SH ratio, and the increase in SH molarity caused the compressive strength increment and decrease of the shrinkage values. As a result of the investigation of microstructural properties, it has been determined that the mixing ratios and oxide compositions of the mortars have great importance in the geopolymerization process. In the statistical analysis and modeling, it was observed that the data estimations obtained by using the GEP model gave results closer to the targeted values compared to the data estimated with the MLR model. As a result of the optimization study performed using RSM, the optimum A/FA ratio, SS/SH ratio, and SH molarity value were found as 0.45, 1.586, and 14 M, respectively.

KEY WORDS: Pumice aggregate, Geopolymer, Rheology, Modelling, Optimization

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi birikiminden faydalandığım, bana yol gösteren değerli hocam sayın Doç. Dr. Kasım MERMERDAŞ'a, bu süreç içerisinde kendisine her türlü konuda danışabildiğim sayın Doç. Dr. Zeynep ALĞIN'a, laboratuvar çalışmamda yardımını esirgemeyen sayın Dr. Öğr. Üyesi Yusuf IŞIKER'e, çalışmama katkı sağlayan sayın Dr. Öğr. Üyesi Süleyman İPEK'e ve ihtiyaç duyduğumda gereken her türlü desteği vererek her zaman yanımda olduğunu hissettiren eşim Dr. Öğr. Üyesi Arda Burak EKMEN'e teşekkür ederim.



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. NaOH molaritisine bağlı olarak elde edilen yayılma çapı değerleri (Saloma ve ark. (2016), Malkawi ve ark. (2016)).....	5
Şekil 2.2. Alkali oranlarına bağlı olarak basınç dayanım sonuçları (Rattanasak ve Chindaprasirt (2009)).....	6
Şekil 2.3. Alkali aktivatör oranı ile dayanım arasındaki ilişki (Nematollahi ve ark. (2015)).....	7
Şekil 2.4. NaOH molarite değerlerine kütleme sıcaklığına bağlı olarak basınç dayanım değerleri (Chithambaram ve ark. (2019)).....	8
Şekil 2.5. Oksit oranlarına bağlı olarak kuruma rötresi değerleri (Ma ve Ye (2015)).....	10
Şekil 2.6. Su emme ve kılcal su emme değerleri (Albitar ve ark. (2017))	12
Şekil 2.7. Elde edilen optimum basınç dayanım değerleri (Revathi ve ark. (2018)).....	14
Şekil 2.8. Elde edilen optimum basınç dayanım ve Tokluk değerleri (Silva Alves ve ark. (2019)).....	15
Şekil 2.9. Elde edilen optimum basınç dayanım sonuçları (Shahmansouri ve ark. (2021))	17
Şekil 3.1. Kullanılan malzemelerin görüntüsü	18
Şekil 3.2. Kullanılan uçucu külün a) XRD ve b) SEM analiz sonucu.....	19
Şekil 3.3. Pomza agregasının XRD ve SEM analiz sonucu	20
Şekil 3.4. Agregaların elek analizi grafiği.....	21
Şekil 3.5. Karışımların hazırlanma prosedürünün şematik gösterimi.....	24
Şekil 3.6. Geopolimer harç numunelerin hazırlanması	25
Şekil 3.7. Yayılma çapının belirlenmesi	25
Şekil 3.8. a) Reometre cihazının fotoğrafı ve b) kullanılan uç	26
Şekil 3.9. Basınç dayanım tayini	27
Şekil 3.10. Eğilme dayanım tayini	27
Şekil 3.11. Ultrases geçiş hızı tespiti.....	28
Şekil 4.1. Yayılma çapı değerleri	34
Şekil 4.2. Taze harçların farklı kayma hızlarına denk gelen görünür viskozite değerleri (a) 10 M SH konsantrasyonu (b) 12 M SH konsantrasyonu ve (c) 14 M SH konsantrasyonu	36
Şekil 4.3. Taze harçların farklı kayma hızlarına denk gelen kayma gerilmesi değerleri (a) 10 M SH konsantrasyonu (b) 12 M SH konsantrasyonu ve (c) 14 M SH konsantrasyonu	38
Şekil 4.4. Taze geopolimer harçların akma gerilmesi değerleri	39
Şekil 4.5. Akma gerilmesi ile yayılma çapı arasındaki ilişki	41
Şekil 4.6. Basınç dayanımı sonuçları, (a) SS/SH:2.5, (b) SS/SH:2 ve (c) SS/SH:1.5	44
Şekil 4.7. Basınç dayanımı ile (%)Na ₂ O arasındaki ilişki	47
Şekil 4.8. Basınç dayanımı değerleri ile H ₂ O/Na ₂ O oksit oranı arasındaki ilişki	47
Şekil 4.9. Basınç dayanımı değerleri ile H ₂ O/katı malzeme oranları arasındaki ilişki	48
Şekil 4.10. Basınç dayanımı değerleri ile SiO ₂ /Na ₂ O oranları arasındaki ilişki a) A/UK:0.45 b) A/UK:0.55	49
Şekil 4.11. Eğilme dayanımı sonuçları, (a) SS/SH:2.5, (b) SS/SH:2 ve (c) SS/SH:1.5.....	51
Şekil 4.12. Basınç dayanımı ile Eğilme dayanımı değerleri arasındaki ilişki	52
Şekil 4.13. Ultrases geçiş hızı test sonuçları, (a) A/UK:0.45 ve (b) A/UK:0.55	53
Şekil 4.14. Ultrases geçiş hızı test sonuçları ile basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişki	54
Şekil 4.15. Su emme sonuçları a) A/UK:0.45 ve b) A/UK:0.55	55
Şekil 4.16. Basınç dayanımı ile su emme arasındaki ilişki	56
Şekil 4.17. Su emme sonuçları a) A/UK:0.45 ve b) A/UK:0.55	57
Şekil 4.18. Basınç dayanımı ile kılcal su emme arasındaki ilişki.....	58
Şekil 4.19. Hafif geopolimer harçların A/UK: 0.45 için kuruma rötresi sonuçları a) SS/SH:1.5, b) SS/SH:2 ve c) SS/SH:2.5.....	60
Şekil 4.20. Hafif geopolimer harçların A/UK: 0.55 için kuruma rötresi sonuçları a) SS/SH:1.5, b) SS/SH:2 ve c) SS/SH:2.5.....	61
Şekil 4.21. Hafif geopolimer harçların A/UK: 0.45 için otojen rötresi sonuçları a) SS/SH:1.5, b) SS/SH:2 ve c) SS/SH:2.5.....	63
Şekil 4.22. Hafif geopolimer harçların A/UK: 0.55 için otojen rötresi sonuçları a) SS/SH:1.5, b) SS/SH:2 ve c) SS/SH:2.5.....	64
Şekil 4.23. Hafif geopolimer harçların termal iletkenlik değerleri.....	66

Şekil 4.24. Termal iletkenlik ve su emme değerleri arasındaki ilişki.....	67
Şekil 4.25. Hafif geopolimer hamurların XRD grafikleri	68
Şekil 4.26. 10 M SH konsantrasyonu ile hazırlanmış hafif geopolimer harçların a) 0.45 A/UK ve b) 0.55 A/UK için TGA ve DTA sonuçları.....	71
Şekil 4.27. 12 M SH konsantrasyonu ile hazırlanmış hafif geopolimer harçların a) 0.45 A/UK ve b) 0.55 A/UK için TGA ve DTA sonuçları.....	73
Şekil 4.28. 14 M SH konsantrasyonu ile hazırlanmış hafif geopolimer harçların a) 0.45 A/UK ve b) 0.55 A/UK için TGA ve DTA sonuçları.....	74
Şekil 4.29. Hafif geopolimer harçların a) 10M SH konsantrasyonu, b) 12M SH konsantrasyonu ve c) 14M SH konsantrasyonu için FTIR sonuçları	77
Şekil 4.30. 10M SH konsantrasyonu ile hazırlanan hafif geopolimer harçların a) S/FA:0.45 ve SS/SH:2.5 b) S/FA:0.55 ve SS/SH:2.5 c) S/FA:0.45 ve SS/SH:2 d) S/FA:0.55 ve SS/SH:2 e) S/FA:0.45 ve SS/SH:1.5 f) S/FA:0.55 ve SS/SH:1.5 için SEM görüntüleri ..	79
Şekil 4.31. 12M SH konsantrasyonu ile hazırlanan hafif geopolimer harçların a) S/FA:0.45 ve SS/SH:2.5 b) S/FA:0.55 ve SS/SH:2.5 c) S/FA:0.45 ve SS/SH:2 d) S/FA:0.55 ve SS/SH:2 e) S/FA:0.45 ve SS/SH:1.5 f) S/FA:0.55 ve SS/SH:1.5 için SEM görüntüleri ..	80
Şekil 4.32. 14M SH konsantrasyonu ile hazırlanan hafif geopolimer harçların a) S/FA:0.45 ve SS/SH:2.5 b) S/FA:0.55 ve SS/SH:2.5 c) S/FA:0.45 ve SS/SH:2 d) S/FA:0.55 ve SS/SH:2 e) S/FA:0.45 ve SS/SH:1.5 f) S/FA:0.55 ve SS/SH:1.5 için SEM görüntüleri ..	81
Şekil 4.33. GEP modeli ile tahmin edilen dayanım değerleri ile hedeflenen değerler arasındaki ilişki	83
Şekil 4.34. Oluşturulan GEP modelinin ağaç gösterimi	84
Şekil 4.35. GEP modeli ile tahmin edilen dayanım değerleri ile hedeflenen değerler arasındaki ilişki	86
Şekil 4.36. GEP ve ÇDR modelleri kullanılarak elde edilen dayanım değerleri için ortalama yüzde hata sonuçları.....	87
Şekil 4.37. GEP ve ÇDR modelleri için normalize edilmiş dayanım değerleri.....	88
Şekil 4.38. GEP modeli ile tahmin edilen rötre değerleri ile hedeflenen değerler arasındaki ilişki	88
Şekil 4.39. Oluşturulan GEP modelinin ağaç gösterimi	89
Şekil 4.40. ÇDR modeli ile tahmin edilen rötre değerleri ile hedeflenen değerler arasındaki ilişki	90
Şekil 4.41. GEP ve ÇDR modelleri kullanılarak elde edilen dayanım değerleri için ortalama yüzde hata sonuçları.....	91
Şekil 4.42. GEP ve ÇDR modelleri için normalize edilmiş dayanım değerleri.....	92
Şekil 4.43. Su emme modelinin regresyon analizi için grafikler (Denklem 1): (a) artıkların normal grafiği; (b) artıklara karşı tahmin edilen tepkinin grafiği; (c) tahmin edilene karşı gerçek tepkinin grafiği; (d) Üssel transformasyon için Box–Cox dönüşüm grafiği.....	96
Şekil 4.44. Termal iletkenlik modelinin regresyon analizi için grafikler (Denklem 2): (a) artıkların normal grafiği; (b) artıklara karşı tahmin edilen tepkinin grafiği; (c) tahmin edilene karşı gerçek tepkinin grafiği; (d) Üssel transformasyon için Box–Cox dönüşüm grafiği	97
Şekil 4.45. Basınç dayanımı modelinin regresyon analizi için grafikler (Denklem 3): (a) artıkların normal grafiği; (b) artıklara karşı tahmin edilen tepkinin grafiği; (c) tahmin edilene karşı gerçek tepkinin grafiği; (d) Üssel transformasyon için Box–Cox dönüşüm grafiği	98
Şekil 4.46. Kuruma rötresi modelinin regresyon analizi için grafikler (Denklem 4): (a) artıkların normal grafiği; (b) artıklara karşı tahmin edilen tepkinin grafiği; (c) tahmin edilene karşı gerçek tepkinin grafiği; (d) Üssel transformasyon için Box–Cox dönüşüm grafiği	99
Şekil 4.47. Su emme için tepki yüzey modelinin üç boyutlu gösterimi	100
Şekil 4.48. Termal iletkenlik için tepki yüzey modelinin üç boyutlu gösterimi.....	100
Şekil 4.49. Basınç dayanımı için tepki yüzey modelinin üç boyutlu gösterimi.....	100
Şekil 4.50. Kuruma rötresi için tepki yüzey modelinin üç boyutlu gösterimi	100
Şekil 4.51. Optimizasyon analizinden elde edilen arzu edilebilirlik fonksiyonunun üç boyutlu grafiksel gösterimi	102

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Uçucu külün kimyasal bileşimi (ağ. %)	19
Çizelge 3.2. Alkali aktivatörlerin özellikleri	20
Çizelge 3.3. Pomza agregasının ve kumun kimyasal bileşenleri (ağ. %)	21
Çizelge 3.4. Karışım oranları	23
Çizelge 4.1. Herschel-Bulkley model parametreleri değerleri	40
Çizelge 4.2. Hafif geopolimer harçların birim ağırlık değerleri (kg/m ³).....	42
Çizelge 4.3. Hafif geopolimer harçların basınç dayanımı değerleri (MPa).....	43
Çizelge 4.4. Hafif geopolimer harçların eğilme dayanımı değerleri (MPa)	49
Çizelge 4.5. FTIR bant aralıkları.....	75
Çizelge 4.6. İstatistiksel değerlendirme	93
Çizelge 4.7. Su emme, termal iletkenlik, basınç dayanımı ve kuruma rötresi için regresyon modellerinde (Denklem 4.13-4.16) kullanılan katsayılar ve ANOVA sonuçları.....	94
Çizelge 4.8. Tepki modelleri için tanımlayıcı istatistikler.....	95
Çizelge 4.9. Optimizasyon analizinde kullanılan değişkenler ve bunlara karşılık gelen hedefler.....	101
Çizelge 4.10. Optimizasyon analizinin sonuçları	102

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Alkali Aktivatör
BET	Yüzey Alanı Ölçümü
CSH	Kalsiyum Silika Hidrat
ÇAO	Çok Amaçlı Optimizasyon
ÇDR	Çoklu Doğrusal Regresyon
DKY	Doygun Kuru Yüzey
DTA	Diferansiyel Termal Analizi
DZ	Doğal Zeolit
FTIR	Fourier Dönüşümü Kızılötesi
GA	Genetik Algoritma
GBA	Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası
GEP	Gen Ekspresyon Programlama
KK	Kızdırma Kaybı
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzde Hata
MSE	Ortalama Kare Hata
PA	Pomza Agregası
PÇ	Portland Çimentosu
R	Korelasyon Katsayısı
RMSE	Kök Ortalama Kare Hata
S.a	Süper Akışkanlaştırıcı
s/b	Sıvı/Bağlayıcı
SD	Silis Dumanı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SH	Sodyum Hidroksit
SP	Süper Plastikleştirici
SS	Sodyum Silikat
TGA	Termogravimetrik Analizi
TYM	Tepki Yüzey Metodu
UK	Uçucu Kül
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
XRF	X-Işını Floresansı
XRD	X-Ray Difraksiyonu

1. GİRİŞ

Hızla artan nüfus, kentleşme ve sanayileşme gibi faktörler, bina uygulamalarında önemli bir artış ve dolayısıyla inşaat sektöründe sürdürülebilir teknolojilere ihtiyaç duyan yapı malzemelerinin tüketimini gerektirmektedir. Bu bağlamda malzemelerin uygunluğu, erişilebilirliği ve maliyeti çok önemlidir. İnşaat sektörü, fosil enerji tüketimi nedeniyle doğal kaynak tüketimi ve sera gazı salınımı ile çevreye zarar veren ve iklim değişikliğine neden olan sektörler arasında yer almaktadır. Çimento kullanımı, inert parçacıkları hidrasyon nedeniyle bağlayan bileşen olduğu için geleneksel beton üretiminde vazgeçilmez bir role sahiptir [Assi ve ark., 2018]. Bununla birlikte, atmosferdeki önemli miktarda CO₂ emisyonundan da sorumludur. İnşaat işlerinde yüksek çimento seviyelerinin tüketimi nedeniyle Geleneksel Portland çimentosu üretim sürecinin, atmosfere toplam CO₂'nin %7-8'ini saldığı bildirilmiştir (Malhotra 2001; Olivier ve ark., 2012). CO₂ emisyonundaki artış, insanların geleceğı üzerinde büyük etkilere sahip, istenmeyen kritik bir konu olan küresel ısınmaya neden olmaktadır. Bu bağlamda, araştırmacıların sürdürülebilir bir gelecek için çimentonun olumsuz çevresel etkilerini azaltma çabaları, uzun zaman önce alternatif bağlayıcıların araştırılmasıyla başlamıştır (Zareei ve ark., 2018).

Glukovhsy tarafından 1950'lerde ortaya atılan (Glukhovsky, 1959) alkalilerle aktive edilmiş malzemeler ve ilk olarak Davidovits'in (Davidovits, 1991) bahsettiğı geopolimer teknolojileri ile çimento kullanımı ortadan kaldırılarak ve yaygın olarak kullanılan doğal mineral veya endüstriyel atıkların (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin vb.) çeşitli alkali çözeltilerle (NaOH, KOH, Na₂SiO₃) reaksiyonu sonucu elde edilen yüksek mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip yapı kompozitleri üretilmektedir (Rangan, 2008). Bununla birlikte, alkalilerle aktive edilmiş malzeme ile geopolimerdeki reaksiyonların oluşumu birbirinden farklıdır. Geopolimerizasyon sentezi, bir dizi ekzotermik reaksiyon içermektedir. Geopolimerizasyon reaksiyon süreci üç aşamadan oluşur; ilk olarak yüksek silika ve alümina içeren kaynak malzemenin alkali çözeltide çözünmesi, ardından moleküler oligomer zincirlerinin oluşumu ve son olarak daha uzun 3 boyutlu Si-O-Al polimerik jel zincirleri oluşturmak

için oligomerlerin polikondensasyonudur (Hardjito ve ark., 2004). Alkaliler ile aktive edilmiş malzemelerde ise, alkali ortam nedeniyle cürufun depolimerizasyonu meydana gelir ve alkali katyonlar, kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jel yapısının oluşumuyla sonuçlanan reaksiyonlara katılmazlar (Ameri ve ark., 2019).

Hafif beton, hafif agregası kullanımı veya matris içerisine hava sürüklenmesi ile üretilmektedir. Düşük ölü yük, daha iyi ısı yalıtımı, yangına dayanıklılık ve daha düşük nakliye maliyeti gibi avantajları nedeniyle yapısal veya yapısal olmayan malzeme uygulamalarında çeşitli hafif agregaların kullanımına yönelik devam eden bir ilgi vardır (Neville, 1995; Kayali, 2008; Mouli ve Khelafi, 2008). Agregası, kompozitte kullanılan diğer bileşenlere kıyasla en yüksek miktara sahip olduğundan, uygun özelliklere ulaşmak için farklı agregası tipleri, miktarları ve kombinasyonları üzerinde durulabilmektedir. Üretim yöntemine göre doğal agregası (örn. Süngertaşı, volkanik tüf, cüruf) ve yapay agregası (örn. Genişletilmiş kil, perlit, şeyl) olarak iki gruba ayrılabilirler (Posi, 2013; Wongsu, 2018). Hafif agregaların kullanımının yaklaşık 3000 yıl öncesine dayandığı da bilinmektedir (Berntsson, 2008).

Doğal olarak oluşan pomza, magma içindeki gazların ani soğuma sırasında kütleden ayrılmasıyla oluşan çok gözenekli, camsı bir volkanik taştır. Dünyada tespit edilen pomza yatağı 18 milyar ton civarındadır. Pomza yatağının en yüksek olduğu ülkeler sırasıyla Amerika Birleşik Devletleri, Türkiye ve İtalya'dır. Türkiye'deki pomza yataklarının miktarı 2.8 milyar ton civarındadır. Buna göre Türkiye'deki pomza yatakları dünya pomza rezervlerinin %15.8'ine tekabül etmektedir. Pomza agregası içeren çimento esaslı kompozitler üzerinde yapılan çeşitli çalışmalar (Aydın ve Baradan, 2007; Bideci ve ark., 2013; Rex ve Kameshwari, 2016; Bideci, 2016; Amel ve ark., 2017) hafif malzemelerle ilgili olan literatür bilgilerine katkı sağlamaya devam etmektedir.

Taze karışımların işlenebilirlik özellikleri, kolay karıştırma, ayrışmadan taşınma, yerleştirme ve sıkıştırma için oldukça önemlidir. Aynı zamanda yapısal malzemelerin işlenebilirlik, döküm, agregaların ayrışması gibi taze özelliklerinin malzemelerin mekanik, dayanıklılık, termal vb. gibi sertleştirilmiş özellikleri üzerinde

önemli bir rol oynadığı da bilinmektedir. Geopolimer malzemelerin kıvam özellikleri basit işlenebilirlik testleri veya karmaşık reolojik testlerle elde edilmektedir. Slump deneyi, basitlik ve düşük maliyet nedeniyle akışkanlığı belirlemede kullanılan en yaygın yöntemdir. Slump testi işlenebilirlik hakkında bir fikir verse de, karışım parametrelerinin en uygun oranlarının daha iyi belirlenebilmesi için akma dayanımı ve viskozite gibi reolojik parametreler de bilinmelidir (Saeli ve ark., 2017; Hadi ve ark., 2019; Saeli ve ark., 2019a; Saeli ve ark., 2019b; Buruberri ve ark., 2019).

Bu çalışmada çeşitli parametreler dikkate alınarak yüksek uçucu kül miktarına sahip hafif ağırlıklı geopolimer harçların üretilmesi amaçlanmıştır. Pomza agregasının mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkisi göz önünde bulundurularak yeterli basınç dayanımı ve hafif harç elde edilmesi amacı doğrultusunda sabit bir agrega miktarı belirlenmiştir. Isıyla kütleme prosedürünün kullanılmasının yerinde döküm uygulamaları için bir zorluk olduğu ve istenmeyen karbon ayak izine neden olduğu bilinmektedir. Fakat, tasarlanan hafif geopolimer harçlar ile yeterli mühendislik özelliklere ulaşmak için ısıyla kütleme yöntemi kullanılmıştır. Üretilen hafif geopolimer harçlar prekast endüstrisindeki uygulamalar için kullanılabilir. Ayrıca bu hafif geopolimer harçların üretiminde yüksek miktarda uçucu kül atığının kullanılmasının maliyet, CO₂ emisyonu değerlerinin azaltılmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Bu bağlamda çeşitli karışım parametrelerine sahip pomza agregası içeren hafif geopolimer harçların taze ve sertleşmiş özellikleri üzerinde kapsamlı bir araştırma gerçekleştirilmiştir. İncelenen mühendislik özellikleri, taze karışımların işlenebilirliği ve reolojisi, sertleşmiş harçların ise birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı sonuçları olmuştur. Bununla birlikte, su emme, kılcal su emme, rötre ve termal iletkenlik sonuçlarına da ulaşılmıştır. Sertleşmiş hafif geopolimer harçların kristal, morfolojik, kimyasal yapısı ve oluşumu bilgilerine ulaşmak için ise mikroyapısal (XRD, SEM, FTIR ve TGA) özellikleri belirlenmiştir. Deneysel çalışma sonucu elde edilen verilerin tepki yüzey metodu ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, elde edilen veriler kullanılarak istatistiksel yöntemler aracılığıyla veriler modellenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

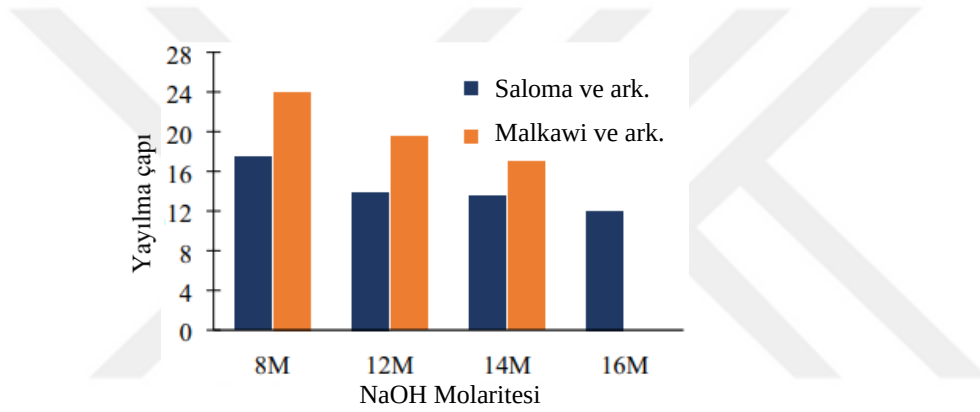
Geopolimer, sağladığı çeşitli avantajlar sebebiyle araştırmacıların ilgisini çeken oldukça popüler bir kompozit yapı malzemesidir. Geopolimer yapı malzemeleri ile ilgili literatürde yer alan çalışmalardan bir kısmı aşağıda yer almaktadır. Sunulan bu bilgiler kapsamında geopolimerli kompozitlerin taze özellikleri, mekanik özellikleri, rötre davranışı, dayanıklılık performansı, mikro yapı incelemeleri ve ulaşılan optimum karışım oranları irdelenmiştir. Ayrıca bu kompozitlerin üretimi ile ilgili bazı kritik ipuçları da verilmiştir.

2.1. Geopolimerlerin Taze Özelliklerinin Belirlenmesi

Farklı tasarım kombinasyonları dikkate alınarak oluşturulan geopolimer kompozitlerin üretim ve taşınma gibi özellikleri yanı sıra sertleşmiş özellikleri üzerinde de oldukça etkisi bulunan işlenebilirlik, reolojik davranış gibi taze özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Criado ve ark. (2009), çimento bazlı beton üretiminde kullanılan lignosülfonatlar, melaminler gibi çeşitli katkı maddelerinin uçucu kül bazlı geopolimer hamurların viskozitesi ve akma dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Geleneksel çimento esaslı betona göre geopolimer kompozitlerde aynı etki elde edilememiştir. Yang ve ark. (2011), su içeriğinin cüruf esaslı alkaliler ile aktive edilmiş betonun işlenebilirliği ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini tespit etmek için bir çalışma yürütmüşlerdir. Sonuçlar, su miktarındaki artışın daha düşük çökme kaybına ve basınç dayanımı değerlerinde düşüşe neden olduğunu göstermiştir.

Romagnoli ve ark. (2012) sıcaklığın, sıvı/katı oranının ve kürlenme süresinin geopolimer hamur karışımlarının reolojik parametreleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Geopolimerizasyon reaksiyonunun hızlanması nedeniyle sıcaklıktaki artışın viskozite değerlerini yükselttiğini belirtmişlerdir. Favier ve ark. (2014), metakaolin bazlı geopolimerlerin reolojik özelliklerini araştırmışlardır. Alkali çözelti olarak sodyum silikatı tercih etmişlerdir. Karışım bileşimi ve oksit oranlarının taze özelliklere etkisinin oldukça yüksek olduğu belirtilmiştir.

Saloma ve ark. (2016), değişen NaOH konsantrasyonuna sahip geopolimer harcın işlenebilirliğine ve dayanım değerlerine odaklanmışlardır. Karışımın işlenebilirliğinin ve priz süresinin, sodyum hidroksit konsantrasyonunun artmasıyla doğrusal olarak azaldığı görülmüştür (Şekil 2.1). Malkawi ve ark. (2016), geopolimer harcın çeşitli sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı ve NaOH konsantrasyonu için işlenebilirlik ve priz alma süresini incelemişlerdir. Geopolimerin işlenebilirliği, sodyum silikat içeriğinin alkali çözeltinin %50'sinden %70'ine artması sonucunda akış özelliğinde %33 oranında azalma ile önemli ölçüde azalmıştır. Sodyum silikat içeriğinin artması ve sodyum hidroksit konsantrasyonunun azalması ile priz süresinin arttığı belirtilmiştir (Şekil 2.1).



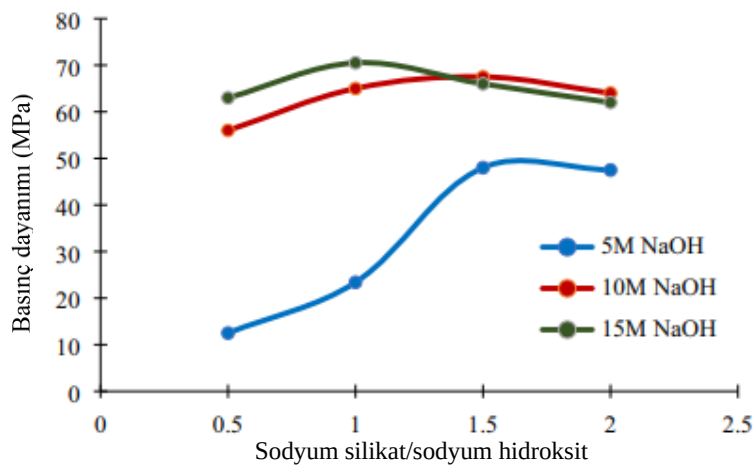
Şekil 2.1. NaOH molaritesine bağlı olarak elde edilen yayılma çapı değerleri (Saloma ve ark. (2016), Malkawi ve ark. (2016))

Gomaa ve ark. (2017), sodyum silikat çözeltisinin varlığının işlenebilirliği azalttığını ve priz süresinin çalışmalarında dikkate alınan farklı uçucu kül türleri için $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 1 ile 1.5 arasında olması halinde optimum olduğunu göstermişlerdir. Yang ve ark. (2018), uçucu kül partikül şekillerinin uçucu kül/cüruf bazlı hamur üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Oldukça küresel olan uçucu kül mikrosferinin viskozite değerlerini önemli ölçüde düşürdüğünü belirtmişlerdir.

2.2. Geopolimerlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

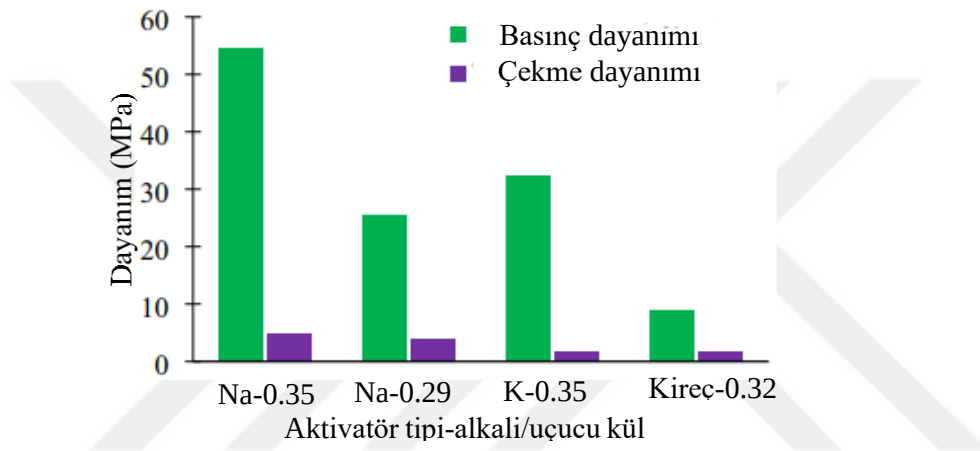
Geopolimer yapı malzemelerinin tasarlanması ve hedeflenen mühendislik özelliklerinin elde edilmesi amacıyla kullanılan malzeme tipi, oranları ve oluşturulan kütleme koşulları göz önüne alınmaktadır. Bu parametrelerin oldukça önemli bir yere

sahip olan ve yapının performansını belirleyen basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü gibi özellikler üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Fernández-Jiménez ve ark. (2006), çalışmalarında çimentosuz uçucu kül içeren alkalilerle aktive edilmiş betonun mekanik özelliklerini, elastisite modülünü ve rötre davranışını incelemişlerdir. Kullanılan F tipi uçucu kül ile birlikte hem NaOH ile hazırlanmış hem de NaOH+Na₂SiO₃ içeren iki farklı çözelti hazırlanmıştır. Portland çimentolu harçlar için standart laboratuvar şartlarında 22 °C’de 20 saat, sıcak hava şartlarında ise bu kez 40 °C’de yine 20 saat olmak üzere 2 farklı kürleme yöntemi kullanılmıştır. Uçucu küllü aktive edilmiş karışımlar ise 85 °C’de 20 saat bekletilerek kür işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak alkalilerle aktive edilmiş uçucu küllü harcın kısa sürede basınç ve eğilme dayanımlarının arttığını, orta derecede elastisite modülüne sahip olduğunu ve kuruma rötresinin, benzer normal Portland çimento harcında elde edilen değerlerden daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Rattanasak ve Chindaprasirt (2009) tarafından NaOH aktivatörünün geopolimerizasyondaki etkisi deneysel olarak çalışılmıştır. Seçilen çeşitli sodyum hidroksit konsantrasyonları arasında 10 M ve 15 M konsantrasyonlarının kullanılması, Şekil 2.2.’de verildiği gibi, nispeten daha yüksek basınç dayanımı sağlamıştır. NaOH’nin artan konsantrasyonu, Si ve Al iyonlarının uygun şekilde çözünmesini sağlamıştır. Sodyum silikat/sodyum hidroksit çözelti oranının, düşük SH konsantrasyonlarında geopolimer harcın dayanımını daha fazla etkilediği görülmüştür.



Şekil 2.2. Alkali oranlarına bağlı olarak basınç dayanım sonuçları (Rattanasak ve Chindaprasirt (2009))

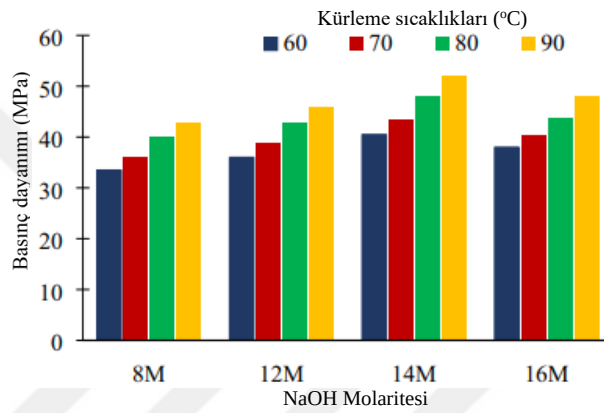
Nematollahi ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmalara göre sodyum bazlı aktivatör içeren uçucu küllü geopolimer harç, potasyum bazlı ve kireç bazlı aktivatör içerenlere kıyasla daha iyi basınç dayanımı sonuçları vermiştir. Potasyum bazlı aktivatör içeren uçucu kül bazlı geopolimerde ümit verici basınç dayanımı sonuçları verirken, kireç bazlı aktivatör çözeltisi için dayanım değerlerinde düşüş görülmüştür. Potasyum ve kireç kullanılarak aktifleştirilen uçucu küllü geopolimer harç numunelerinin çekme dayanımı, sodyum bazlı aktivatörlü olanlara göre %30 daha düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Alkali aktivatör oranı ile dayanım arasındaki ilişki (Nematollahi ve ark. (2015))

Abdollahnejad ve ark. (2017), geri dönüştürülmüş cam elyafın kendiliğinden yerleşen harçların ve uçucu kül-cüruf bazlı geopolimer harçların kuruma rötire hızı ve mekanik özelliklerine etkileri üzerine yapılan karşılaştırmalı bir çalışmanın deneysel sonuçlarını sunmuşlardır. Elde edilen sonuçlara göre kuruma rötiresinin azaltılmasında geri dönüştürülmüş cam elyafın eklenmesi, geopolimer harçlarda kendiliğinden yerleşen harçlara göre çok daha büyük etkilere sahip olmuştur. Kuruma rötire hızı kendiliğinden yerleşen harçlarda geopolimer harçlardan çok daha düşüktür. Elyaf uzunluğundan bağımsız olarak, geopolimer harçlarda rötire oranını düşürmek için optimum elyaf içeriği, %1.5 geri dönüştürülmüş cam elyaf olarak belirlenmiştir. Colangelo ve ark. (2018), hafif agrega olarak atık genleştirilmiş polistiren (AGP) kullanılarak üretilen geopolimerin termal özelliklerini araştırmışlardır. AGP'nin geopolimer kompozit içinde kullanılması basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarını azaltırken, düşük ısı iletkenlik değerlerinin elde edilmesine katkı sağlamıştır. İsmail

ve El-Hassan (2018), hafif agrega olarak genleştirilmiş kil agregası içeren uçucu kül-cüruf bazlı geopolimer beton üretmişlerdir. Hafif agrega kullanımının dayanım değerlerinde düşüşe neden olduğu ve daha kırılğan bir yapı elde edildiği belirtilmiştir. Chithambaram ve ark. (2019), sabit 2.5 ve 1.5 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranları için kürlleme sıcaklığından bağımsız olarak 12 M'lik optimum sodyum hidroksit konsantrasyonunu önermişlerdir. Farklı kürlleme sıcaklıkları için farklı NaOH konsantrasyonunun basınç dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 2.4.'te verilmiştir.



Şekil 2.4. NaOH molarite değerlerine kürlleme sıcaklığına bağlı olarak basınç dayanım değerleri (Chithambaram ve ark. (2019))

Rehman ve ark. (2020), sentetik hafif agrega, uçucu kül, cüruf ve çimento kombinasyonunu kullanarak geopolimer beton ve geleneksel beton üretmişlerdir. Portland çimento esaslı beton ile karşılaştırıldığında, hafif geopolimer betonun daha iyi basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ultrases geçiş hızına sahip olduğu tespit edilmiştir.

2.3. Geopolimerlerin Rötire Davranışının İncelenmesi

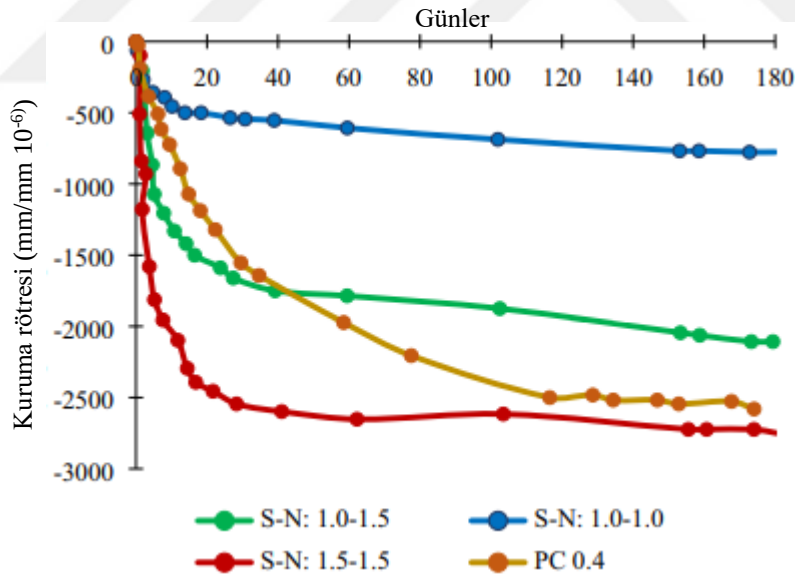
Geopolimerlerin zamana bağlı davranışlarının incelenmesinde oldukça önemli yere sahip olan rötire sonuçları ve bu sonuçları etki eden parametrelerin değerlendirilmesi amacıyla farklı tip ve oranlarda malzemeler kullanılarak çeşitli ortam koşulları altında davranışları incelenmiştir. Krizan ve Zivanovic (2002), camsuyu ve sodyummetasilikat ile aktifleştirilmiş küllü harçların rötire değerlerinin

Portland çimentolu harçlarınkinden daha fazla olduğu sonucuna varmıştır. Bu durum hidrasyon sırasında alkali ortamda silika jelinin oluşumunun daha da kolaylaştığı ve oluşan jelin yüksek su oranına sahip olması dolayısıyla suyun dışarı çıkması sonucunda rötrenin başladığı bilgilerine yer verilerek açıklanmıştır. Camsuyu ve sodyummetasilikat miktarının artmasıyla rötne değerlerinde de artış gözlenmiştir. Neto ve ark. (2008), geopolimer harçlar üzerine yapılan çalışma ile silika miktarının artışına bağlı olarak erken hidrasyonun gerçekleşmesi sebebiyle aktivatör miktarının kuruma ve otojen rötreyi etkilediğini belirlemişlerdir. Sodyum silikat aktivatör miktarının artışının toplam poroziteyi azalttığı, yapılan mikro analizler ile orta hacimdeki boşluk miktarını arttırdığı, numuneler üzerinde yapılan ölçümler sonucunda ise rötne değerlerini arttırdığı sonuçlarına varılmıştır.

Riditirud ve ark. (2011), çalışmalarında uçucu kül içeren geopolimerlerin rötresini incelemişlerdir. Geopolimerleri oluşturmak için kaynak malzeme olarak uçucu kül kullanılmıştır. NaOH konsantrasyonunun, sodyum silikatın (Na_2SiO_3) sodyum hidroksite (NaOH) oranının, sıvı/kül oranının, kürleme sıcaklığının ve kürlenme süresinin geopolimer harçların rötresi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Geopolimerler sırasıyla 25, 40 ve 60 °C'de kürlenmiştir. Sonuçlar, geopolimerlerin rötresinin daha çok, kür sıcaklığına ve sıvı/kül oranına bağlı olduğunu göstermiştir. Rötne artışı, geopolimerlerin düşük dayanım gelişimiyle ilişkili bulunmuştur. Aydın ve Baradan (2012), çalışmalarında geopolimer harçlarda buhar (100 °C/8 saat) ve otoklav (210 °C/2MPa/8 saat) kürün uygulanmasının ve cüruf-alkali içeriğinin azalmasının kuruma rötresini azalttığı bilgilerine ulaşmışlardır. Ayrıca, alkali ile aktive edilmiş küllü karışımların (AAKK) kuruma rötresinin Portland çimentolu (PÇ) karışımların rötresinden standart kür için 8 kat, buhar kürü için ise 4.5 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. PÇ'li karışımların rötresinin buhar kürü ile %34, otoklav kür ile %80 azaldığı ve ısıtılmış kürün, AAKK'lı karışımların rötresini azaltmada PÇ'li karışımlarinkine göre daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Chi ve ark. (2012), buharlaşabilen su miktarını ve yüzeye doğru hareket eden suyun hızını belirlemesi amacıyla yürütülen çalışma ile sıvı/bağlayıcı (s/b) oranı arttıkça geopolimer harç için kuruma rötresinin arttığını belirtmişlerdir. Aynı zamanda

yüksek s/b oranının tek faktör olmayıp kum/bağlayıcı oranı arttıkça kuruma rötresinin de azaldığı sonuçlarına varmışlardır. Ayrıca yüksek kürleme sıcaklığı ne kadar fazla olursa rötreyi kısıtlayan hidrate olmamış tanelerin hacminin o kadar az olduğu bilgisine yer verilmiştir. Ma ve Ye (2015) tarafından alkali ile aktive edilmiş uçucu küllün rötreye özellikleri incelenmiştir. Uçucu küllü geopolimer hamurunun otojen büzülmesi, oluklu boru yöntemi ile kuruma büzülmesi ise 40x40x160 mm prizma numuneleri kullanılarak ölçülmüştür. $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı yüksek olan numuneler maksimum basınç dayanımı ve daha yüksek otojen büzülme göstermiştir. Alkali çözelti konsantrasyonundaki %50'lik bir artış, otojen büzülmeyi neredeyse ikiye katlamıştır. Geopolimer hamurların kuruma büzülmesi 800-2100 mikro uzama civarında, OPC çimento macunu için ise yaklaşık 2500 mikro uzama olarak elde edilmiştir ve sonuçlar Şekil 2.5'te verilmiştir. Gözenek yapısı ile ilgili olarak elde edilen deneysel sonuçlar neticesinde, kuruma büzülmesi değerleri karışımların kapiler basınç ile açıklanabilen gözenek yapısına bağlanmıştır. Bu nedenle, gözenek yapısı uçucu küllü geopolimerin kuruma büzülmesini belirlemede önemli bir faktör olmuştur.



Şekil 2.5. Oksit oranlarına bağlı olarak kuruma rötresi değerleri (Ma ve Ye (2015))

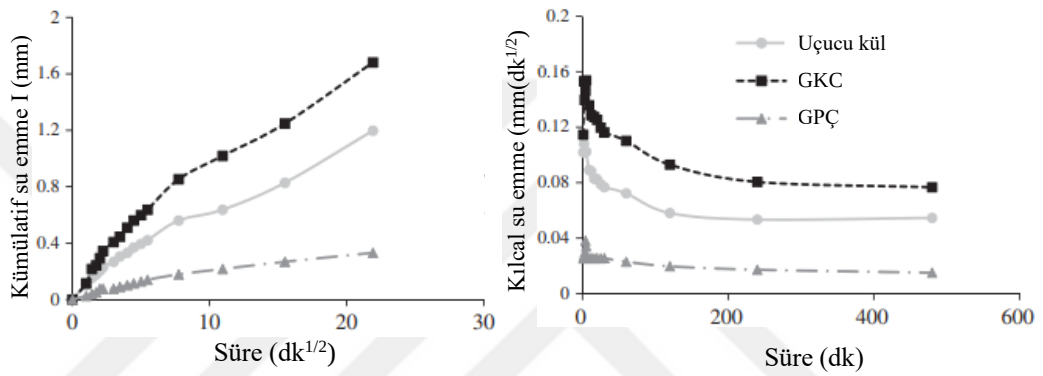
2.4. Geopolimerlerin Dayanıklılık ve Mikro Yapı Özelliklerinin Belirlenmesi

Mekanik özellikleri belirlenen geopolimer yapı malzemelerinin aynı zamanda su emme, asidik ortamlardaki davranışı, yüksek sıcaklık etkisi ve termal iletkenlik

sonuçlarına ulaşılmıştır. Bazı çalışmalarda elde edilen kompozitlerin mühendislik özellikleri belirlenen mikro yapı incelemeleri ile de desteklenmiştir. Chi ve Huang (2013), basınç dayanım testi, eğilme dayanım testi, su emme testi, kuruma rötresi testi, taramalı elektron mikroskobu ve X-ray difraksiyon (XRD) analizi ile çeşitli alkali ile aktive edilmiş uçucu kül/cüruf (AAUC) bazlı harçların bağlanma mekanizmasını ve özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada artan uçucu kül oranının kuruma rötresinde bir düşüşe neden olduğunu göstermişlerdir. Aynı çalışmada ayrıca, alkali ile aktive olan bağlayıcılardaki sodyum oksit dozundaki artışın, rötre sonuçlarında azalmaya neden olduğu gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara dayalı olarak optimum karışım tasarımı olarak, %6 Na₂O konsantrasyonu ile uçucu kül/cüruf oranı 50/50 olan AAUC harçları önerilmiştir. Abdulkareem ve ark. (2014), geopolimerlerin mekanik, termal ve mikro yapısını yüksek sıcaklık etkileri altında incelemişlerdir. Genleştirilmiş kil agregasının kullanılması, numunelerin 400, 600 ve 800 °C sıcaklıklara direncine katkıda bulunmuştur. Mikro yapı analizine göre 600 ve 800 °C sıcaklıklarının agrega ile matris arasındaki yapıya ciddi şekilde zarar verdiği görülmüştür.

Neupane ve ark. (2016), çalışmalarında bağlayıcı malzeme olarak iki tip geopolimer bağlayıcı kullanmışlardır. Farklı işlenebilirlik seviyeleri (normal işlenebilir ve süper işlenebilir) ile geopolimer ve Portland çimentolu (PÇ) betonun basınç dayanımına ve kuruma rötresine ayrıntılı bir şekilde yer vermişlerdir. Bütün beton numuneleri standart laboratuvar sıcaklığında kürlenmiştir. Erken yaşta geopolimer betonun basınç dayanımı gelişiminin PÇ betonunkinden göreceli olarak daha düşük olduğu bununla birlikte, ilerki yaş dayanımının, belirgin olarak daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmanın kuruma rötre sonuçlarının, önceki araştırmalarda hızlandırılmış şekilde kürlenmiş geopolimer betonların kuruma rötresinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Süper işlenebilir beton, aynı derecedeki normal işlenebilir betona göre daha fazla kuruma rötresi göstermiştir. Araştırmalarında, geopolimer betonun sıradan Portland çimentolu betona göre daha yüksek çekme, basınç, eğilme dayanımları ve sülfat ve asidik ortamlara direnç gibi daha iyi mühendislik özelliklerine sahip olduğunu göstermişlerdir. Albitar ve ark. (2017), F sınıfı uçucu kül ve granüle kurşun cürufu (GKC) kullanılarak üretilen geopolimer betonların performansını değerlendirmişlerdir. Geleneksel Portland

çimentosu (GPÇ) içeren betonunun performansı da geopolimer betonların dayanıklılık özelliklerini değerlendirmek için bir referans olarak araştırılmıştır. Beton içindeki su hareketi için taşıma mekanizmasını ortaya koyan erken aşamalardaki su emme oranları ve kılcal su emme değerleri Şekil 2.6.'da verilmiştir. GPÇ betonunun, karşılık gelen uçucu kül ve GKC içeren geopolimer beton örneklerinden çok daha düşük bir su emme oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu, kısmen basınç dayanımındaki farklılığa ve esas olarak GPÇ betonun geopolimer betondan daha düşük bir absorpsiyon oranına sahip olduğunu ortaya çıkaran kılcal mekanizmasına bağlanmıştır.



Şekil 2.6. Su emme ve kılcal su emme değerleri (Albitar ve ark. (2017))

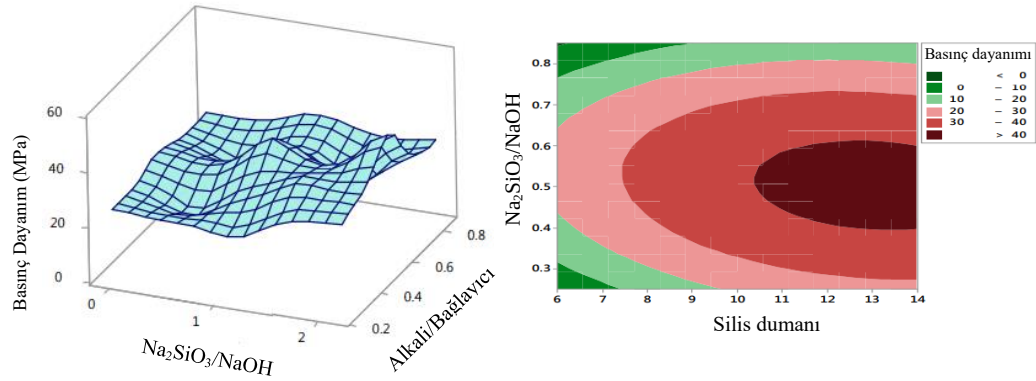
Kumar ve ark. (2018), soğuk bağlanmış hafif agregalar kullanılarak üretilen geopolimer betonun dayanım ve taşıma özelliklerini incelemişlerdir. Boşluklu yapıya sahip hafif agregaların kullanılmasıyla işlenebilirlik, su emme ve su geçirgenlik değerleri artarken dayanım değerleri azalmıştır. Xie ve ark. (2019), çamur seramik ve geri dönüştürülmüş ince agregalar bazlı geopolimer kompozitin işlenebilirliğini, yoğunluğunu, mekanik ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Hedeflenen performans için, uygun cüruf ve agregalar miktarları sırasıyla %30 ve %40 olarak belirlenmiştir. Contrafatto ve ark. (2020), geri dönüştürülmüş volkanik agregalar bazlı geopolimer harcın özelliklerini araştırmışlardır. %0.02, %0.05 ve %0.1 oranında hava sürükleyici katkı kullanımı, yoğunluk değerleri ve basınç dayanımı sonuçlarında düşüşe neden olmuştur. Termal iletkenlik değerleri 0.154-0.266 W/mK arasında değişmiştir ve boşluk miktarı ile ısı iletkenlik arasında güçlü bir ilişki bulunmuştur.

2.5. Geopolimerler Üzerine Gerçekleştirilen İstatistiksel Analiz ve Optimizasyon

Tasarım aşaması gerçekleştirilirken elde edilmek istenen veriler için oluşturulan karışım parametreleri oldukça farklılık gösterebilmektedir. Hedeflenen parametreler ışığında optimum değerlerin belirlenmesi amacıyla çeşitli yöntemler ile optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kupaei ve ark. (2013), hafif agrega olarak palmye kabuğu kullanılarak üretilen geopolimer betonun tasarlanmış optimum karışım oranlarını sunmuşlardır. Alkali aktivatör olarak molariteleri 14 M ile 16 M arasında değişen sodyum hidroksit (SH) çözeltileri ile sodyum silikat (SS) kimyasalı birlikte kullanılmış ve en yüksek dayanım değeri 14 M SH konsantrasyonu, 450 kg/m³ uçucu kül içeriği ve 0.34 su/uçucu kül karışım oranı ile elde edilmiştir. Panagiotopoulou ve ark. (2015), Taguchi tasarım yöntemini kullanarak uçucu kül bazlı geopolimerin sıvı çözeltilisinde bulunan alkali türü ve içeriğinin basınç dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmak için bir çalışma yürütmüşlerdir. Sodyum/alüminyum ve silis/sodyum oksit oranları sırasıyla 0.85 ve 1.35 olarak belirlenmiştir. Elaty ve ark. (2017), hem Taguchi (tek yanıt) hem de ana bileşen (çoklu yanıt) yöntemini kullanarak fiber takviyeli geopolimer sistemin özelliklerini optimize etmek için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Ghanbari ve ark. (2017), merkezi kompozit tasarım yöntemini uygulayarak metakaolin bazlı geopolimer betonun özelliklerini optimize etmiş ve modellemişlerdir. Betonun kürleme sıcaklığı ve kimyasal bileşiminin hacimsel yoğunluğu ve basınç dayanımı üzerindeki etkisine odaklanmışlardır. Optimum kürleme sıcaklığının 67 °C, optimum Na₂O/SiO₂, SiO₂/Al₂O₃ ve H₂O/Na₂O oranlarının sırasıyla 0.20, 2.90 ve 3.75 olduğunu bulmuşlardır. Hadi ve ark. (2017), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer betonun karışım oranlarını fraksiyonel faktöryel tasarımıyla optimize etmeyi amaçlamışlardır. 0.35 alkali aktivatör/bağlayıcı içerik oranı, 2.5 SS/SH oranı, 450 kg/m³ bağlayıcı miktarı ve 14 M sodyum hidroksit konsantrasyonu ile 7 günlük maksimum basınç dayanımına ulaşmışlardır. Revathi ve ark. (2018), silis dumanının uçucu külün alkali aktivasyonu üzerindeki etkisine odaklanmışlardır. Optimize edilmiş

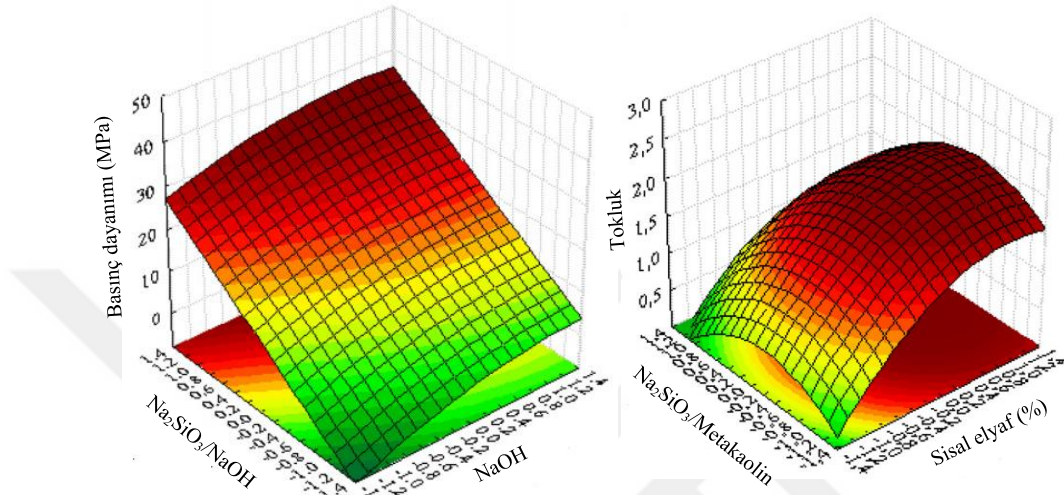
karışım oranının dayanım kazanımı, %5 silis dumanı ilavesinin mikroyapıyı ve dolayısıyla harcın basınç dayanımını %25 geliştirdiğini göstermiştir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Elde edilen optimum basınç dayanım değerleri (Revathi ve ark. (2018))

Zahid ve ark. (2018) geopolimer kompozitin mekanik ve çatlama sonrası özelliklerini tahmin etmek için tepki yüzey metodunu (TYM) kullanarak istatistiksel modeller geliştirmişlerdir. Bu bağlamda, üç temel değişken olan sodyum hidroksit molaritesi, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı ve kütleme sıcaklığının taze ve sertleşmiş geopolimerin özellikleri (priz süresi, basınç dayanımı, elastik modülü, eğilme dayanımı, eğilme tokluğu, süneklik indeksi, çekme dayanımı, ilk çatlak çekme dayanımı ve çekme şekil değiştirme kapasitesi) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Optimize edilmiş karışım oranı, çok amaçlı optimizasyon tekniği kullanılarak değerlendirilmiştir. Tahmin edilen ve deneysel sonuçlar arasındaki varyasyon %5'ten daha az olduğu için oluşturulan model ile sonuçların yakın bir uyum içinde bulunduğu görülmüştür. Iwamota ve ark. (2018), geopolimer betonda bir girdi değişkeni olarak uçucu kül-cüruf miktarının alkali çözelti miktarlarına oranını kullanmışlardır ve çalışmadaki çeşitli özellikleri optimize etmek için Taguchi yönteminin dinamik yaklaşımının uygunluğunu doğrulamışlardır. Silva Alves ve ark. (2019), uzun sisal elyaflarla güçlendirilmiş geopolimer hamur üreterek, tokluk ve elastisite modülü sonuçlarını karakterize etmişlerdir. Bu amaçla, metakaolin bir alüminosilikat kaynak malzemesi, sodyum silikat ve sodyum hidroksit kombinasyonu ise aktivatör çözeltisi olarak kullanılmıştır. İncelenen değişkenler kompozitteki liflerin yüzdesi, aktivatör miktarı ile kaynak malzeme arasındaki oran ve kütleme süresi olmuştur. Elde edilen sonuçları optimize etmek için tepki yüzey yönteminde merkezi birleşik planlamanın istatistiksel modeli kullanılmıştır ve son kompozitin mikro yapısını analiz etmek için

taramalı elektron mikroskobu analizi gerçekleştirilmiştir. 3.19 GPa elastisite modülü değeri, hacimce %5.15 sisal elyaf kullanılarak 24 gün kür ve 0.41 aktivatör/metakaolin oranı ile elde edilmiştir. Optimizasyon sonuçlarına göre 2.09 kJ/m² olan optimum tokluk değeri hacimce %5.19 lif kullanımı, 7 günlük bir kürlenme süresi ve 0.55'lik aktivatör/bağlayıcı oranı ile elde edilmiştir (Şekil 2.8).

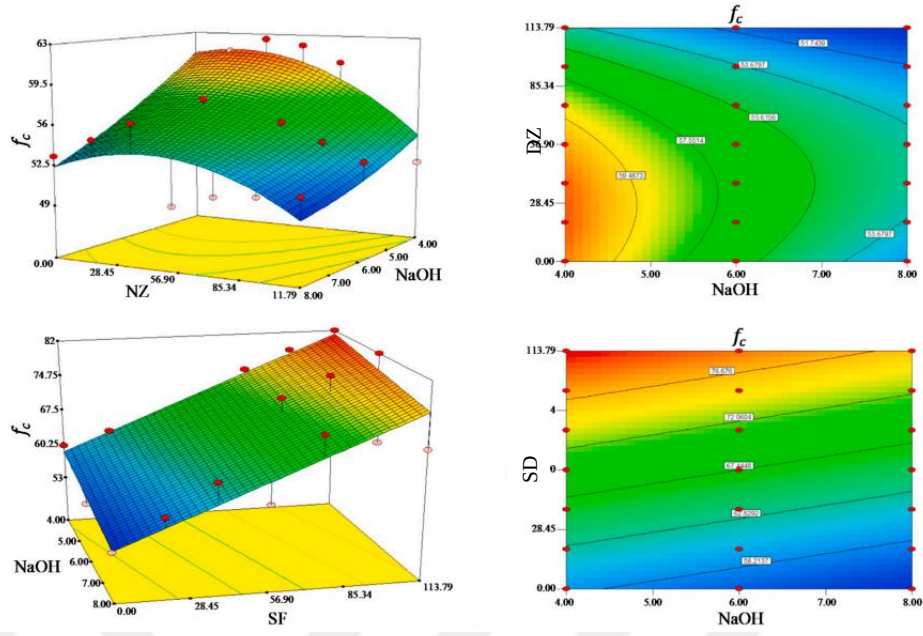


Şekil 2.8. Elde edilen optimum basınç dayanım ve Tokluk değerleri (Silva Alves ve ark. (2019))

Shahmansouri ve ark. (2020), geopolimer betonda (GB) kullanılan yüksek fırın cürufunun (YFC) % 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 oranlarında doğal zeolit (DZ) ve silika dumanı (SD) ile kısmen değiştirilmesinin, aynı zamanda, sodyum silikat çözeltisi ile birlikte farklı konsantrasyonlarda (4, 6 ve 8 M) sodyum hidroksit (NaOH) kullanımının basınç dayanım sonuçları üzerindeki etkisini deneysel bir araştırmayı ele almışlardır. Sonuçlar, artan NaOH konsantrasyonunun betonun basınç dayanımını düşürdüğünü göstermektedir. Bunun aksine, betona DZ ve SD eklenmesi basınç dayanımının artmasına neden olmuştur. Ek olarak, YFC esaslı GB'nin basınç dayanımını tahmin etmek amacıyla matematiksel modeller geliştirmek için gen ekspresyon programlama (GEP) kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar kullanılarak, YFC tabanlı GB için kapsamlı ve güvenilir bir basınç dayanımı veritabanı elde edilmiştir. Veritabanı, 117 farklı karışımdan üretilen 351 numunenin basınç dayanımı sonuçlarını içermektedir. En etkili beş parametre olan numunelerin yaşı, NaOH çözeltisi konsantrasyonu, DZ miktarı, SD miktarı ve GB'nin YFC içeriği, modelleme için girdi parametreleri olarak kabul edilmiştir. Sonuçlar, önerilen modellerin doğru olduğunu ve yüksek tahmin kabiliyetine sahip olduğunu göstermiştir.

Fakhrian ve ark. (2020), yüksek sıcaklıklara maruz kalan geri dönüştürülmüş beton agregası (GBA) içeren geopolimer harcın (GH) basınç dayanımını ve kütle kaybını tahmin etmek için gen ekspresyon programlama (GEP) kullanarak 20 model geliştirmişlerdir. Bunun için deneysel bir çalışma ile 32 farklı karışım tasarımından üretilen 160 numunenin sonuçları kullanılmıştır. Modellerin geliştirilmesinde, toplam veri setlerinin %80'i eğitim aşamasında geri kalan %20'si doğrulama aşamasında kullanılmıştır. Uygulanan sıcaklık (T), geri dönüştürülmüş beton agregası ikame oranı ve süper plastikleştirici (SP) ekleme yüzdesi olmak üzere üç girdi değişkeni dikkate alınmıştır. 0.95 ile 0.99 korelasyon katsayısına sahip eğitim ve doğrulama aşamaları, önerilen modellerin öngördüğü sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında uygun tutarlılık olduğunu göstermiştir. Ayrıca, istatistiksel analizlerin sonuçları, GEP'in yüksek sıcaklıklar altında geri dönüştürülmüş beton agregası içeren GH'ların hem basınç dayanımını hem de kütle kaybını tahmin etme kabiliyetini göstermiştir.

Shahmansouri ve ark. (2021), sodyum hidroksit (NaOH) konsantrasyonunun ve yüksek fırın cürufunun (YFC) doğal zeolit (DZ) ve silis dumanı (SD) gibi puzolanlarla ikamesinin geopolimer betonun (GB) mekanik özelliklerine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu amaçla, çeşitli GB karışımlarının basınç, eğilme ve çekme dayanımları ölçülmüştür. Ayrıca, puzolanik YFC tabanlı GB'nin basınç, eğilme ve çekme dayanımlarını maksimize etmek amacıyla tasarım değişkenlerinin optimum değerlerini elde etmek için tepki yüzey methodu (TYM) kullanılmıştır. Genel olarak sonuçlar, NaOH konsantrasyonunun artmasıyla basınç dayanımının azaldığını, NaOH konsantrasyonu 4 M ve 8 M'ye kıyasla 6 M olduğunda maksimum eğilme ve çekme dayanımlarının elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, DZ kullanımı YFC tabanlı GB'nin basınç, eğilme ve çekme dayanım değerlerini ağırlıkça %10'luk ikamede sırasıyla yaklaşık %4, %6 ve %20 oranlarında arttırmıştır. YFC'nin SD ile ikame edilmesi ise GB'nin dayanım, eğilme ve çekme dayanımlarını ağırlıkça %30 ikamede sırasıyla %30, %20 ve %25'e kadar iyileştirmiştir. Optimizasyon sonuçları, YFC'yi 60.29 kg (yani% 15.9) DZ ile değiştirerek ve 5.28 M NaOH kullanarak basınç, eğilme ve çekme dayanım değerleri açısından optimum üçlü koşulların elde edilebileceğini göstermiştir. Optimal koşullar, YFC'nin 113.79 kg (yani% 30.0) SD ile ikame edilmesi ve 6.19 M NaOH kullanılmasıyla da elde edilebilmiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Elde edilen optimum basınç dayanım sonuçları (Shahmansouri ve ark. (2021))

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan malzemeler, uçucu kül, sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltileri; pomza agregası, nehir kumu ve süper akışkanlaştırıcıdır. Şekil 3.1.'de kullanılan malzemelerin görüntüsüne yer verilmektedir.



Şekil 3.1. Kullanılan malzemelerin görüntüsü

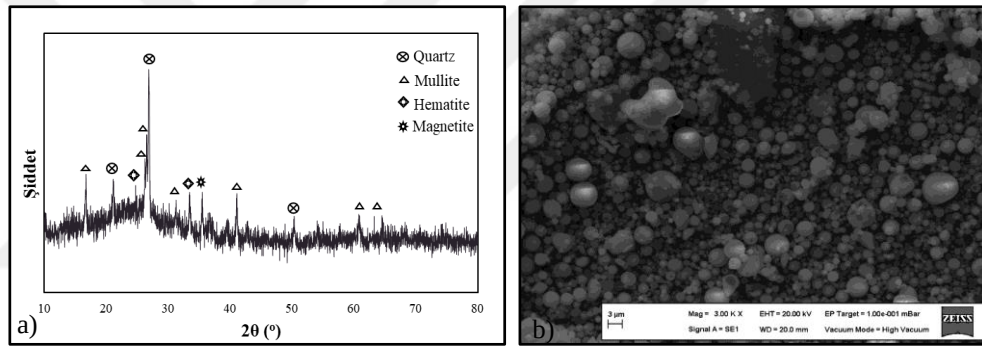
Çalışmada kullanılan uçucu kül Türkiye'nin Zonguldak ilinde bulunan Çatalağzı termik santralinden temin edilmiştir. X-ışını Floresans (XRF) analizi ile elde edilen uçucu külün kimyasal özellikleri ve kızdırma kaybı Çizelge 3.1.'de sunulmaktadır. Çizelge 3.1.'den de görüldüğü gibi SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oksit miktarlarının toplamı %70'in üzerindedir. Bu nedenle, ASTM C-618'e göre, bu çalışmada ana alüminosilikat kaynağı olarak kullanılan uçucu kül, F sınıfı olarak kategorize edilebilmektedir.

Çizelge 3.1. Uçucu külün kimyasal bileşimi (ağ. %)

Uçucu kül									
Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	KK*
Yüzde (%)	55.46	26.33	6.706	1.689	2.422	1.084	4.222	0.097	1.2

KK*: Kızdırma kaybı

Uçucu külün yoğunluk ve yüzey alanı ölçümü (BET) analizi ile elde edilen özgül yüzey alanı değerleri sırasıyla 2 kg/dm³ ve 2.018 m²/g olarak belirlenmiştir. Kullanılan uçucu külün XRD ve SEM analiz sonucu sırasıyla Şekil 3.2. (a) ve 3.2. (b)'de verilmiştir. Bu şekillerde uçucu külü oluşturan bileşenler ve uçucu kül tanelerinin boyutu görülmektedir. Yüksek oranda SiO₂ içerdiğinden quartz kristali en yüksek pik değerine sahiptir.



Şekil 3.2. Kullanılan uçucu külün a) XRD ve b) SEM analiz sonucu

%98 oranında saflık oranına sahip pelet formunda bulunan sodyum hidroksit kimyasal malzemesi Tekkim Kimya Sanayi Limited Şirketi'nden temin edilmiştir. Çalışmada 10 M, 12 M ve 14 M konsantrasyonlu sodyum hidroksit (SH) çözeltilerini hazırlamak için saf su kullanılmıştır. Sırasıyla 10 M, 12 M ve 14 M belirtilen molaritelerde bir litrelik çözelti üretmek için 400, 480 ve 560 gr miktarlarında SH peleti kullanılmıştır.

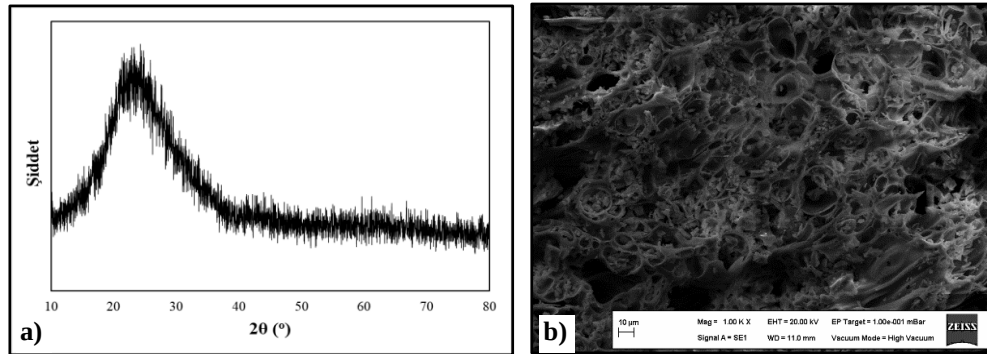
Kullanılan diğer bir kimyasal malzeme olan sodyum silikat (SS), Alde Kimya Sanayi Limited Şirketi'nden sıvı formda tedarik edilmiştir. SiO₂/Na₂O oranı (modül) 2.5 olan sıvı SS kimyasalı, %38.5 oranında katı malzeme ve %61.5 oranında sıvı malzemeden oluşmaktadır. SS alkali aktivatörünün katı kısmı %27.56 oranında SiO₂ ve %10.94 oranında Na₂O oksitini içermektedir. Deneysel çalışmada, kimyasal

reaksiyon sebebiyle oluşan ısıнын yayılmasını ve homojen bir alkali karışımının oluşumunu kolaylaştırmak için çeşitli molaritelere sahip SH çözeltileri ve SS alkali aktivatörünün karışımı bir gün oda sıcaklığında bekletildikten sonra numune üretiminde kullanılmıştır. Kullanılan aktivatörlerin özelliklerine Çizelge 3.2.'de yer verilmiştir.

Çizelge 3.2. Alkali aktivatörlerin özellikleri

Malzeme	Sodyum hidroksit	Sodyum silikat
Fiziksel görünüş	katı	SIVI
Renk	beyaz	Açık sarı
Molekül ağırlığı	40.00 g/mol	122.06 g/mol
Erime	323 °C	1088 °C
Muhafaza sıcaklığı	5°C-30°C	-

Hafif pomza agregası volkanik bir taş olup, Türkiye'nin Nevşehir şehrinden temin edilmiştir. Bazaltik pomza agregası, hızlı soğuma oluşum aşaması nedeniyle kabarcık ve delikler içerdiğinden gözenekli ve aynı zamanda pürüzlü bir dokuya sahiptir. PH değeri 7 civarında olan inert bir malzemedir. Pomza agregasının XRD ve SEM analiz sonucu Şekil 3.3. (a) ve 3.3. (b)'de verilmektedir.



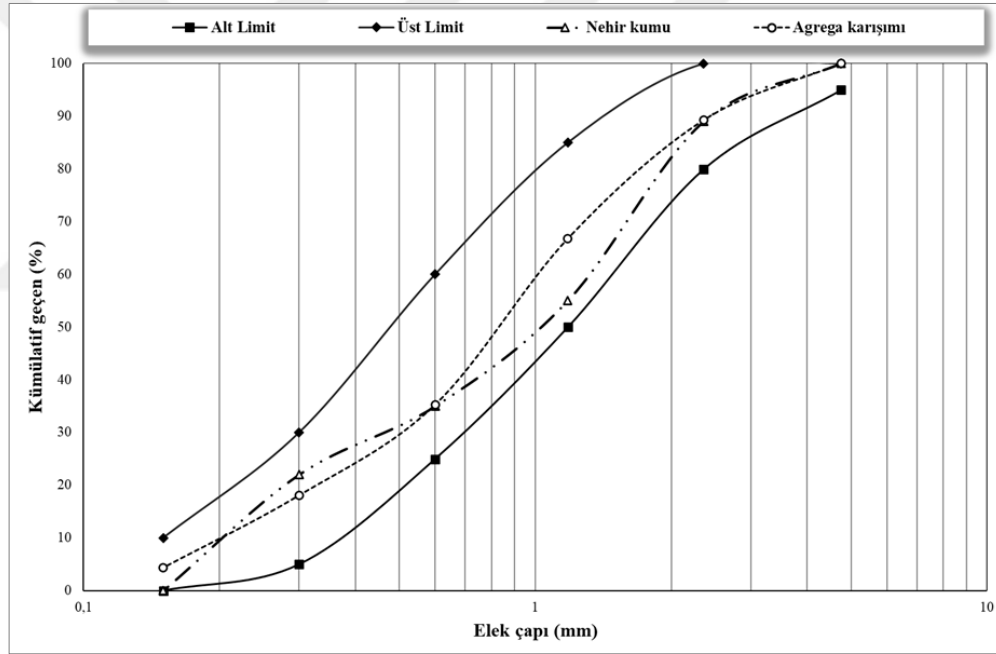
Şekil 3.3. Pomza agregasının XRD ve SEM analiz sonucu

Deneyisel çalışmada su emme değeri %26 ve incelik modülü 3.49 olan pomza agregasının doymun-kuru yüzey (DKY) hali kullanılmıştır. Agreganın özgül ağırlığı 1.2 olarak belirlenmiştir. Pomza agregasının kimyasal bileşimi Çizelge 3.3'te sunulmaktadır.

Çizelge 3.3. Pomza agregasının ve kumun kimyasal bileşenleri (ağ. %)

Oksit (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
Pomza agregası	70.14	16.44	1.01	0.74	0.2	3.17	4.32	0.15
Nehir kumu	96.39	1.69	0.21	0.15	0.25	0.05	0.23	1.03

Yerel olarak mevcut nehir kumunun özgül ağırlığı, incelik modülü ve su emme değerleri sırasıyla 2.72, 2.59 ve %1.4 olarak belirlenmiştir. Nehir kumunun kimyasal bileşimi Çizelge 3.3'te sunulmuştur. Kullanılan ince agrega karışımının (pomza agregası+nehir kumu) tane boyutu dağılımının grafiksel gösterimi, ASTM C33'te belirtilen üst ve alt limit ile birlikte Şekil 3.4.'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Agregaların elek analizi grafiği

Bu çalışmada kullanılan süper akışkanlaştırıcı, özgül ağırlığı 1.07 olan polikarboksilik-eter bazlı bir malzemedir. Süper akışkanlaştırıcı miktarı uçucu kül içeriğinin kütlece %1.5'i olarak belirlenmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Karışım parametreleri ve prosedürünün belirlenmesi

Karışım oranları belirlenmeden önce laboratuvarında bir ön çalışma gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, pomza agregasının yüksek gözenekli yapısı nedeniyle hacmindeki küçük değişikliğin bile, basınç dayanımı sonuçlarını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Bu nedenle, ACI 318'de yapı malzemeleri için önerilen minimum 17.2 MPa basınç dayanımı değeri dikkate alınarak hafif harç elde etmek için optimum pomza agrega miktarı belirlenmeye çalışılmıştır. Pomza agregası, toplam agrega hacminin %35'i oranında nehir kumu ile ikame edilmiştir. Çeşitli SH konsantrasyonlarının, SS/SH oranlarının ve alkali/uçucu kül (A/UK) oranlarının taze karışımların ve sertleşmiş hafif geopolimer harç numunelerinin mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak için on sekiz farklı karışım tasarlanmıştır.

Mevcut literatür geçmişine dayanarak (Khale ve Chaudhary, 2007; Hanjitsuwan ve ark., 2014; Sing ve ark., 2016; Huseien ve ark., 2017; Naghizadeh, ve Ekolu, 2019; Safari ve ark., 2020) hafif geopolimer harç karışımları için SS/SH oranları 2.5, 2 ve 1.5 olarak SH konsantrasyonları ise 10 M, 12 M ve 14 M olarak belirlenmiştir. Alkali çözelti ve uçucu kül miktarlarındaki değişimin harçların incelenen özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için A/UK oranı 0.45 ve 0.55 olan iki farklı durum incelenmiştir. Tercih edilen yüksek bağlayıcı içeriği nedeniyle fazladan su eklenmesine gerek kalmamıştır. Karışım oranlarının ayrıntıları Çizelge 3.4.'te verilmiştir.

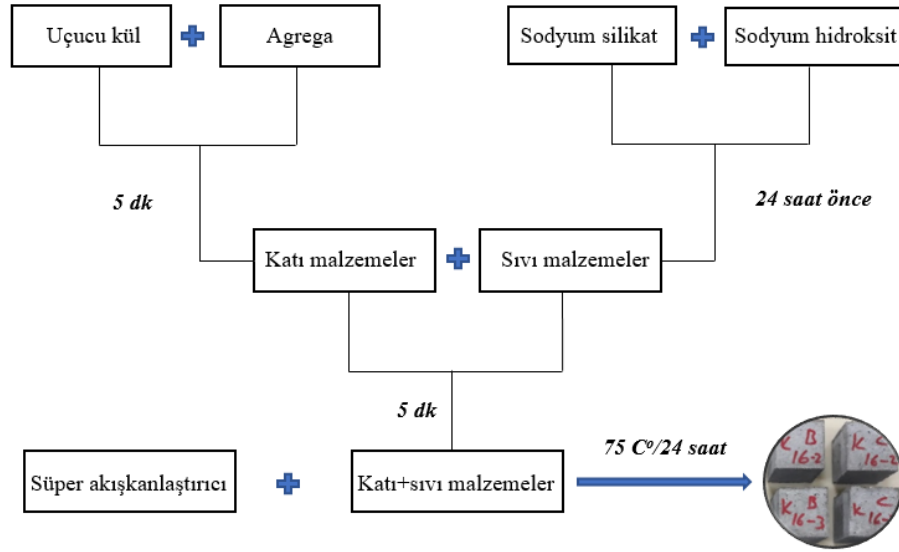
Çizelge 3.4. Karışım oranları

A/UK	SS/SH	SH [M]	SS (kg/m ³)	Kum (kg/m ³)	PA (kg/m ³)	S.a (kg/m ³)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Na ₂ O	H ₂ O/Na ₂ O	H ₂ O/Katı	Na ₂ O(%)	H ₂ O(%)
0.45	2.5	10	188.42	888	228	9.4	4.15	8.59	13.15	0.27	7.73	9.41
		12	188.42	893	230	9.4	4.15	8.09	12.20	0.27	8.20	9.34
		14	188.42	897	231	9.4	4.15	7.69	11.41	0.27	8.63	9.28
	2	10	175.86	887	228	9.4	4.11	8.20	12.81	0.28	8.01	9.62
		12	175.86	892	229	9.4	4.11	7.68	11.77	0.28	8.56	9.54
		14	175.86	897	231	9.4	4.11	7.25	10.92	0.27	9.07	9.47
	1.5	10	158.28	885	228	9.4	4.05	7.71	12.37	0.30	8.41	10.45
		12	158.28	891	229	9.4	4.05	7.15	10.93	0.28	9.07	9.81
		14	158.28	897	231	9.4	4.05	6.70	10.31	0.28	9.68	9.73
	2.5	10	215.44	873	225	8.8	4.27	7.43	13.49	0.32	9.20	10.87
		12	215.44	878	226	8.8	4.27	6.99	12.50	0.32	9.78	10.78
		14	215.44	883	227	8.8	4.27	6.63	11.68	0.32	10.31	10.71
0.55	2	10	201.08	872	224	8.8	4.23	7.08	13.13	0.33	9.55	11.11
		12	201.08	877	226	8.8	4.23	6.62	12.04	0.33	10.22	11.01
		14	201.08	883	227	8.8	4.23	6.24	11.16	0.32	10.84	10.92
	1.5	10	180.97	869	224	8.8	4.16	6.63	12.67	0.34	10.04	11.45
		12	180.97	876	225	8.8	4.16	6.14	11.47	0.34	10.85	11.33
		14	180.97	883	227	8.8	4.16	5.75	10.52	0.33	11.59	11.22

A:(Sodyum silikat+ Sodyum hidroksit) UK: Uçucu Kül PA:Pomza Agregası SS:Sodyum Silikat SH:Sodyum Hidroksit

[M]:Molarite S.a: Süper akışkanlaştırıcı

Tüm taze geopolimer karışımlarına sabit bir karıştırma prosedürü uygulanmıştır. Karıştırma işlemleri Harran Üniversitesi yapı malzemeleri laboratuvarında 15 litre kapasiteye sahip mikser kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nehir kumu ve pomza agregasının karıştırılmasından sonra uçucu kül ilave edilerek toplam 5 dakika tüm kuru malzemeler birlikte karıştırılmıştır. Daha sonra, 24 saat önceden karıştırılmış SH ve SS alkali aktivatörleri ve süperakışkanlaştırıcı kuru karışıma yavaş yavaş ilave edilerek yaklaşık beş dakika daha karıştırıldıktan sonra taze geopolimer harç karışımı, çeşitli test süreçlerinde kullanılacak numuneleri elde etmek için çelik kalıplara dökülmüştür. Hazırlanan karışımlar, pomza agregasının düşük yoğunluğundan dolayı ortaya çıkan yukarı doğru yükselme eğiliminden kaçınmak için çok kısa bir süre, yaklaşık 5 saniye kadar titreştirilmiştir. Bu çalışmada, boşluklu pomza agregasının geopolimer harcın mekanik özellikleri üzerindeki olumsuz etkisi de dikkate alınarak ısı ile kütleme gerçekleştirilmiştir. Karışımların hazırlanma prosedürünün şematik gösterimi Şekil 3.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Karışımların hazırlanma prosedürünün şematik gösterimi

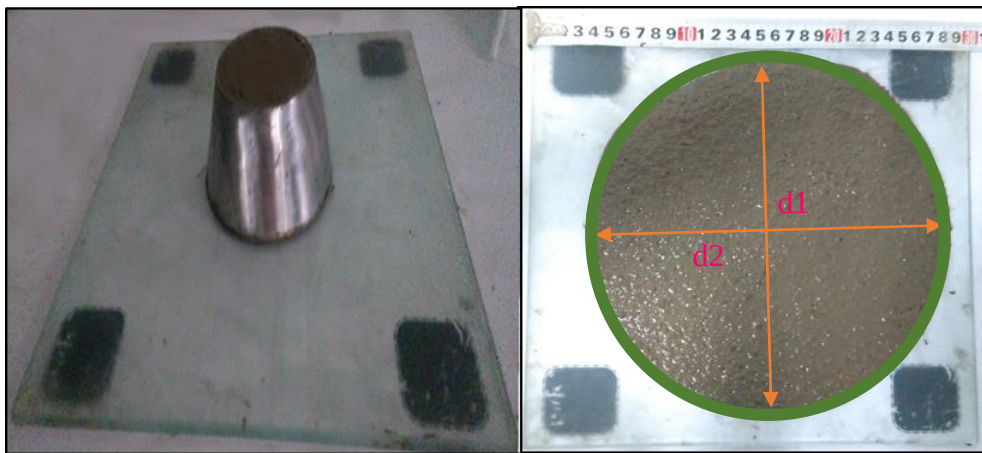
Daha yüksek basınç dayanımı değerleri elde etmek için uçucu kül bazlı geopolimer kompozitlerin ısıyla sertleştirilmesinin gerekliliği bilinmektedir (Vijai ve ark., 2010; Safari ve ark., 2020). Isıyla kürleme prosedürünü kullanmanın yerinde döküm uygulamaları için zorluk yarattığı gerçektir, ancak yüksek sıcaklıkla üretilen uygun mekanik özelliklere sahip geopolimer kompozitler prekast endüstrisindeki uygulamalar için üretilebilmektedir (Chindaprasirt ve ark., 2007; Naghizadeh, ve Ekolu, 2019; Saeli ve ark., 2019). Kürleme sıcaklığı ve ısı işlem süresi, yeterli ısı seviyesinin geopolimerizasyon reaksiyonuna olumlu etkisi dikkate alınarak 75 °C ve 24 saat olarak belirlenmiştir. Alkali sıvıların konsantrasyonlarını kontrol eden suyun buharlaşmasını önlemek için kürleme işleminden önce tüm numuneler plastik torbalar ile kapatılmıştır. Yüksek sıcaklıkta kürleme işleminden sonra numuneler test zamanına kadar 25 °C sıcaklık ve %50 nem oranına sahip oda şartlarında bekletilmiştir. Şekil 3.6.'da numunelerin hazırlanma aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3.6.Geopolimer harç numunelerin hazırlanması

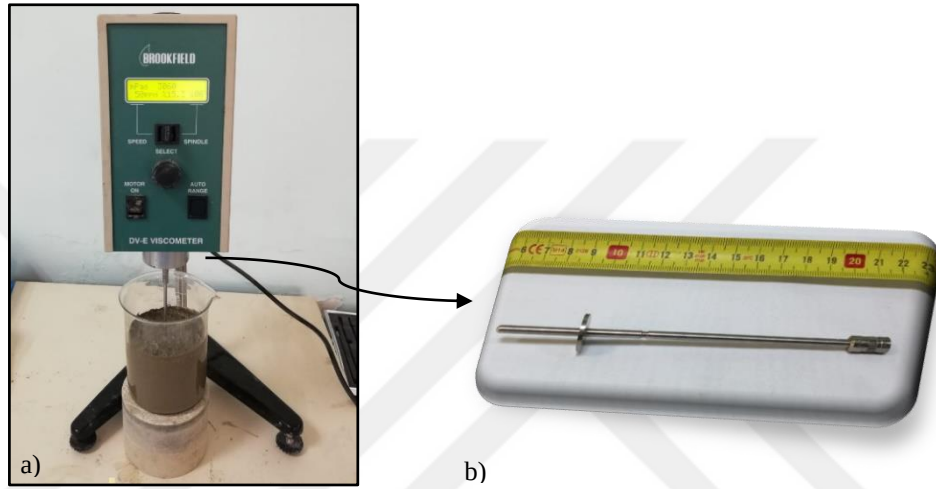
3.2.2. Kullanılan test yöntemleri

Taze geopolimer harç karışımları kalıplara dökülmeden önce taze özellikleri belirlenmiştir. Karışımların yayılma çaplarını elde etmek için, ASTM C1437'ye göre 70 mm üst çapı, 100 mm alt çapı ve 60 mm yüksekliği olan bir çelik koni kullanılarak çökme testi uygulanmıştır. Cam yüzey üzerindeki taze geopolimer harç karışımlarının birbirine dik iki çap değerlerinin (d_1 ve d_2) ortalaması, son yayılma çapı olarak kaydedilmiştir. Yayılma çapının belirlenmesi aşaması Şekil 3.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Yayılma çapının belirlenmesi

Taze geopolimer harçlar üzerinde yürütülen diğer araştırma, viskoz davranışlarının karakterizasyonu için bilgi sağlayan reoloji testi ile gerçekleştirilmiştir. Reolojik ölçümler, Brookfield Dijital viskometer DV-E cihazı kullanılarak RV/HA/HB-6 tip uç ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz ile farklı hızlarda görünen viskozite değerlerine ve bu viskozite sonuçlarına karşılık gelen kayma gerilmesi değerlerine ulaşmak mümkün olmuştur. Standart reometre cihazı ve kullanılan uç sırasıyla Şekil 3.8. (a) ve Şekil 3.8. (b)'de gösterilmiştir.



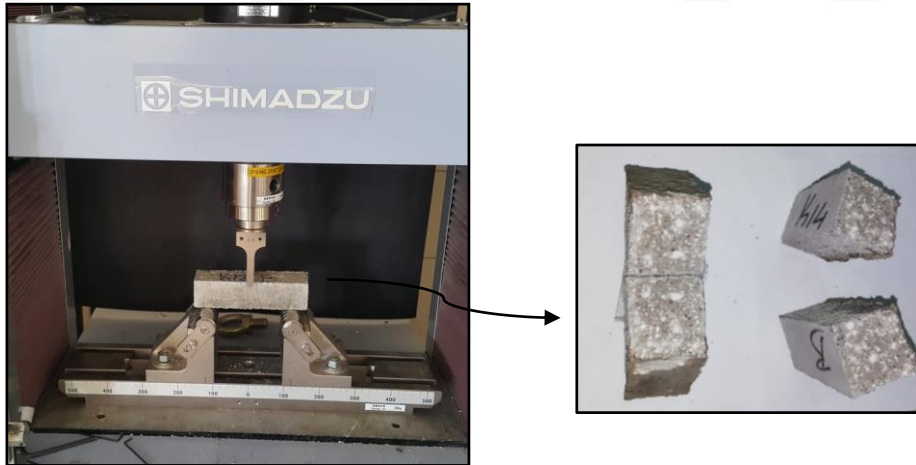
Şekil 3.8. a) Reometre cihazının fotoğrafı ve b) kullanılan uç

Basınç dayanımı değerleri ASTM C109/C109M-16a standardına göre ölçülmüştür. Basınç dayanımı testi için 50 mm boyutunda küp numuneler kullanılmıştır. Basınç dayanımı testi belirli günlerde uygulanmıştır. İlk test kalıptan çıkarma işleminden hemen sonra uygulanırken diğer test yaşları 7. ve 28. gün olarak belirlenmiştir. Her bir gün için basınç dayanımı değeri üç örnekten elde edilmiştir. Bu nedenle, tasarlanan her karışım için toplam dokuz numune üretilmiştir. Basınç dayanımı testi 3000 kN kapasiteli bir cihaz ile yapılmıştır. Test için 0.25 MPa/s'lik bir hız oranı dikkate alınmıştır. Kullanılan test cihazı Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.



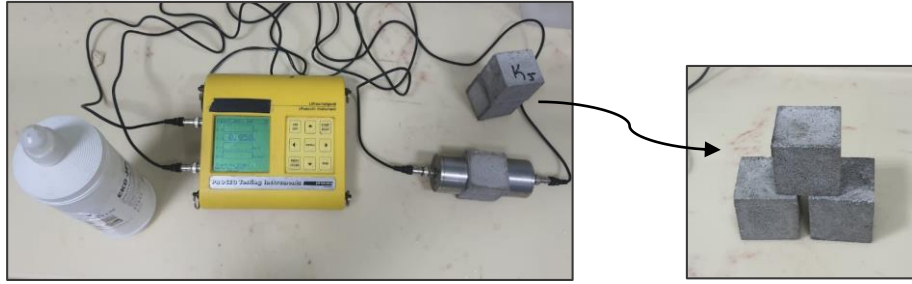
Şekil 3.9. Basınç dayanım tayini

Numunelerin eğilme dayanımı sonuçlarını belirlemek için uygulanan test ASTM C348-18 standardı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertleşmiş numunelerin eğilme dayanımı değerleri 40x40x160 mm boyutlarında prizma numuneleri ile belirlenmiştir. Üç prizma numunesinin ortalama eğilme dayanımı tüm test yaşları (1, 7 ve 28 gün) için nihai eğilme dayanımı sonucu olarak alınmıştır. Eğilme dayanımı ölçümü, 100 kN kapasiteli bir cihaz kullanılarak 1 MPa/dakika hız uygulanarak ölçülmüştür. Kullanılan test cihazı Şekil 3.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Eğilme dayanım tayini

Ultrasound geçiş hızı (UPV) testi ASTM C597-16 standardı dikkate alınarak yapılmıştır. UPV değerleri, 50x50x50 mm boyutuna sahip üç numune üzerinde ölçülmüştür. UPV test işlemi için yan yüzeyler kullanılmıştır. Sonuçları değerlendirmek için kaydedilen altı verinin ortalaması kullanılmıştır. Ultrasound geçiş hızı tespiti için kullanılan alet Şekil 3.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Ultrases geçiş hızı tespiti

Su emme deneyi, ASTM C642-13 standardına göre 28 günlük 50 mm boyutundaki üç küp numunesi kullanılarak belirlenmiştir.

Hafif geopolimer harçların su emme değerleri denklem 3.1 kullanılarak elde edilmiştir. W_k ve W_{dyk} , sırasıyla kuru numune ile suya doymuş numunenin ağırlığını temsil etmektedir.

$$\text{Su emme (\%)} : \frac{W_{dyk} - W_k}{W_k} \times 100 \quad (3.1)$$

Numunelerin birbiriyle bağlantılı boşluk yapısı hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla, kılcal su emme testi uygulanmıştır. Kılcal su emme testi ASTM C 1585 standardına uygun olarak her karışım için üç harç numunesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin dört tarafı 2 cm yüksekliğe kadar parafin ile kaplanmış ve böylece sadece taban yüzeyinden su akışına izin verilmiştir.

Birim alan için numuneler tarafından emilen su miktarı ve karşılık gelen süreye dayanan grafikte, verilerden geçen en iyi eğri çizilmiş ve her karışım için çizginin eğiminden kılcal katsayı elde edilmiştir. Prosedürü içeren formül denklem 3.2.'de verilmiştir. I ; birim alan başına emilen su hacmini (mm^3/mm^2), a ; ilk emilen su miktarını (mm^3/mm^2), t ; geçen süreyi (dk) ve S ; kılcallık katsayısını ($\text{mm}/\text{dk}^{0.5}$) temsil etmektedir.

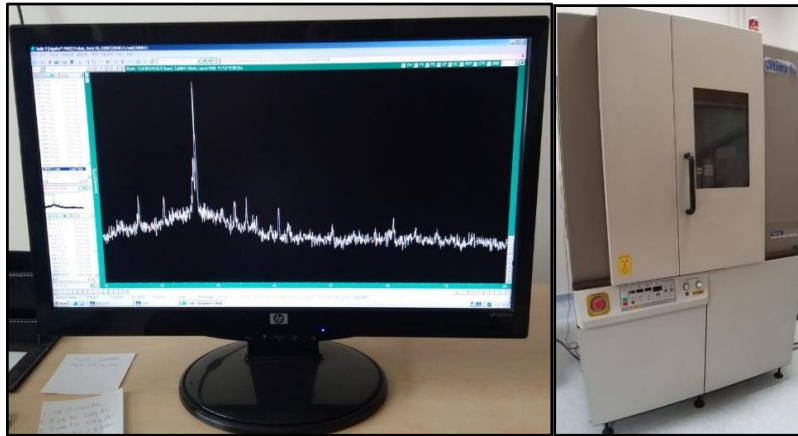
$$I = a + S \times t^{0.5} \quad (3.2)$$

Kuruma rötre ölçümü, ASTM C596(2009) standardına göre 25×25×285 mm boyutlu numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kalıptan çıkarılan numuneler, ölçüm işlemi için 25 °C ve %50 nem durumuna sahip odaya yerleştirilmiştir. Prizmatik numunelerin ortalama uzunluk değişimi 90 gün süreyle kaydedilmiştir. Otojen rötre değerlerine, numunelerin kurumasını engellemek için plastik örtü ile kaplanmış farklı iki prizma çubuğunun ortalama değeri kullanılarak ulaşılmıştır. Rötre okumalarının gerçekleştirildiği cihaz ve numuneler Şekil 3.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Rötre değerlerinin tayini

Numunelerin minerolojik özelliklerini araştırmak için X-ışını difraktometresi (XRD) analizi yapılmıştır. XRD taraması Rigaku ultima III difraktometresi kullanılarak 40 kV, 30 mA'da, 0.154 nm'lik monokromatik Cu-Ka Radyasyonu (λ) ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sırasında 1 s/adımlık bir tarama hızı ve 10°-80° (2 θ) tarama aralığı benimsenmiştir. XRD analizinin gerçekleştirildiği cihaz Şekil 3.13.'te gösterilmiştir.



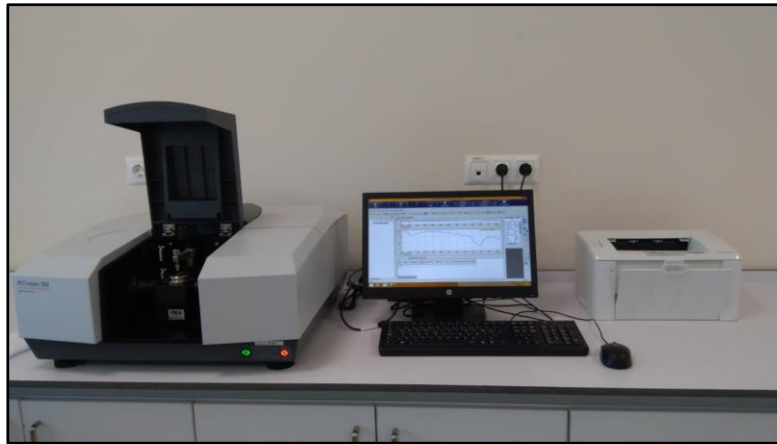
Şekil 3.13. XRD cihaz görüntüsü

Sertleşmiş numunelerin morfolojik yapılarını elde etmek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Hafif geopolimer harçların mikro yapısı, Zeiss EVO 50 XVP ekipmanı (Şekil 3.14.) ile karakterize edilmiştir.



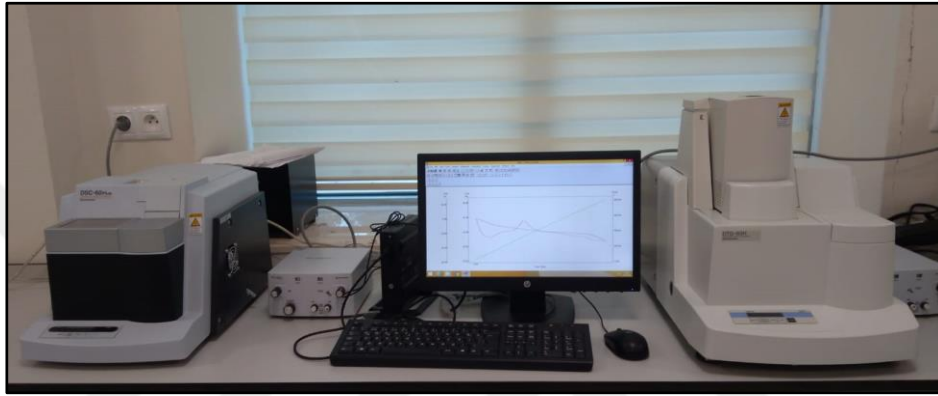
Şekil 3.14. SEM cihazı ekipman görüntüsü

Hafif geopolimer harç numunelerinin kimyasal özelliklerini araştırmak için Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektrometre (FTIR) yöntemi kullanılmıştır. FTIR analizi SHIMADZU IRTracer 100 cihazı ile $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ aralığında absorpsiyon spektrumları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FTIR analizinin gerçekleştirildiği cihaz Şekil 3.15.'te gösterilmiştir.



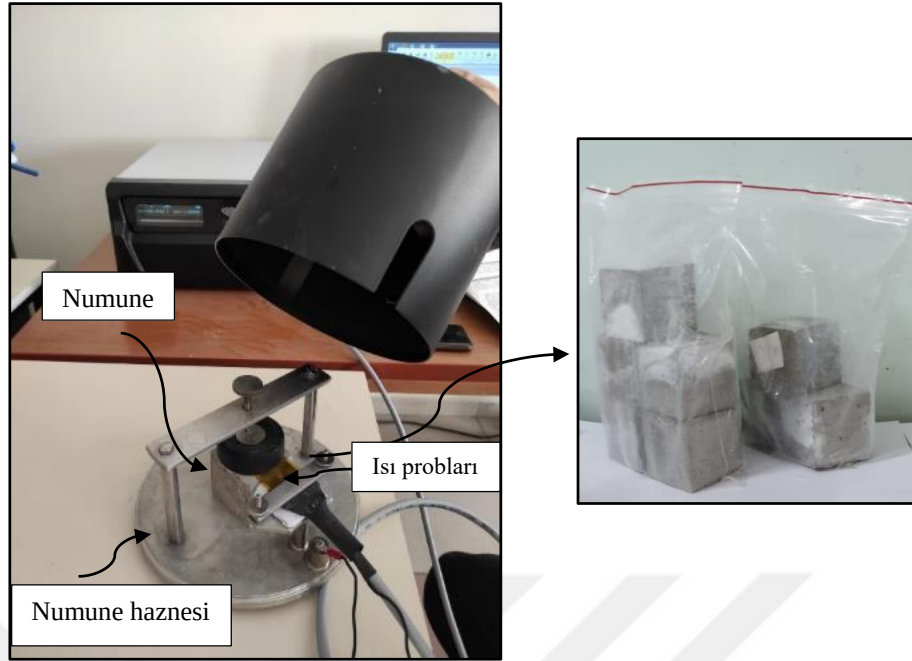
Şekil 3.15. FTIR analizi deney seti

Her bir karışım için hafif geopolimer harç numunelerinin sıcaklık değişimini ve ağırlık kaybını elde etmek için diferansiyel termal analizi (DTA) ve Termogravimetrik analizi (TGA) gerçekleştirilmiştir. Böylece kullanılan pomza agregasının ve farklı oranlarda kullanılan parametrelerin sıcaklık etkisi altında fiziksel ve kimyasal davranışı incelenmiş olacaktır. DTA ve TGA eğrileri, 30 °C ile 1000 °C arasında 10 °C/dk'lık bir ısıtma hızıyla Diferansiyel termo gravimetrik analizatör (DTG-60H, Shimadzu, Japonya) kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 3.16.).



Şekil 3.16. TGA/DTA ekipman görüntüsü

Termal iletkenlik testi, Şekil 3.17.'de gösterildiği gibi tek taraflı bir yöntemle TPS 500 S Hot Disk Thermal Constants Analyzer ile her karışım için üç adet 50 mm küp kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Isıl iletkenlik ölçümlerinde iki farklı yöntem kullanılmıştır. İlk durumda, numuneler ortam sıcaklığında bir gün suda tutulmuş ve ardından ölçümler suya doymuş bir durumda gerçekleştirilmiştir. İkinci durumda numuneler üzerindeki ölçümler, nemi uzaklaştırmak için fırında kurutulduktan sonra ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Cihazın ölçüm aralığı, doğruluk ve tekrarlanabilirlik değerleri sırasıyla 0.03-100 W/mK, %5 ve %2'dir. Seçilen ölçüm süresi ve 50 Hz güç hattı frekansı ile her örnek için güç hattı döngü sayısı 4'tür. Böyle bir ölçüm için, geçici temas teknikleri, özellikle Hot Disk veya Gustafsson Probe geliştirilmiştir.



Şekil 3.17. TPS 500 S Hot Disk Termal Sabitler Analizatörü

Çoklu doğrusal regresyon (ÇDR), kullanılan en yaygın istatistiksel analiz yöntemlerinden biridir. Bu yöntem ile birden fazla bağımsız değişken varlığında istenilen çıktı parametresi tahmin edilebilmektedir. ÇDR, verilerin korelasyonunu ve yönlülüğünü analiz etme, modeli tahmin etme, yani eğriyi uydurma, modelin geçerliliğini ve kullanılabilirliğini değerlendirme biçiminde üç aşamadan oluşur. İstatistiksel anlamlılığı temsil eden p değerinin 0.05'ten küçük olması halinde kullanılan değişkenlerin modelin oluşturulmasında yer alması uygun bulunmaktadır.

Geleneksel yöntemler ile çözümü uzun zaman alan karışık problemlerin daha kısa sürede sonuçlandırılması amacıyla farklı yöntemlere başvurulmuştur. Genetik algoritma (GA) yöntemi kısa sürede kabul edilebilir sonuçlar sunan ve gelişim mekanizmasını referans alan bir yöntemdir. Genetik algoritmalar; mutasyon, çaprazlama ve seçim gibi biyolojik olayları ilham alan operatörlere güvenerek problemleri optimize etmek ve yüksek kaliteli çözümler üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Genetik algoritmanın nasıl çalıştığı şu şekilde özetlenebilmektedir: Algoritma, rastgele bir ilk popülasyon oluşturarak başlar, daha sonra bir dizi yeni popülasyon oluşturur ve her adımda, algoritma bir sonraki popülasyonu oluşturmak için mevcut nesildeki bireyleri kullanır. Gen ekspresyon programlaması (GEP) ile

istenilen alanda ulaşılan veriler ve tahmin modelleri kullanılarak farklı çözümler elde edilebilmektedir.

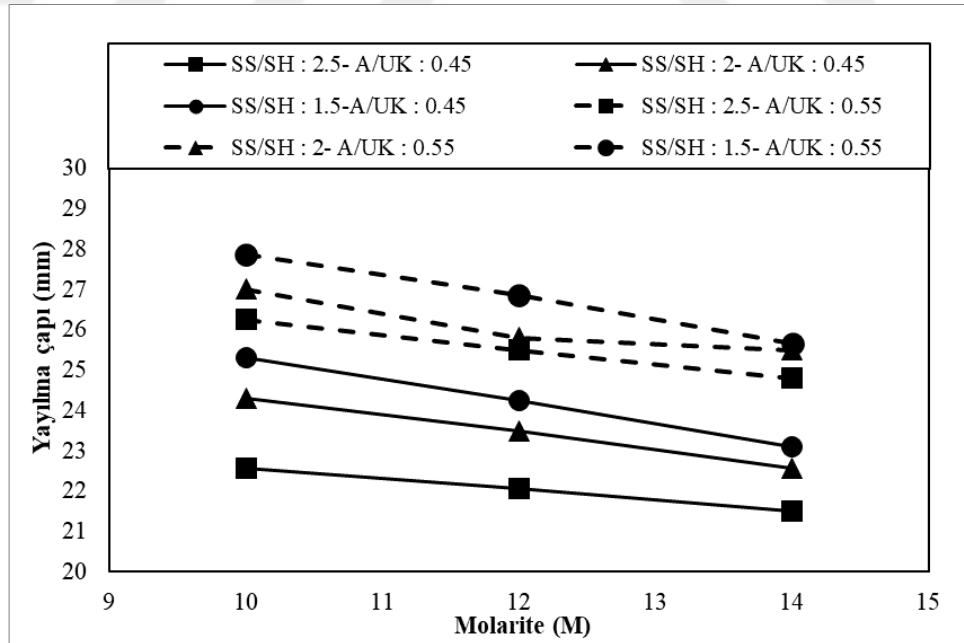
Taze, fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özellikleri dahil olmak üzere çok amaçlı fonksiyonla tanımlanan hedefleri içeren tasarım uygulamalarının çoğunda çoklu eşzamanlı optimizasyonlar gereklidir. Bu tür problemler, çok amaçlı optimizasyon olarak bilinir ve daha önce yapı malzemelerinin araştırma alanlarında kullanılmıştır. Çok amaçlı optimizasyon (ÇAO) minimize veya maksimize edilecek birden fazla hedef işlevi içerir ve cevap, rekabet eden hedefler arasındaki en iyi değiş tokuşu tanımlayan bir dizi çözümden oluşmaktadır. Box ve Wilson 1951'de deneylerin optimizasyonu için tepki yüzey metodunu (TYM) önermişlerdir ve şu anda birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. TYM; ilgili bir yanıtın çeşitli değişkenlerden etkilendiği problemlerin modellemesi, analizi için yararlı olan matematiksel ve istatistiksel tekniklerin toplamıdır ve amaç bu yanıtı optimize etmektir. TYM'deki ilk adım, yanıt ile bağımsız değişkenler kümesi arasındaki gerçek işlevsel ilişki için uygun bir yaklaşım bulmaktır. Tek amaçlı ve/veya çok amaçlı optimizasyonu içeren optimizasyon problemlerinde uygulanan pratik tekniklerden biri, çeşitli yanıtların minimum ve maksimum istenirliğini içeren arzu edilebilirlik fonksiyonlarını kullanmaktır. Arzu edilebilirlik işlevi, hedefin aralığın dışında olması ve tam başarıya ulaşmasına bağlı olarak 0 ile 1 arasında değişkenlik göstermektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Taze Özellikler

4.1.1. İşlenebilirlik

Taze geopolimer harçların akışkanlık özellikleri mini slump testi ile belirlenmektedir. Şekil 4.1. farklı SH molariteleri, SS/SH oranları ve A/UK oranları için karışımların yayılma çapı sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi taze harçların akışkanlığı A/UK oranının 0.45'ten 0.55'e yükseltilmesi ile artmıştır. Örneğin 0.45 A/UK oranına sahip karışımlar arasında en yüksek yayılma çapı değeri 25.3 cm olarak elde edilirken, 0.55 A/UK oranı ile hazırlanan karışım için 27.85 cm olarak ölçülmüştür. Sonuçlar, çözelti/bağlayıcı oranının geopolimerlerin akış özellikleri üzerindeki etkisini araştıran çalışmalarla aynı doğrultudadır (Sathonsaowaphak ve ark., 2009; Jumrat ve ark., 2011; Najimi ve ark., 2018).



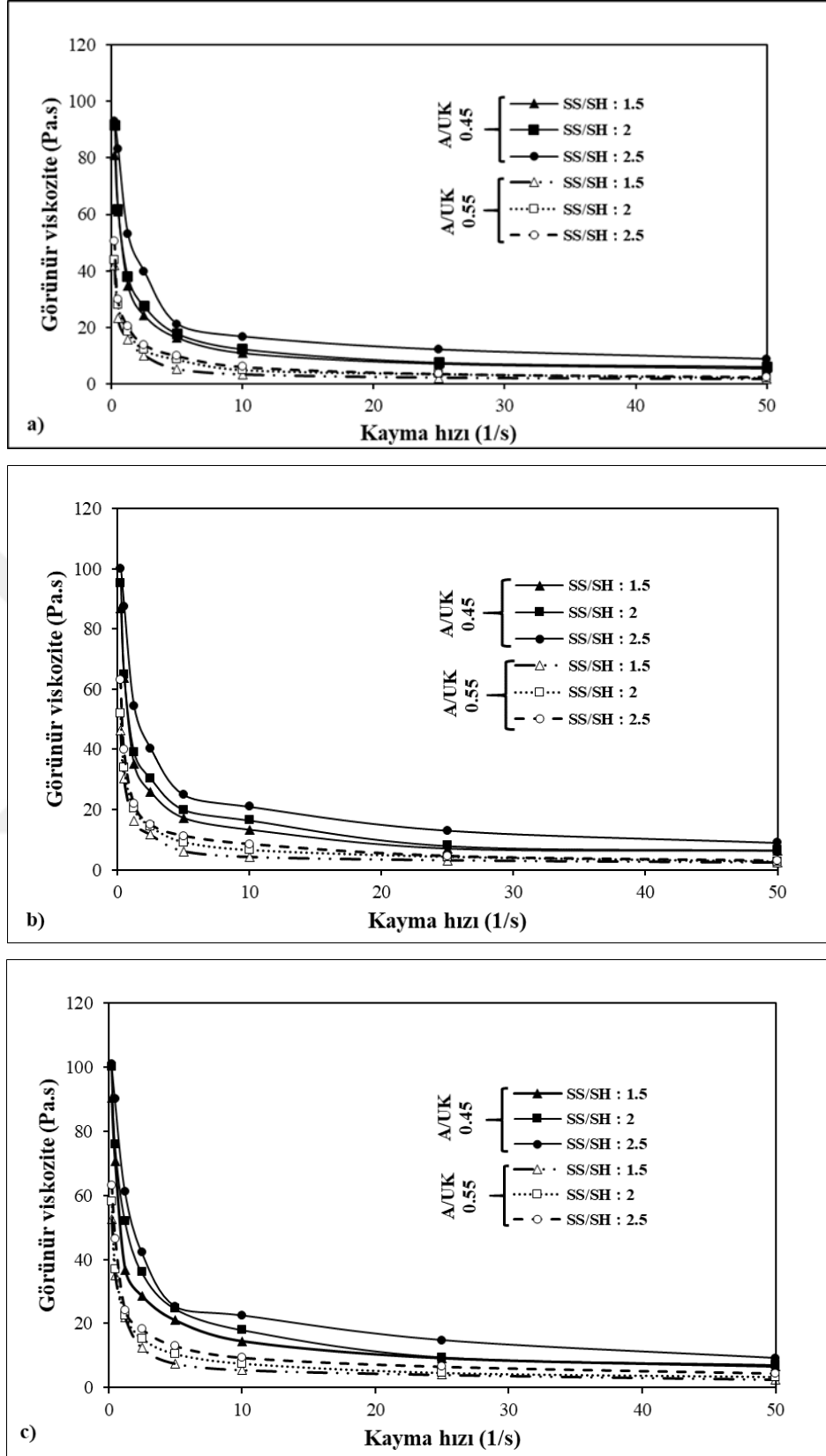
Şekil 4.1. Yayılma çapı değerleri

Üç farklı SH molaritesinin etkileri incelendiğinde, daha yüksek SH konsantrasyonunun daha az akışkanlıkla sonuçlandığı da gözlenmiştir. Bunun başlıca nedeni, SH çözeltisindeki katı içeriğin artması ve A/UK oranına ve SS/SH oranına bağlı olmaksızın Na_2O miktarındaki artışla geopolimerizasyon reaksiyonunun hızlanmasıdır (Görhan ve Kürklü, 2014; Malkawi ve ark., 2016). Daha düşük yayılma çapı, karışımdaki su içeriğinin azalmasına da bağlanabilir. Sonuçlar göz önüne alındığında, en yüksek azalma %8.7 ile SH konsantrasyonu 10 M'den 14 M'ye değiştirildiğinde, 1.5 SS/SH oranı ve 0.55 A/UK oranında elde edilmiştir. Herhangi bir SH molaritesinde ve A/UK oranında SS/SH oranının yükseltilmesi, SS çözeltisinin yüksek viskozitesinden dolayı karışımların yayılma çapı değerlerini düşürmüştür. Ayrıca sonuçlardan SS/SH oranının, 0.55 A/UK ile karşılaştırıldığında 0.45 A/UK oranı için harçların akışkanlığı üzerinde daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Örneğin, Şekil 4.1.'de SS/SH oranının 2.5'ten 2'ye düşmesi halinde 0.55 A/UK oranı için akışkanlık sonuçlarının sınırlı oranda değiştiği görülmektedir.

4.1.2. Reoloji sonuçları

Akışkan malzemeler Newtonian ve Newtonian olmayan akışkanlar olarak kategorize edilir ve viskozite ile akma gerilmesi değerleri malzemelerin reoloji performansını temsil eden iki ana parametredir. Bu nedenle, malzemelerin akışkanlık eğilimini yansıtan kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki ilişkiyi daha iyi anlamak için bir akış eğrisi çizilmektedir.

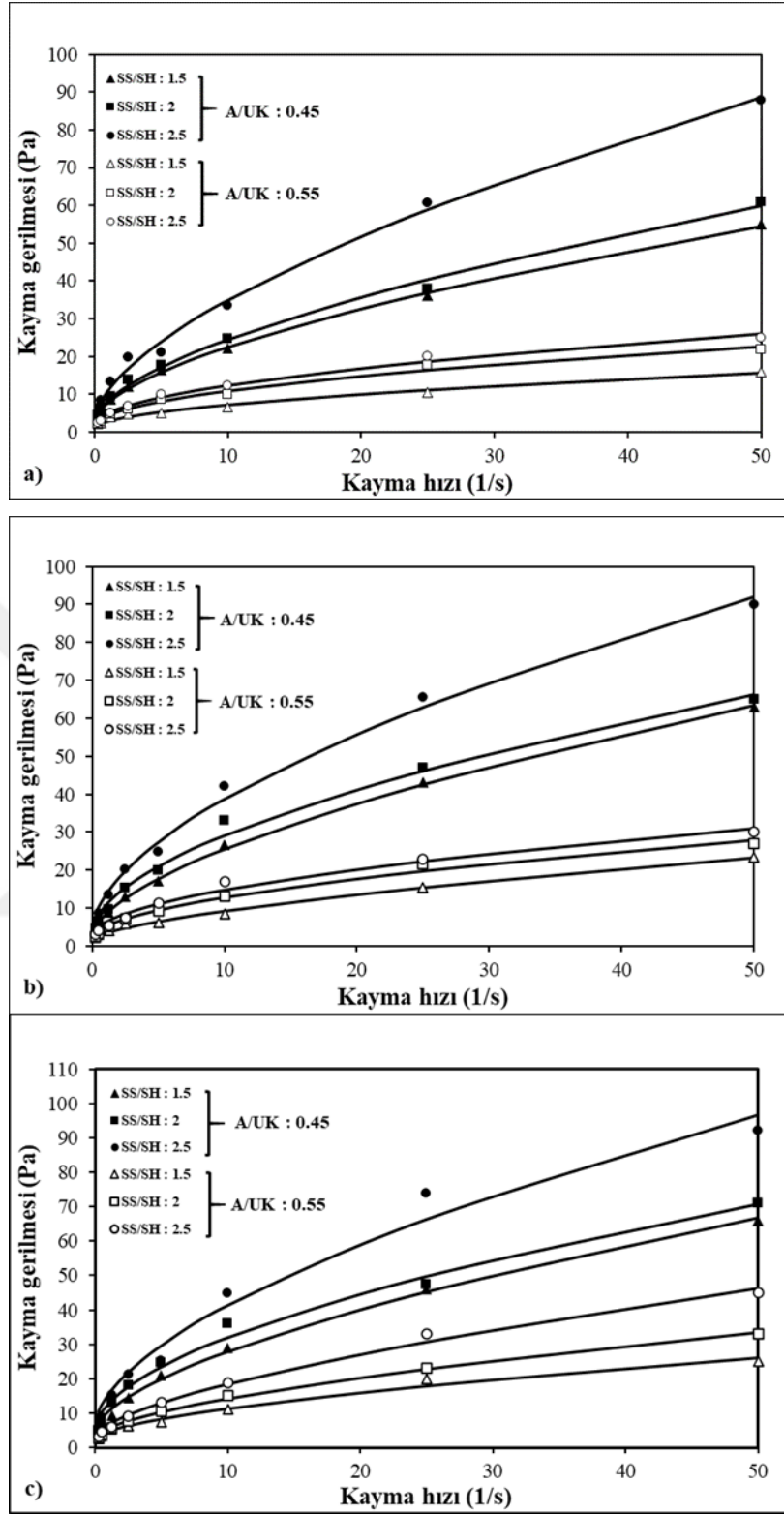
Çalışmanın bu bölümünde, SS/SH oranı, A/UK oranı ve NaOH çözeltisinin molaritesi gibi çeşitli parametrelerin hafif geopolimer harçların reoloji parametreleri üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Viskozite değerleri, bir sıvının yüzey gerilmesi altında akmaya karşı direncini temsil etmektedir. Şekil 4.2. 10 M, 12 M ve 14 M SH molariteleri için farklı kayma hızlarında hafif geopolimer harçların viskozite değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.2. Taze harçların farklı kayma hızlarına denk gelen görünür viskozite değerleri (a) 10 M SH konsantrasyonu (b) 12 M SH konsantrasyonu ve (c) 14 M SH konsantrasyonu

A/UK oranının 0.45'ten 0.55'e yükselmesi, tüm karışımlarda viskozite değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Bu sonuç önceki çalışmalarla da doğrulanmıştır (Nehdi ve Rahman, 2004; Yahia ve ark., 2016; Güllü ve ark., 2019). Karışımlardaki su içerikleri, çözelti miktarı arttıkça artmaktadır ve sonuç olarak kompozit sistemde partiküllerin dağılmasına neden olmaktadır. Bu durum, taneler arasındaki sürtünmenin azalmasının viskozite değerlerini azalttığı anlamına gelmektedir. SS alkali aktivatörünün viskozitesi, SH çözeltisinininkinden daha yüksektir. Bu bilgiye göre, Şekil 4.2.'de görülebileceği gibi, artan SS/SH oranı, A/UK oranına bağlı olmaksızın taze karışımlar için daha yüksek görünen viskozite değerleri ile sonuçlanmıştır. Şekil 4.2. (a)'da 10 M SH molaritesi ve 0.45 A/UK oranı için SS/SH oranları 2 ve 1.5 olan karışımların viskozite değerleri arasında küçük farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu eğilim, 12 M ve 14 M SH konsantrasyonları için farklıdır. 0.45 A/UK oranı için çeşitli SS/SH oranlarına göre görünen viskozite değerleri arasındaki fark daha açık görünmektedir (Şekil 4.2. (b) ve Şekil 4.2. (c)).

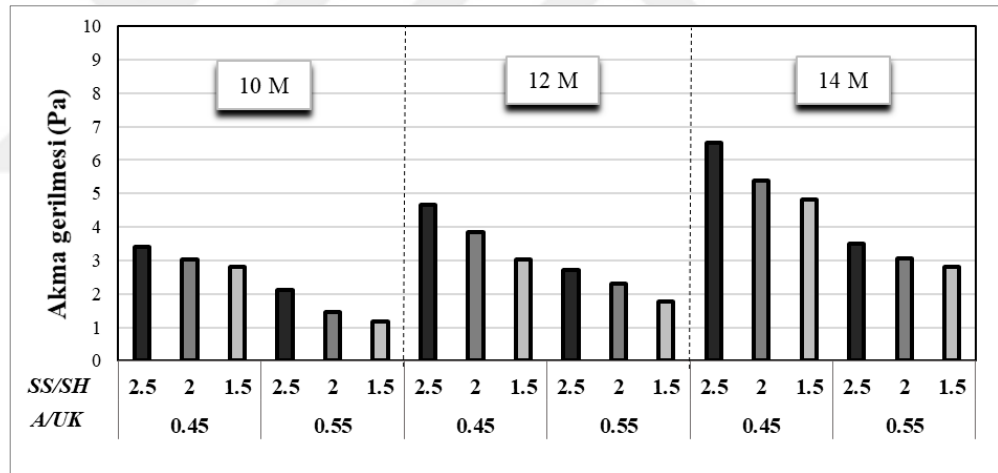
Şekil 4.3. farklı SS/SH oranları, SH molariteleri ve A/UK oranlarını dikkate alan kayma hızlarına karşı taze hafif geopolimer karışımların kayma gerilmesi değerlerini göstermektedir. Kayma hızındaki bir artış, tüm karışımlar için kayma gerilmesi değerlerinde artış eğilimi yaratmıştır. Bu davranışa reoloji terminolojisinde "kayma incelmesi" davranışı denmektedir. Kayma incelmesi, artan kayma hızlarında viskozitenin azalmasını temsil eden doğrusal olmayan bir davranıştır. Davranışın akış diyagramı, kayma gerilmesinin artan kayma hızıyla artması eğilimindedir. Şekil 4.3.'te görüldüğü gibi artan SS/SH oranı hafif geopolimer harçlar için kayma gerilmesinin artmasına yol açmaktadır. Ayrıca, SH molarite artışının tüm SS/SH ve A/UK oranları için kayma gerilmesi değerlerinde bir artışa neden olduğu da görülmüştür.



Şekil 4.3. Taze harçların farklı kayma hızlarına denk gelen kayma gerilmesi değerleri (a) 10 M SH konsantrasyonu (b) 12 M SH konsantrasyonu ve (c) 14 M SH konsantrasyonu

Şekil 4.3. incelendiğinde, 0.45 A/UK oranında 2.5 SS/SH oranının diğer SS/SH oranlarına kıyasla kayma gerilme değerleri üzerindeki etkisinin, tüm SH molariteleri için daha yüksek olduğu sonucuna varılabilmektedir. Bu sonucun, birincil geopolimer jelin gelişimine katkıda bulunan yüksek $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir (Puertas ve ark., 2014). Ayrıca, SS aktivatör viskozitesinin SH çözeltisinininkinden daha yüksek olması da bu sonucu destekler niteliktedir. A/UK oranı 0.55 olan karışımlar için SS/SH oranındaki değişimin kayma gerilmesi değerleri üzerindeki etkisinin, 10 M ve 12 M SH konsantrasyonlarında 14 M SH molaritesine kıyasla daha az olduğu görülmüştür (Şekil 4.3. (a), 4.3. (b), ve 4.3. (c)).

Akış eğrilerinden elde edilen akma gerilmesi değerleri Şekil 4.4.'te gösterilmiştir. Amaç çeşitli SS/SH oranlarının, A/UK oranlarının ve SH molaritelerinin akma gerilmesi değerleri üzerindeki etkisini tespit etmektir.



Şekil 4.4. Taze geopolimer harçların akma gerilmesi değerleri

Şekil 4.4.'ten, akma gerilmesi sonuçları üzerindeki en etkili parametrenin karışımların A/UK oranlarının olduğu gözlenmiştir. Sonuç, karışımlardaki su miktarının artması nedeniyle beklendiği gibidir. Şekilde ayrıca, artan SH molariteleri ile akma gerilmesi değerlerinin de arttığı gözlenmiştir. SH konsantrasyonundaki artış uçucu külün çözünmesini hızlandırarak geopolimerizasyon ürünleri oluşmasına olanak sağlamıştır (Palacios ve ark., 2008). Rifaai ve ark., 2019 tarafından gerçekleştirilen çalışmada da, 7 M SH konsantrasyonuna kadar benzer sonuçlar elde edilmiştir. Akma gerilmesi değerlerini değiştiren ana parametrelerden birinin akışkanın viskozitesi

olduğu iyi bilinmektedir (Flatt ve Bowen, 2006; Lowke, 2009; Vance ve ark., 2014). Bu nedenle, artan SS çözelti miktarı SH çözeltisinin daha düşük viskozitesinden dolayı akma gerilmesi değerlerinin artmasına neden olmuştur. SS/SH oranının akma gerilmesi sonucu üzerindeki etkisinin, özellikle 0.55 A/UK oranında çok az olduğu gözlenmiştir. Bu bulgu, SH çözeltisine kıyasla daha yüksek viskoziteye sahip SS çözeltisinin etkisini engelleyen su miktarının artmasıyla ilişkilendirilebilir. Karışımların ayrıntılı akma gerilmesi (C_0) değerleri de Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Herschel-Bulkley model parametreleri değerleri

<i>A/UK</i>	<i>Molarite</i>	<i>SS/SH</i>	<i>C_o</i>	<i>k^a</i>	<i>n^b</i>	<i>(R²)^c</i>
0.45	10 M	2.5	3.393	7.5795	0.6184	0.9953
		2	3.02	5.3142	0.6059	0.9960
		1.5	2.81	4.9103	0.6019	0.9986
2.5		2.12	3.0393	0.5257	0.9868	
2		1.45	2.9095	0.5064	0.9867	
1.5		1.16	1.7473	0.5386	0.9852	
0.45	12 M	2.5	4.652	8.8834	0.5845	0.9930
		2	3.832	6.9271	0.5623	0.9904
		1.5	3.015	5.5415	0.6106	0.9989
2.5		2.7	3.5564	0.5309	0.9820	
2		2.32	2.9057	0.5573	0.9885	
1.5		1.76	1.633	0.6603	0.9942	
0.45	14 M	2.5	6.513	8.9254	0.5911	0.9781
		2	5.384	7.3717	0.5583	0.9874
		1.5	4.82	5.532	0.6178	0.9947
2.5		3.5	3.3436	0.6515	0.9919	
2		3.06	2.6384	0.6241	0.9949	
1.5		2.82	2.0131	0.6248	0.9828	

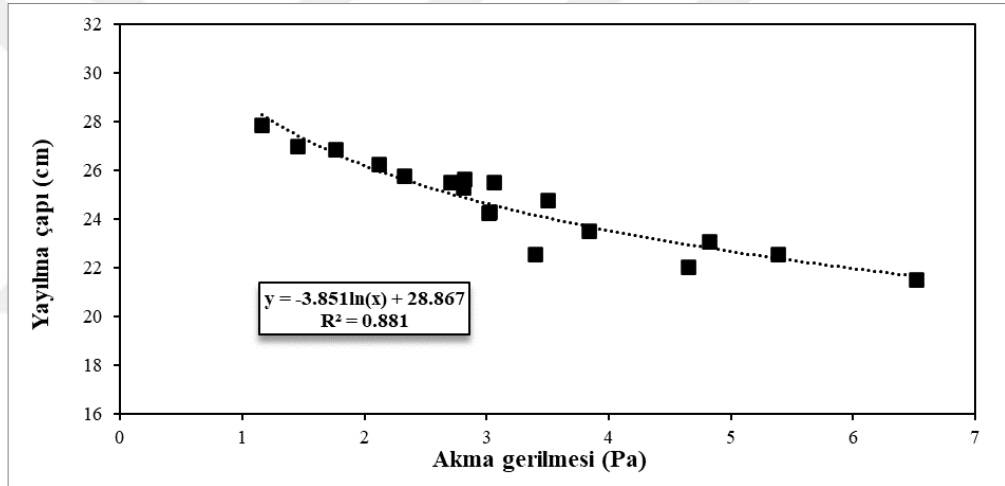
a: sabitlik *b*: akışkanlık indeksi *c*: korelasyon katsayısı

Reolojik davranışı analitik olarak değerlendirmek için, yukarıda bahsedilen veriler Herschel ve Bulkley, (1926) modeli ile uyumlu hale getirilmiştir. Çizelge 4.1. sırasıyla akma gerilmesi, tutarlılık ve akışkanlık indeksini tanımlayan Herschel Bulkley denklemindeki (4.1.) C_0 , k ve n parametrelerini göstermektedir. Tüm

karışımlar için n parametresi 1'den küçük olarak elde edilmiş ve bu durum Herschel Bulkley modelindeki kayma incelmeleri davranışını doğrulayan nitelikte olmuştur.

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n \quad (4.1)$$

Şekil 4.5., tüm karışımların akma gerilmesi ve yayılma çapı değerleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Karışımların işlenebilirliğini izleyen iki parametre arasında iyi bir ilişki olduğu eğilimden de görülmektedir. Ayrıca şekil, yüksek akma gerilmesi değerlerinin yayılma testinde çoğunlukla daha az deformasyona karşılık geldiğini göstermektedir.



Şekil 4.5. Akma gerilmesi ile yayılma çapı arasındaki ilişki

4.1.3. Birim ağırlık sonuçları

Hafif geopolimer harçların birim ağırlıkları, diğer testler uygulanmadan önce her bir karışım için belirlenmiştir. Çizelge 4.2., karışımların 1., 7. ve 28. günlerdeki taze ve sertleşmiş birim ağırlık değerlerini içermektedir. Karışımların taze birim ağırlık değerleri 1921-1966 kg/m³ arasında değişmiştir. Sertleşmiş numuneler için birim ağırlık sınır değerleri kullanılan farklı parametre oranlarına göre 1., 7. ve 28. günde sırasıyla 1855-1935 kg/m³, 1853-1932 kg/m³ ve 1846-1904 kg/m³ olarak bulunmuştur. Çizelge 4.2.'den, artan SH molaritelerinin beklendiği gibi artan katı miktarına bağlı olarak karışımların birim ağırlık değerlerinde artışa neden olduğu gözlenmiştir.

Ayrıca, A/UK oranının azalması, karışımların daha düşük birim ağırlık değerlerine sahip olmasını sağlamıştır. Bu, SS aktivatörünün SH çözeltisine kıyasla yüksek birim ağırlık değerine sahip olması ile ilişkilendirilebilir. Ayrıca, A/UK oranındaki artışa bağlı olarak karışımlardaki uçucu kül içeriğindeki azalma numunelerin birim ağırlık değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Hafif geopolimer harçların yaşlarının 1. günden 28. güne çıkmasıyla sertleşmiş numunelerin birim ağırlık değerlerinde hafif bir düşüş belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. Hafif geopolimer harçların birim ağırlık değerleri (kg/m³)

Karışım oranları				1. gün	7. gün	28. gün
A/UK	SS/SH	SH Molarite	Taze			
0.45	2.5	10 M	1952	1912	1910	1899
		12 M	1957	1927	1920	1913
		14 M	1959	1934	1929	1919
	2	10 M	1952	1907	1902	1895
		12 M	1956	1921	1916	1911
		14 M	1964	1935	1932	1929
	1.5	10 M	1950	1897	1893	1883
		12 M	1954	1914	1908	1904
		14 M	1966	1935	1932	1923
0.55	2.5	10 M	1932	1868	1865	1862
		12 M	1939	1886	1882	1871
		14 M	1942	1894	1889	1884
	2	10 M	1924	1858	1854	1848
		12 M	1936	1882	1878	1870
		14 M	1942	1894	1891	1881
	1.5	10 M	1921	1855	1854	1846
		12 M	1935	1878	1877	1871
		14 M	1944	1890	1884	1880

4.2. Mekanik Özellikler

4.2.1. Basınç dayanımı

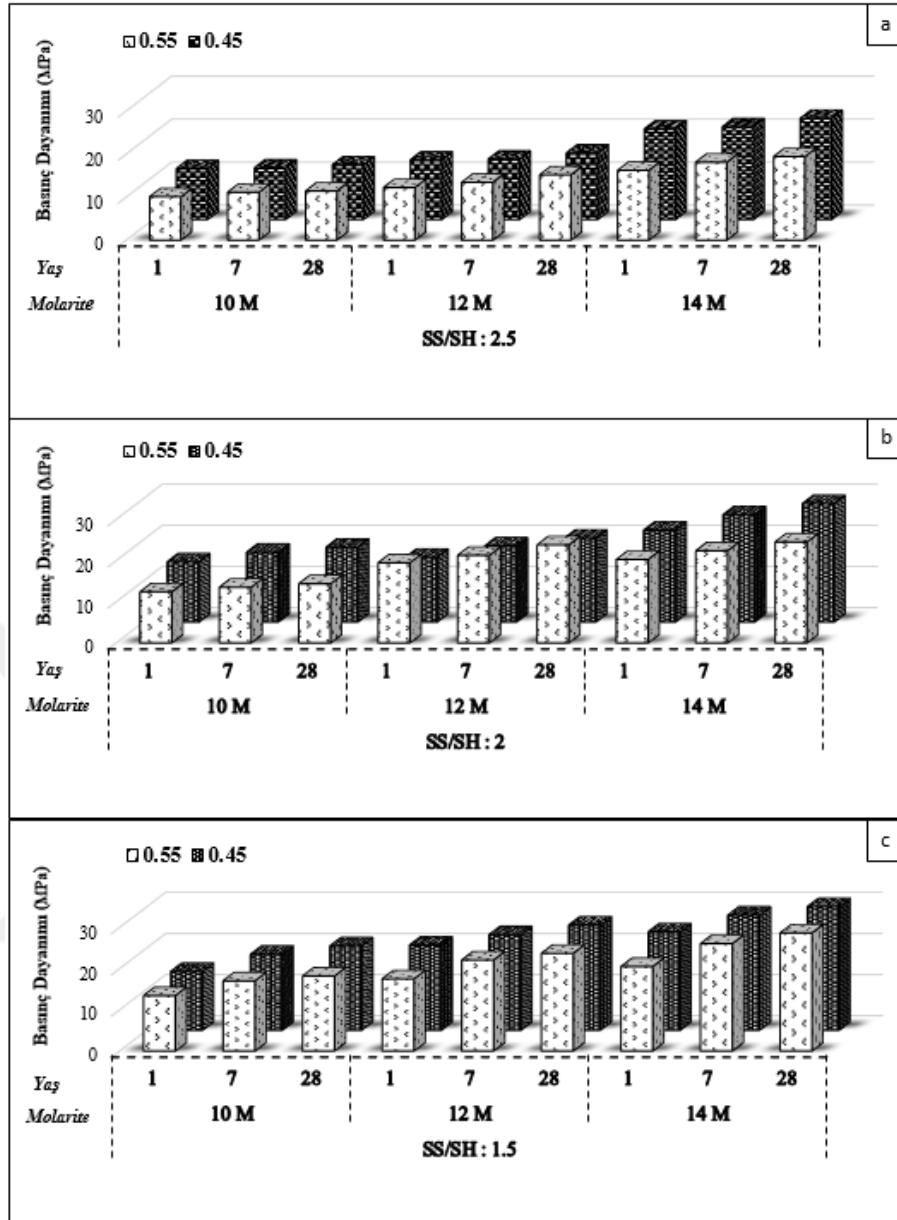
Çizelge 4.3., çeşitli SS/SH oranlarında farklı SH molariteleri ve A/UK oranları için küp numuneler üzerinde test edilen basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir.

Çizelge 4.3. Hafif geopolimer harçların basınç dayanımı değerleri (MPa)

A/UK	SS/SH	SH [M]	1. gün	7. gün	28. gün
0.45	2.5	10 M	11.86	12.02	12.72
		12 M	13.87	14.06	15.47
		14 M	21.03	21.56	23.52
	2	10 M	14.64	16.99	18.19
		12 M	15.75	18.52	20.37
		14 M	22.33	26.1	28.81
	1.5	10 M	14.26	18.42	20.46
		12 M	20.66	23.21	25.53
		14 M	23.87	27.94	30.74
0.55	2.5	10 M	10.07	11.1	11.41
		12 M	12.21	13.41	15.15
		14 M	16.21	18.07	19.38
	2	10 M	12.41	13.5	14.35
		12 M	19.47	21.27	23.8
		14 M	20.27	22.38	24.52
	1.5	10 M	13.42	17.01	18.21
		12 M	17.5	22.08	23.69
		14 M	20.49	26.05	28.65

Şekil 4.6. (a), 1, 7 ve 28 kürlenme yaşlarında 2.5 sabit SS/SH oranı için iki A/UK oranına sahip hafif geopolimer harç numunelerinde üç farklı SH konsantrasyonunun basınç dayanımı sonuçları üzerindeki etkisini grafiksel olarak göstermektedir. 0.45 ve 0.55 A/UK oranlarının her ikisinde de en yüksek basınç dayanımı değerlerine her yaşta 14 M en yüksek SH konsantrasyonu ile ulaşıldığı görülmektedir.

Artan SH molaritesinin hafif geopolimer harçların dayanım gelişimi üzerindeki olumlu etkisi, daha fazla miktarda uçucu kül partikülünün çözünmesi ile açıklanabilir. Geopolimerlere odaklanan çalışmalarda yazarlar tarafından benzer sonuçlara ulaşılmıştır (Wongpa ve ark., 2010; Lee ve Lee, 2013; Gebregziabiher ve ark., 2015; Phoo-ngernkham ve ark., 2015; Kaur ve ark., 2018).



Şekil 4.6. Basınç dayanımı sonuçları, (a) SS/SH:2.5, (b) SS/SH:2 ve (c) SS/SH:1.5

Tüm numuneler için artan yaşla birlikte devam eden geopolimerizasyon reaksiyonu dolayısıyla artan reaksiyon ürünü oluşumu sonucunda daha yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. 0.45 ve 0.55 A/UK oranları için 7 günlük basınç dayanımı gelişim aralığı sırasıyla %1.35-29.17 ve %8.78-27.13 arasında değişmiştir. 0.45 A/UK oranı için basınç dayanımı sonuçlarındaki artış 1-28 gün arasında 2.5, 2 ve 1.5 SS/SH oranları için sırasıyla %7.15, %20.89 ve %33.65'tir. 0.55 A/UK oranı için ise 1-28 gün arasında basınç dayanımı değerlerinin artışı sırasıyla %12.07, %14.37 ve %28.16 olarak belirlenmiştir. 0.45 A/UK oranı için en düşük dayanım değerleri 10 M,

12 M ve 14 M SH konsantrasyonlarında sırasıyla 12.72, 15.47 ve 23.52 MPa'dır. 0.55 A/UK oranı için ise bu değerler sırasıyla 11.41, 15.15 ve 19.38 MPa olarak elde edilmiştir. Artan A/UK, oranı SH konsantrasyonu değişiminden bağımsız olarak daha düşük basınç dayanımı sonuçlarının elde edilmesine yol açmıştır. Bu durumun sebebinin, artan aktivatör çözelti miktarına bağlı olarak H_2O/Na_2O oranının artmasının istenmeyen etkisi olduğu varsayılabilir. Önceki çalışmalarda da benzer sonuçlar belirtilmiştir (Hadi ve ark., 2017; Najimi ve ark., 2018). 2.5 sabit SS/SH oranında A/UK oranının 0.45'ten 0.55'e yükseltilmesinin, 10 M ve 12 M'ye kıyasla 14 M SH molaritesi ile hazırlanan hafif geopolimer harçların basınç dayanımı değerlerinde daha fazla azalmaya neden olduğu sonucuna da varılmıştır.

Şekil 4.6. (b) ve 4.6. (c), artan SH konsantrasyonunun ve A/UK oranındaki azalmanın hem 2 hem de 1.5 SS/SH oranları için basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, SH molaritesi 12 M ve SS/SH oranı 2 olan karışım için A/UK oranının 0.55'ten 0.45'e düşürülmesi ile dayanım değerinde azalma meydana gelmiştir. Bu sonuç, geopolimerizasyon aşamasının karmaşık yapısı ve pomza agregası ile matris fazı arasında bulunan arayüz yapısı ile açıklanabilir. Karışımlarda artan çözelti miktarının basınç dayanımı değerleri üzerindeki olumlu etkisi üzerine benzer bir sonuç önceki çalışmalarda da sunulmuştur (Nath ve Sarker, 2017; Kaur ve ark., 2018).

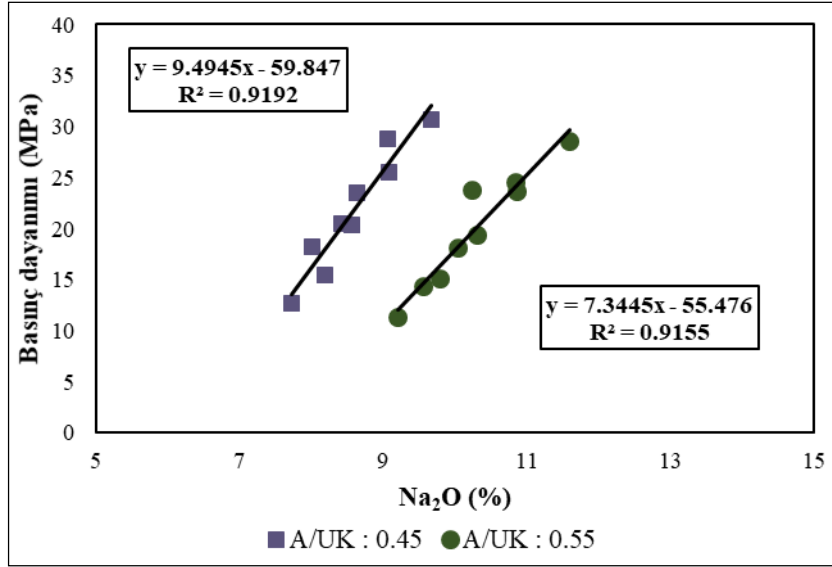
Şekil 4.6. (b), 2 SS/SH oranında, 0.55 A/UK oranı için 10 M'den 12 M'ye SH molaritesi artışıyla önemli bir dayanım artışı elde edilirken, 0.45 A/UK oranı için en yüksek dayanım artışı SH konsantrasyonunun 12 M'den 14 M'ye yükseltilmesi ile elde edilmiştir. Bu eğilim, 1.5 SS/SH oranı için dayanım sonuçlarını gösteren Şekil 4.6. (c)'de daha farklı olmuştur. Her iki A/UK oranları için molarite değişiminin dayanım değerleri üzerindeki etkisi yakın olmuştur.

Şekil 4.6. (a), Şekil 4.6. (b) ve 4.6. (c) karşılaştırıldığında, SS/SH oranındaki artışın basınç dayanımı sonuçlarında bir düşüşe neden olduğu görülmüştür. SS/SH oranı 2.5'ten 2'ye düştüğünde %43 oranında olan en yüksek basınç dayanımı artışı 0.45 A/UK oranında 10 M SH molarite ile elde edilmiştir. 0.55 A/UK oranı için ise bu değer

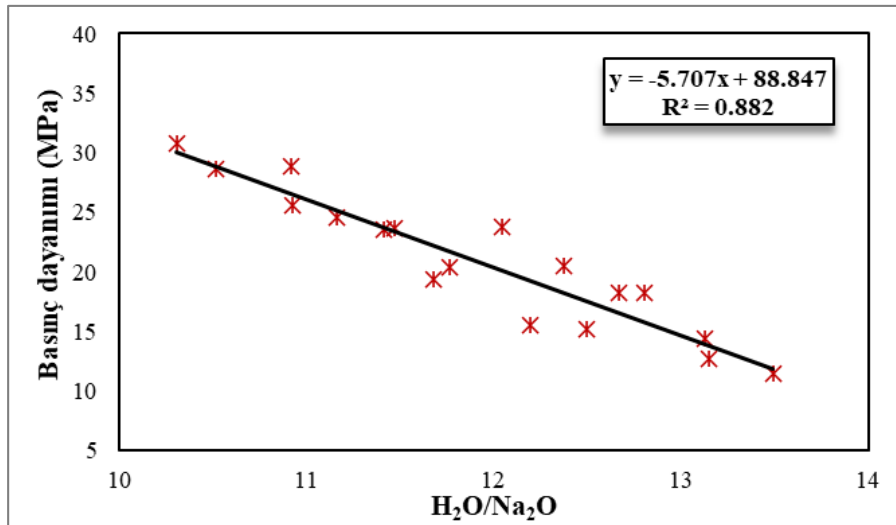
12 M SH molaritesi ile %57.1 olarak belirlenmiştir. Literatürde benzer (Lee ve Van Deventer, 2002; Hadi ve ark., 2010; Dao ve ark., 2019; Villa ve ark., 2019) veya zıt sonuçları (Salih ve ark., 2014; Hadi ve ark., 2017; Mohseni, 2018) içeren çalışmalara da ulaşmak mümkündür. Bu çalışmada elde edilen eğilim, SiO_2 içeriğindeki artış ve Na_2O içeriğindeki azalma ile ilişkilendirilebilir. Luukkonen ve ark., (2018) tarafından daha önce bahsedildiği gibi, oksitler ve basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişki farklı faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir.

Bu bölümde ayrıca, bazı oksit oranlarının basınç dayanımı üzerindeki etkisi sunulmuştur. Na_2O içeriği, $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{H}_2\text{O}/\text{katı}$ malzemeler ve $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oksit oranlarının etkisi korelasyonlarla açıklanmıştır. Tercih edilen yüksek uçucu kül içeriği ve yeterli A/UK oranları nedeniyle karışımlarda ilave su kullanımına gerek duyulmadığından H_2O içeriği (uçucu külün kütlece % 'si), SH ve SS alkali çözeltisindeki toplam su miktarını temsil etmektedir.

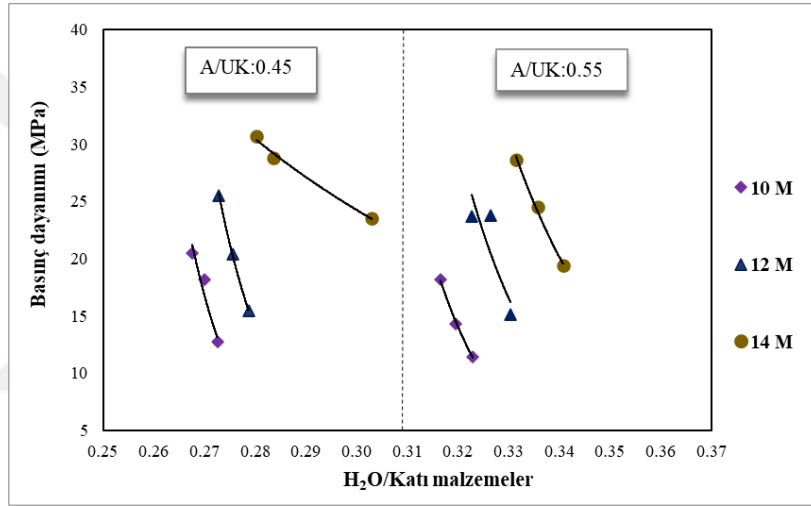
Şekil 4.7., tüm karışımların Na_2O içeriği (uçucu kül kütlelerine göre %) ve 28 gün için elde edilen basınç dayanımı sonuçları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. İki parametre arasında iyi bir doğrusal korelasyon olduğu açıktır. Karışımlarda Na_2O içeriğinin artması, basınç dayanımının artması ile sonuçlanmıştır. Ayrıca, trendler incelendiğinde ilgili R^2 sonuçları hem 0.45 hem de 0.55 A/UK değerleri için oldukça yakın olarak elde edilmiştir. 0.45 A/UK oranı için karışımların Na_2O değerleri %7.726-9.677 arasında ve karşılık gelen basınç dayanımı değerleri 12.72-30.74 MPa arasında değişmiştir. Benzer şekilde, 0.55 A/UK oranı için % Na_2O içeriği ve karşılık gelen basınç dayanımı sonuçları aralıkları sırasıyla %9.202-11.587 ve 11.41-28.65 MPa'dır. İki eğri incelendiğinde, benzer Na_2O içeriği için 0.45 A/UK oranına sahip karışımlara karşılık gelen basınç dayanımı değerlerinin, 0.55 A/UK oranına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Örneğin, %9.67 ve %9.77 Na_2O değerleri, sırasıyla 0.45 ve 0.55 A/UK oranları için 30.74 ve 15.15 MPa basınç dayanımı sonuçlarına karşılık gelmiştir. Bu sonuç esas olarak su miktarındaki artışa ve diğer oksit oranlarındaki değişime bağlanabilmektedir.

Şekil 4.7. Basınç dayanımı ile (%) Na_2O arasındaki ilişki

Şekil 4.8., hafif geopolimer harç karışımlarında $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ oranı ile birlikte basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir. Bu çalışmada basınç dayanımı sonuçları ile $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ oranları arasındaki korelasyon, daha yüksek $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ oranlarının genellikle daha düşük basınç dayanımı değerleriyle sonuçlanması ile açıklanabilmektedir. Gözlenen sonuç, yüksek su hacminin geopolimerizasyon reaksiyonu üzerindeki ters etkisine bağlanabilmektedir. Yürütülen deneysel çalışmada elde edilen $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ oksit oranı aralığı ve karşılık gelen basınç dayanımı sonuçları sırasıyla 10.31-13.49 ve 11.41-30.74 MPa olarak belirlenmiştir.

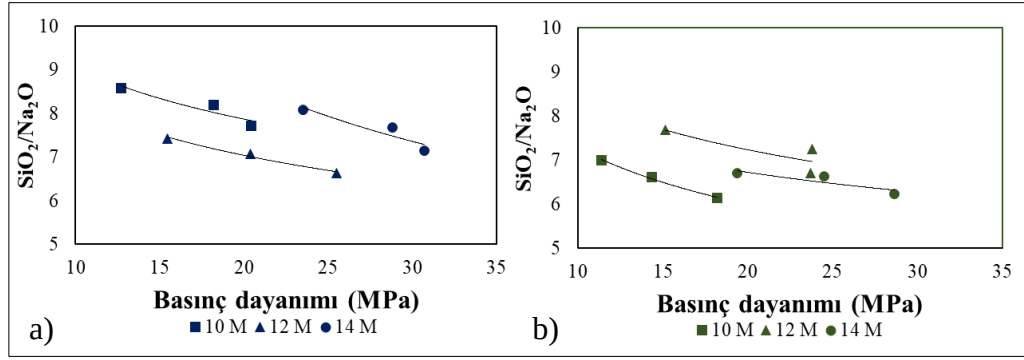
Şekil 4.8. Basınç dayanımı değerleri ile $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ oksit oranı arasındaki ilişki

Şekil 4.9., karışımlarda basınç dayanımı ile H₂O/katı malzeme oranı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. H₂O miktarı SH ve SS çözeltilerinden elde edilirken, katı malzemeler uçucu kül ve iki kimyasal alkali çözelti bünyesinde bulunan katı maddeleri temsil etmektedir. 0.45 A/UK ve 0.55 A/UK oranları için benzer trendler elde edilmiştir ve H₂O/katı malzeme oranındaki artışla birlikte basınç dayanımı ölçümlerinde düşüş görülmüştür. 0.45 A/UK oranı için karışımların H₂O/katı malzeme oranı aralığı 0.267-0.303 olarak belirlenmiştir ve bu oranlar da 12.72-30.74 MPa basınç dayanımı aralığı ile sonuçlanmıştır. 0.55 A/UK oranı için ise bu aralıklar sırasıyla 0.316- 0.34 ve 11.41-28.65 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.9. Basınç dayanımı değerleri ile H₂O/katı malzeme oranları arasındaki ilişki

Şekil 4.10. SiO₂/Na₂O oranının, sırasıyla 0.45 ve 0.55 A/UK oranları için çeşitli SH çözelti konsantrasyonları dikkate alınarak bu çalışmada belirtilen basınç dayanımı sonuçları üzerindeki etkisini göstermektedir. Kullanılan parametreler ve oksit oranları dikkate alınarak SiO₂/Na₂O oranının yüksek olmasının daha düşük basınç dayanımı değerlerine neden olduğu bulunmuştur. Artan SiO₂ oranının gerçekleşen reaksiyon üzerindeki olumsuz etkisi bu durumun oluşmasına neden olmuştur.



Şekil 4.10. Basınç dayanımı değerleri ile SiO_2/Na_2O oranları arasındaki ilişki a) A/UK:0.45 b) A/UK:0.55

4.2.2. Eğilme dayanımı

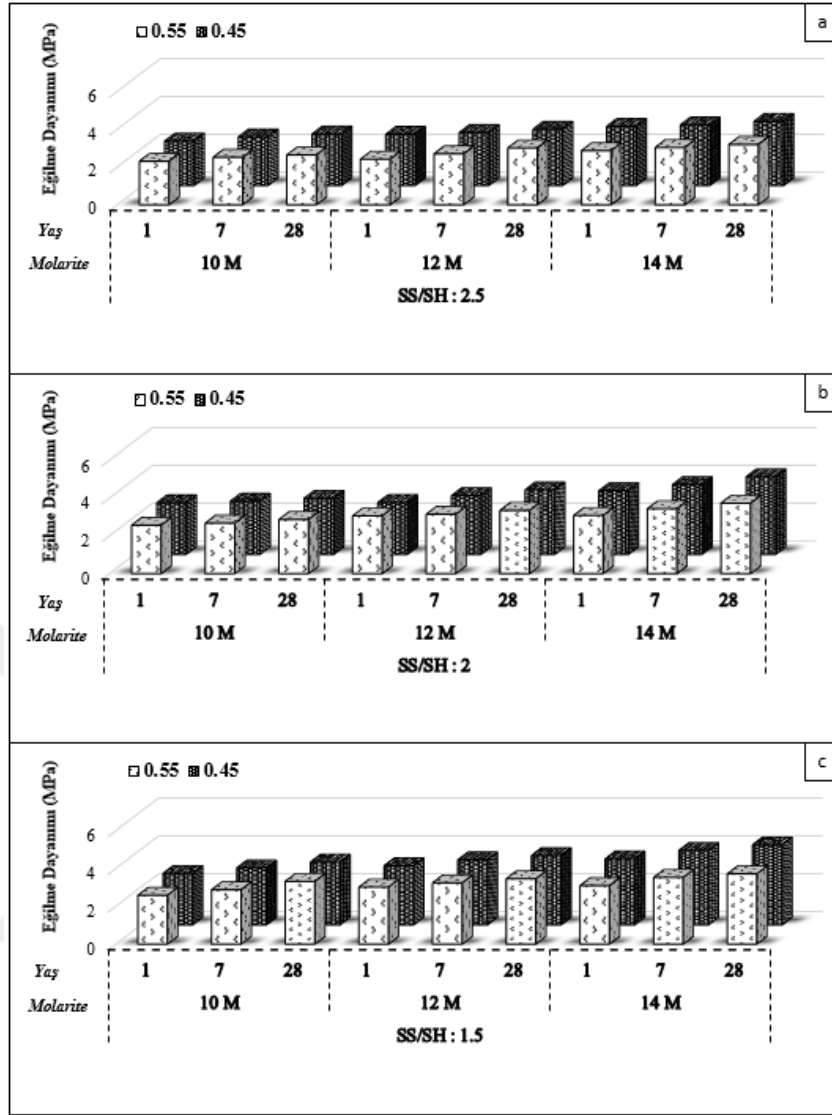
Eğilme dayanımı, yapı malzemelerinin çekme davranışının pratik bir göstergesi olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle, mevcut çalışmada, hafif geopolimer harçların üç nokta testi yoluyla eğilmede çekme dayanımı dikkate alınmıştır. Eğilme dayanım sonuçları Çizelge 4.4.'te verilmektedir.

Çizelge 4.4. Hafif geopolimer harçların eğilme dayanımı değerleri (MPa)

A/UK	SS/SH	SH [M]	1. gün	7. gün	28. gün
0.45	2.5	10 M	2.35	2.57	2.73
		12 M	2.71	2.81	2.98
		14 M	3.13	3.21	3.39
	2	10 M	2.73	2.82	2.97
		12 M	2.74	3.11	3.42
		14 M	3.37	3.70	4.11
	1.5	10 M	2.72	3.01	3.32
		12 M	3.13	3.44	3.67
		14 M	3.49	3.94	4.23
0.55	2.5	10 M	2.30	2.51	2.63
		12 M	2.41	2.70	3.00
		14 M	2.86	3.03	3.19
	2	10 M	2.56	2.67	2.86
		12 M	3.06	3.15	3.35
		14 M	3.08	3.43	3.73
	1.5	10 M	2.58	2.87	3.31
		12 M	3.01	3.23	3.45
		14 M	3.09	3.52	3.71

Çeşitli karışım tasarımlarının üretilen harçların eğilme dayanımı üzerindeki etkisini belirlemek önemlidir. Şekil 4.11. (a), 4.11. (b) ve 4.11. (c), sırasıyla 2.5, 2 ve 1.5 SS/SH oranlarında, çeşitli SH molariteleri ve A/UK oranlarına sahip geopolimer harçların farklı yaşlardaki eğilme dayanımı sonuçlarını göstermektedir. Yaşın artması ile matristeki reaksiyon ürünlerinin artmasının boşlukları iyileştirdiği ve daha yüksek eğilme dayanım değerleri ile sonuçlandığı görülmüştür. 1-7 gün arasında gözlenen eğilme dayanımı gelişimi genellikle 7-28 gün arasında gözlenene göre daha fazladır. Örneğin, 2.5 SS/SH oranı ve 0.55 A/UK oranı ile tasarlanan karışımlarda, 10 M, 12 M ve 14 M SH konsantrasyonlu karışımların 7. günde eğilme dayanımları sırasıyla %9.1, %5.9 ve %12.3 artmıştır. Bununla birlikte, yukarıda bahsedilen aynı karışımlar için 7 ile 28 gün arasında ise %4.8, %5 ve %11.1'lik dayanım gelişimi ölçülmüştür.

A/UK oranının 0.45'ten 0.55'e yükselmesi, SS/SH oranı 2 ve SH konsantrasyonu 12 M olan karışım haricinde daha düşük eğilme dayanımı değerleri ile sonuçlanmıştır. Sabit bir SS/SH oranı ve A/UK oranı için SH molaritesinin artması, hafif geopolimer harçların eğilme dayanımının iyileştirilmesi üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Örneğin, Şekil 4.11 (a)'da, 12 M ve 14 M SH konsantrasyonu ile sırasıyla 2.71-2.97 MPa ve 3.13-3.39 MPa aralığında eğilme dayanımı değerlerinin 10 M SH konsantrasyonu ile 2.35 ile 2.72 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Şekil 4.11.'de gözlenen tüm değerler karşılaştırıldığında, SS/SH oranındaki azalmanın, SH molariteleri ve A/UK oranlarından bağımsız olarak eğilme dayanımı sonuçlarını iyileştirdiği anlaşılmıştır. 1, 7 ve 28 günlük yaşlarda sırasıyla 3.49, 3.94 ve 4.23 MPa eğilme dayanımı sonuçlarını veren optimum karışım 0.45 A/UK oranı, 14 M SH molaritesi ve 1.5 SS/SH oranı ile sağlanmıştır.

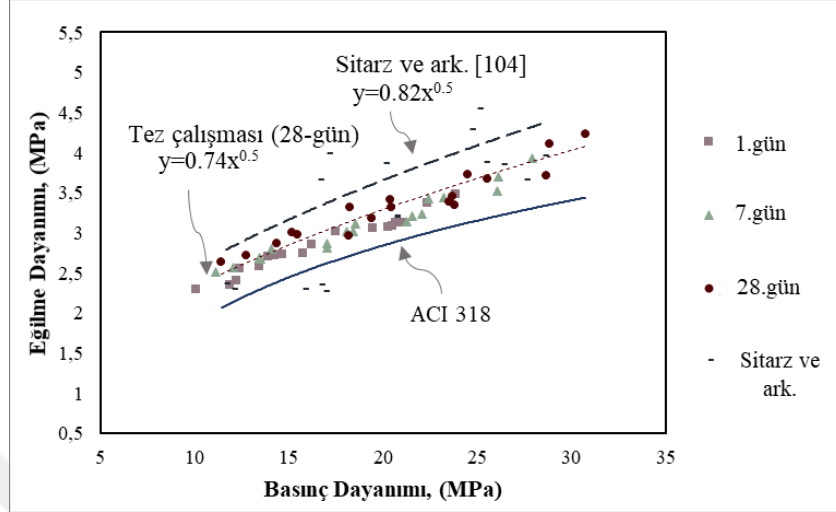


Şekil 4.11. Eğilme dayanımı sonuçları, (a) SS/SH:2.5, (b) SS/SH:2 ve (c) SS/SH:1.5

Şekil 4.12.'de, mevcut çalışma ile ulaşılan basınç dayanımı ve eğilme dayanımı sonuçları arasındaki ilişkiye, Portland çimento esaslı betonlar için ACI 318-02'de taahhüt edilen ilişkiye ve Sitarz ve ark., (2020) tarafından yürütülen çalışmada elde edilen ilişkiye yer verilmiştir. Bu iki parametre arasındaki eğilim, çimento esaslı kompozitlere benzer şekilde basınç dayanımındaki artışın, geopolimer harçlar için de daha yüksek eğilme dayanımı değerleri ile sonuçlandığını göstermiştir.

Şekil 4.12.'de her yaş için iki ana mekanik özellik arasında iyi bir ilişki olduğu açıktır. Bu çalışmada, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı sonuçları arasındaki ilişkiyi temsil eden 0.74 korelasyon katsayısı ile ACI 318-02'ye benzer bir formül elde

edilmiştir. Basınç dayanımı aralığı ve karşılık gelen eğilme dayanımı değerleri sırasıyla 11.41-30.74 MPa ve 2.63-4.23 MPa'dır.

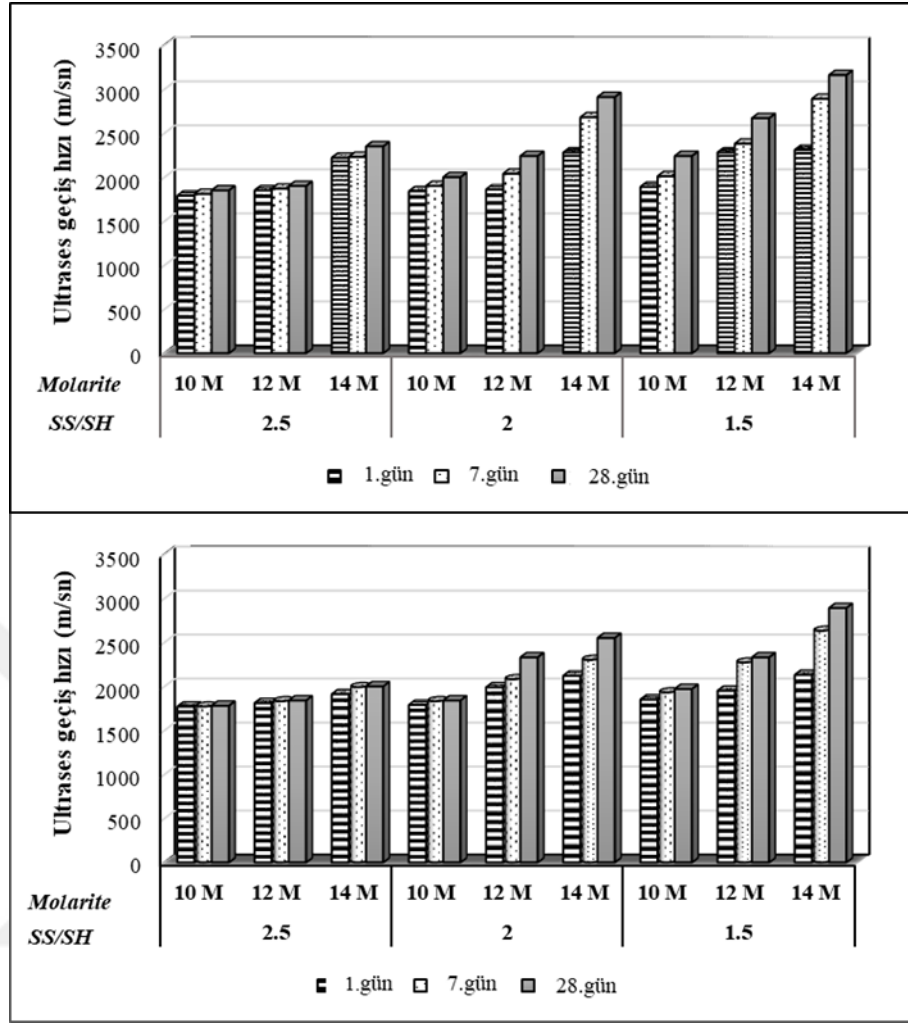


Şekil 4.12. Basınç dayanımı ile Eğilme dayanımı değerleri arasındaki ilişki

4.2.3. Ultrases geçiş hızı testi

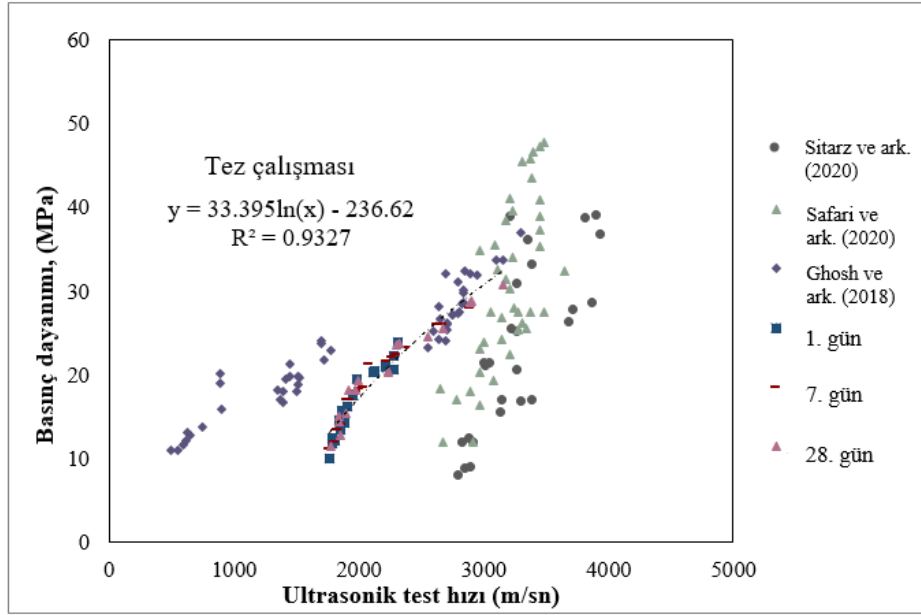
Ultrases geçiş hızı testi, mevcut boşluklar ve çatlaklar açısından malzemelerin matris kalitesi hakkında fikir veren bir yöntemdir. Ayrıca, yukarıda bahsedilen kusurların mekanik, termal ve geçirgenlik üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu da bilinmektedir. Bu çalışmada odaklanan parametrelere sahip numunelerin ultrases geçiş hızı test sonuçları Şekil 4.13.'te sunulmuştur.

Hafif geopolimer harçların çeşitli SH konsantrasyonları ve SS/SH oranlarının etkisi dikkate alınarak 0.45 ve 0.55 A/UK oranları için elde edilen ultrases geçiş hızı test sonuçlarının aralıkları sırasıyla 1790-3160 ve 1770-2890 m/sn olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler sırasıyla orta kaliteli ve zayıf kaliteli malzemeler için belirlenen aralıklar arasında kalmıştır.



Şekil 4.13. Ultrases geçiş hızı test sonuçları, (a) A/UK:0.45 ve (b) A/UK:0.55

Daha yüksek SH molariteleri, özellikle azalan SS/SH oranları ile farklı oranlarda hız değerlerinin artmasına neden olmuştur. Azalan A/UK oranının ve artan yaşın sonuçları olumlu etkilediği sonucuna varılabilir. Ayrıca, basınç dayanımı ve matris kalitesi arasındaki ilişkiyi daha iyi analiz etmek için basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı test sonuçları arasındaki korelasyon Şekil 4.14.'te gösterilmiştir. Şekil 4.14.'te, elde edilen sonuçları karşılaştırmak için diğer yazarların çalışmaları da (Ghosh ve ark., 2018; Safari ve ark., 2020; Sitarz ve ark., 2020) sunulmuştur. Şekil 4.14.'ten, $0.933 R^2$ değeri ile basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı test sonuçları arasında doğrusal olmayan yüksek bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır.

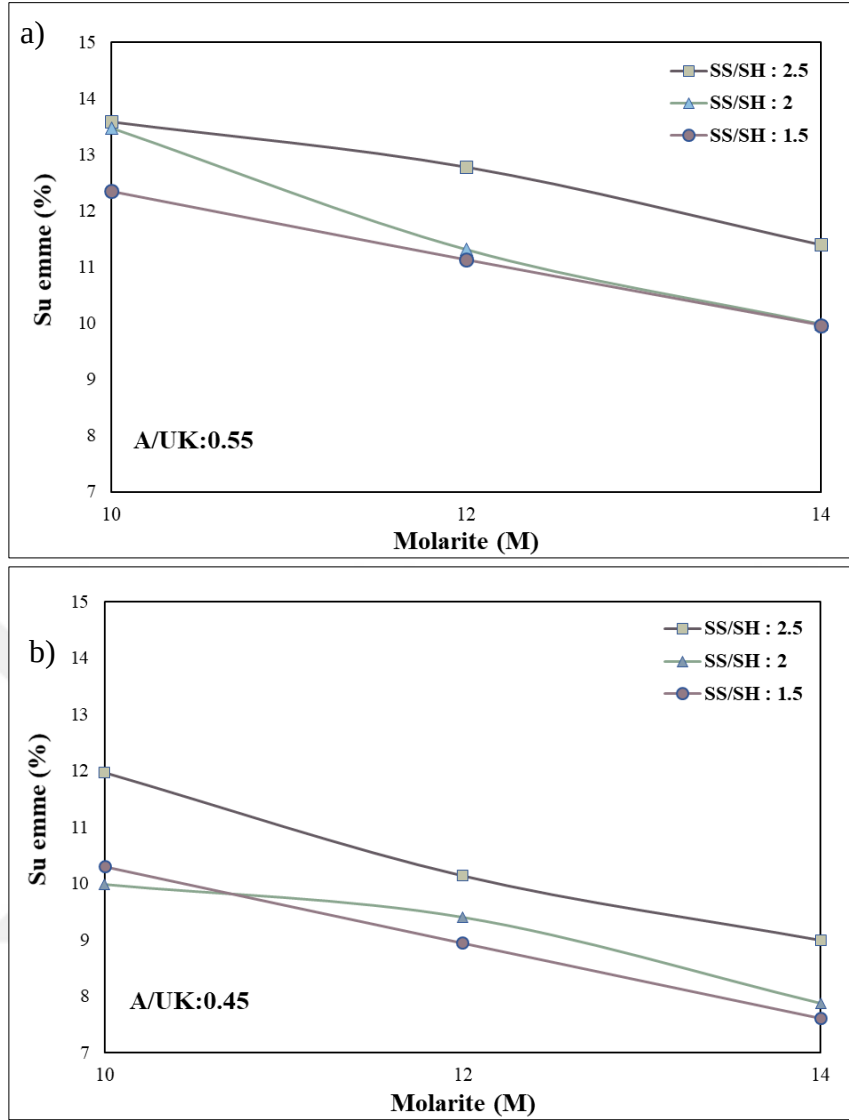


Şekil 4.14. Ultrases geçiş hızı test sonuçları ile basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişki

4.3. Dayanıklılık Özellikleri

4.3.1. Su emme deneyi

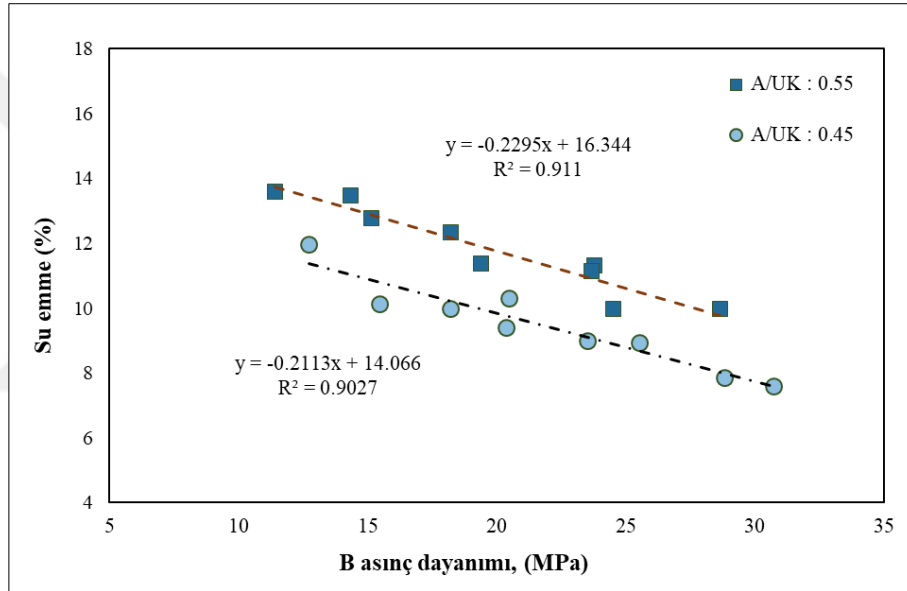
Şekil 4.15., çeşitli SH molaritelerine göre SS/SH oranlarına sahip hafif harçların 28 günlük yaştaki su emme değerlerini göstermektedir. Şekil 4.15. (a) ve Şekil 4.15. (b) 'deki eğri eğilimleri, sırasıyla 0.45 ve 0.55 A/UK oranları için ilişkileri temsil etmektedir. 0.45 A/UK oranında su emme sonuçları (%)7.61-11.96 arasında değişirken, 0.55 A/UK oranı için (%)9.96-13.59 aralığında elde edilmiştir. Artan alkali miktarı ile su emme değerleri artmıştır. SH konsantrasyonundaki artış, hem Şekil 4.15. (a) hem de Şekil 4.15. (b) 'de su emme değerlerinde bir azalmaya neden olmuştur. Elde edilen ilişki, daha yoğun bir matrisin oluşumuna ve buna bağlı olarak boşluk miktarının azalmasına atfedilebilir. Bu bulguya diğer yazarlar tarafından da ulaşılmıştır (Hardjito ve ark., 2004; Aliabdo ve ark., 2016; Elyamany ve ark., 2018).



Şekil 4.15. Su emme sonuçları a) A/UK:0.45 ve b) A/UK:0.55

Şekil 4.15. (a) incelendiğinde, 12 M ve 14 M SH molaritelerinde SS/SH oranlarının azalması ile su emme oranının azaldığı görülmüştür. En yüksek su emme düşüşü %1.98 olarak 10 M SH konsantrasyonunda SS/SH oranının 2.5'ten 2'ye düşmesi ile elde edilmiştir. Şekil 4.15. (b) 'de SS/SH oranındaki azalma, tüm SH molaritelerinde su emme sonuçlarının azalmasına yol açmıştır. Ayrıca, SS/SH oranının 2'den 1.5'e değişmesinin 12 M ve 14 M SH molaritelerinde su emme değerleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı da belirlenmiştir. 0.55 A/UK için %1.47 olan en yüksek su emme azalması ise 10 M SH molaritede SS/SH oranının 2.5'den 2'ye düşürülmesi ile elde edilmiştir. Şekil 4.16., 0.45 ve 0.55 A/UK oranları için basınç dayanımı ve su emme değerleri arasındaki ilişkileri göstermektedir. Elde edilen doğrusal eğri ve

karşılık gelen 0.93 ve 0.911 R^2 değerleri sırasıyla 0.45 ve 0.55 A/UK oranları için iki parametre arasındaki kuvvetli ilişkiyi göstermektedir. Su emme sonuçları, basınç dayanımı gelişimine bağlı olarak azalmıştır. Su emme ve basınç dayanımı sonuçları arasındaki ters ilişki, numunelerdeki gözenek miktarı ile ilişkilendirilebilir. Gözenek hacmindeki azalma, basınç dayanımının artmasına ve su emme kapasitesinin düşmesine neden olmuştur. 0.45 A/UK oranında 12.72-30.74 MPa basınç dayanımı değer aralığına karşılık gelen su emme değerleri (%)7.61 ile 11.96 arasında değişirken 0.55 A/UK oranı için su emme ve basınç dayanımı sonuçları sırasıyla (%)9.96-13.59 ve 11.41-28.65 MPa aralığında değişmiştir.

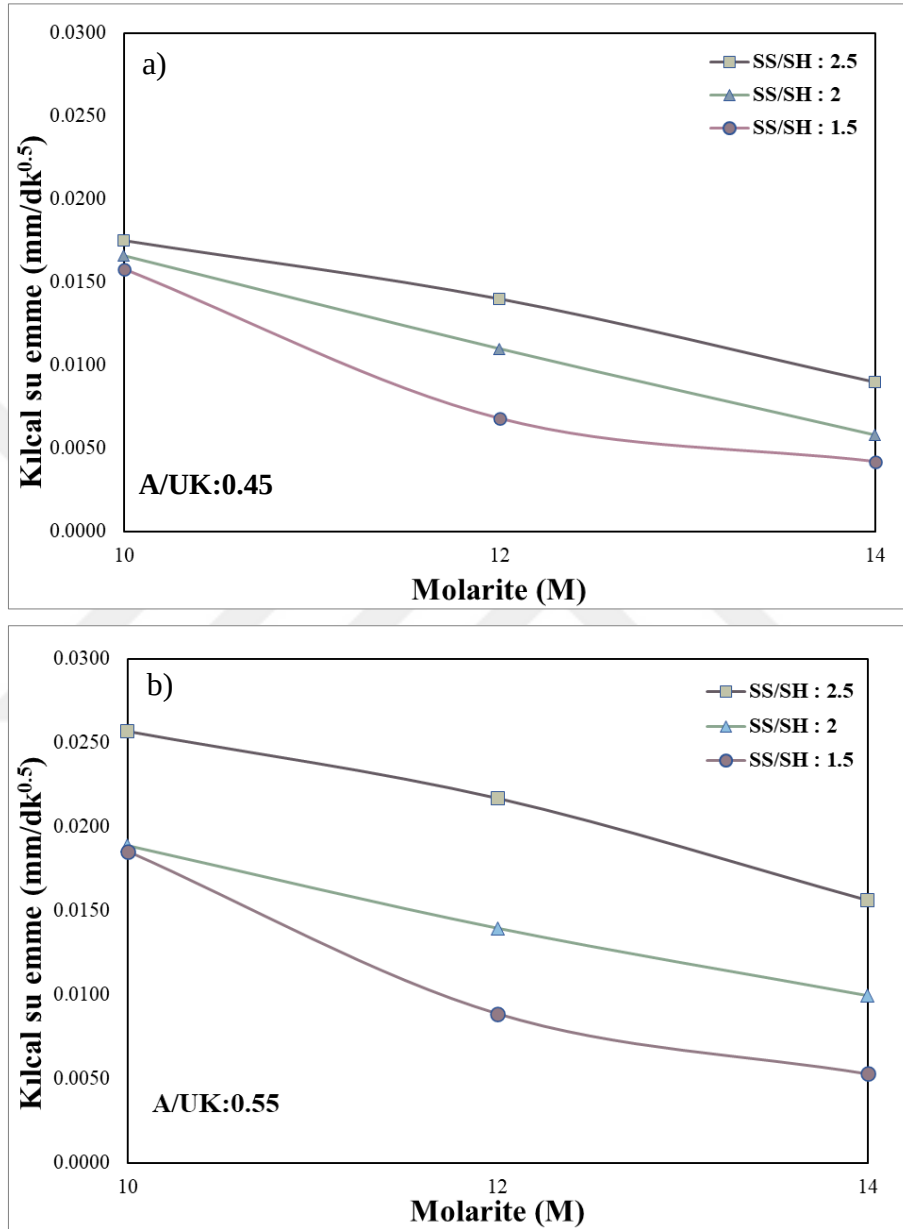


Şekil 4.16. Basınç dayanımı ile su emme arasındaki ilişki

4.3.2. Kılcal su emme deneyi

Kılcal su emme değerleri, numunelerdeki birbiriyle bağlantılı gözeneklerle ilgilidir. Bu nedenle Şekil 4.17., gözenekli yapının iyileştirilmesinin önemi göz önünde bulundurularak farklı parametrelerin kılcal su emme değerleri üzerindeki etkisini ortaya koymak için sunulmuştur. Şekil 4.17. (a) ve Şekil 4.17. (b), sırasıyla 0.45 ve 0.55 A/UK oranları için çeşitli SS/SH oranları ve SH molariteleri ile ilgili numunelerin kılcal su emme sonuçlarını göstermektedir. 0.45 A/UK oranı için kılcal su emme değerleri 0.0042 ile 0.0175 mm/dk^{0.5} arasında değişmiştir. SH

konsantrasyonunun artması, su emme değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Benzer sonuçlar farklı çalışmalarda da elde edilmiştir (Shaikh, 2014; Nuaklong ve Chindaprasirt, 2016; Mermerdaş ve ark., 2017).

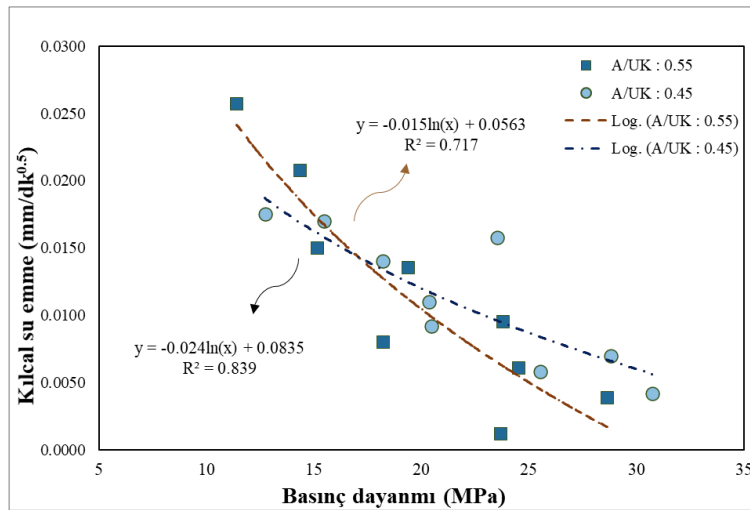


Şekil 4.17. Su emme sonuçları a) A/UK:0.45 ve b) A/UK:0.55

Daha yüksek SS/SH oranı, kılcal su emme değerlerinde artışa neden olmuştur. Yüksek SiO₂ içeriğinin, geopolimerizasyon reaksiyonunun engellenmesi ve buna bağlı olarak gözenek bağlantısının artmasıyla sonuçlandığı bilinmektedir (Dao ve ark., 2019; Hadi ve ark., 2019).

SS/SH oranlarındaki azalmalara karşılık gelen en yüksek kılcal su emme değerindeki azalmanın, 12 M SH molaritesi ile elde edildiği bulunmuştur. Ayrıca Şekil 4.17. (a)'da, SS/SH oranının 2.5'ten 2'ye düşmesinin 10 M SH konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde sonuçlar üzerinde çok az etkisinin olduğu da gözlenmiştir. Kılcal su emme değerleri, 0.55 A/UK oranında çeşitli SS/SH oranları ve SH molariteleri dikkate alınarak 0.0039-0.0257 mm/dk^{0.5} arasında değişmiştir.

Şekil 4.17. (b) 'den görülebileceği gibi, 2 ve 1.5 SS/SH oranlarına ait sonuçlar ile karşılaştırıldığında, 2.5 SS/SH oranı için kılcal su emme değerlerinde daha yüksek oranlarda artış olmuştur. Şekil 4.18., 0.55 ve 0.45 A/UK oranları için numunelerin su emme değerleri ile basınç dayanımı sonuçları arasındaki korelasyonu göstermektedir. Sırasıyla 0.55 ve 0.45 A/UK oranları için elde edilen 0.717 ve 0.839 R² değerleri dikkate alındığında iki parametre arasında iyi bir ilişki olduğu görülmektedir. Boşluk hacmindeki azalma ile basınç dayanımındaki iyileşme, numunelerdeki gözenek bağlantısının azalmasına bağlı olarak kılcal su emme değerlerinin azalmasına neden olmuştur. 0.55 A/UK oranı için basınç dayanımı ve kılcal su emme değerlerinin aralığı sırasıyla 11.41-28.65 MPa ve 0.0042 ile 0.0175 mm/dk^{0.5} iken 0.45 A/UK oranı için bu değerler 12.72-30.74 MPa ve 0.0039-0.0257 mm/dk^{0.5} olarak belirlenmiştir.



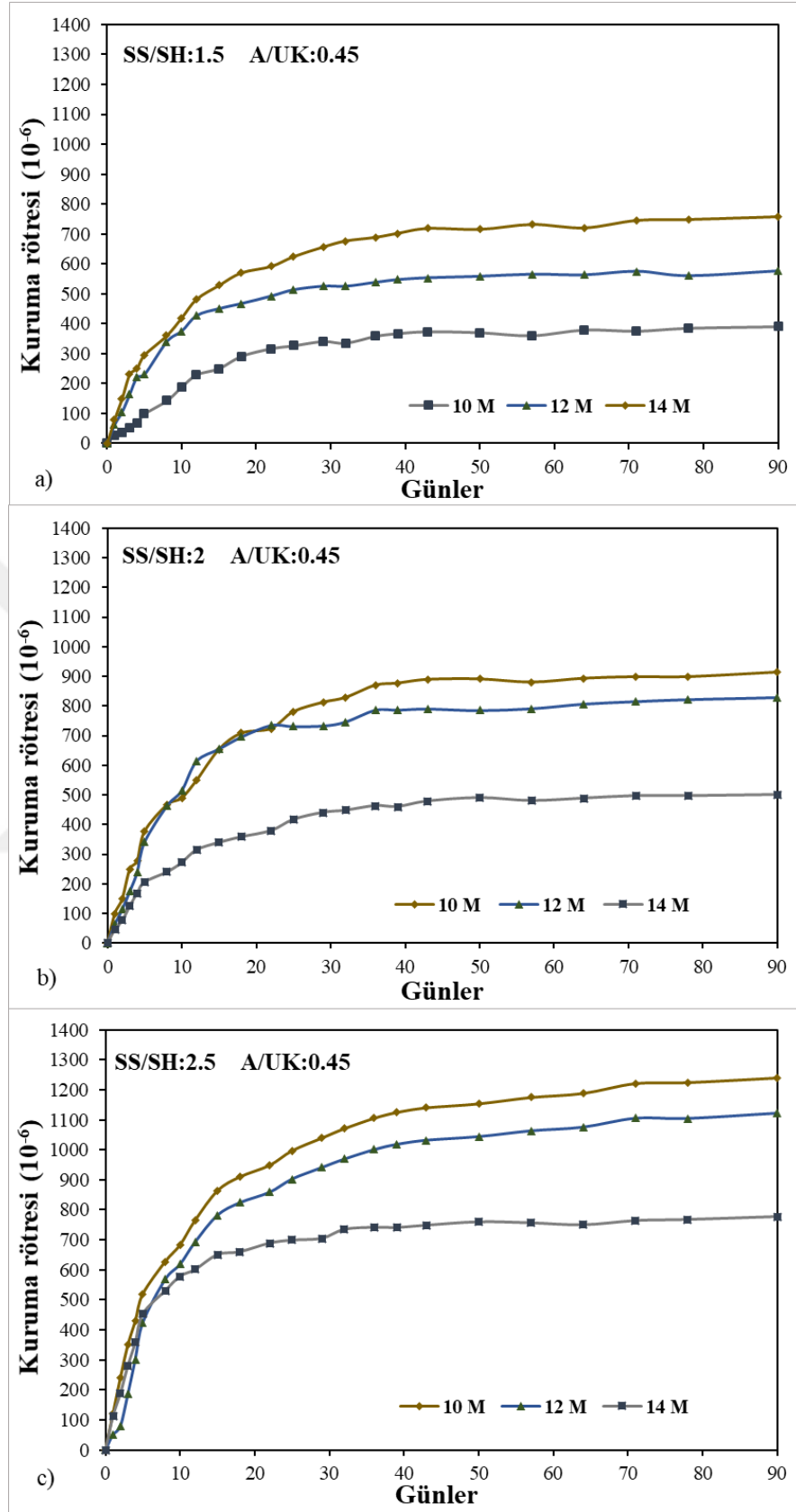
Şekil 4.18. Basınç dayanımı ile kılcal su emme arasındaki ilişki

4.3.3. Rötire ölçümü

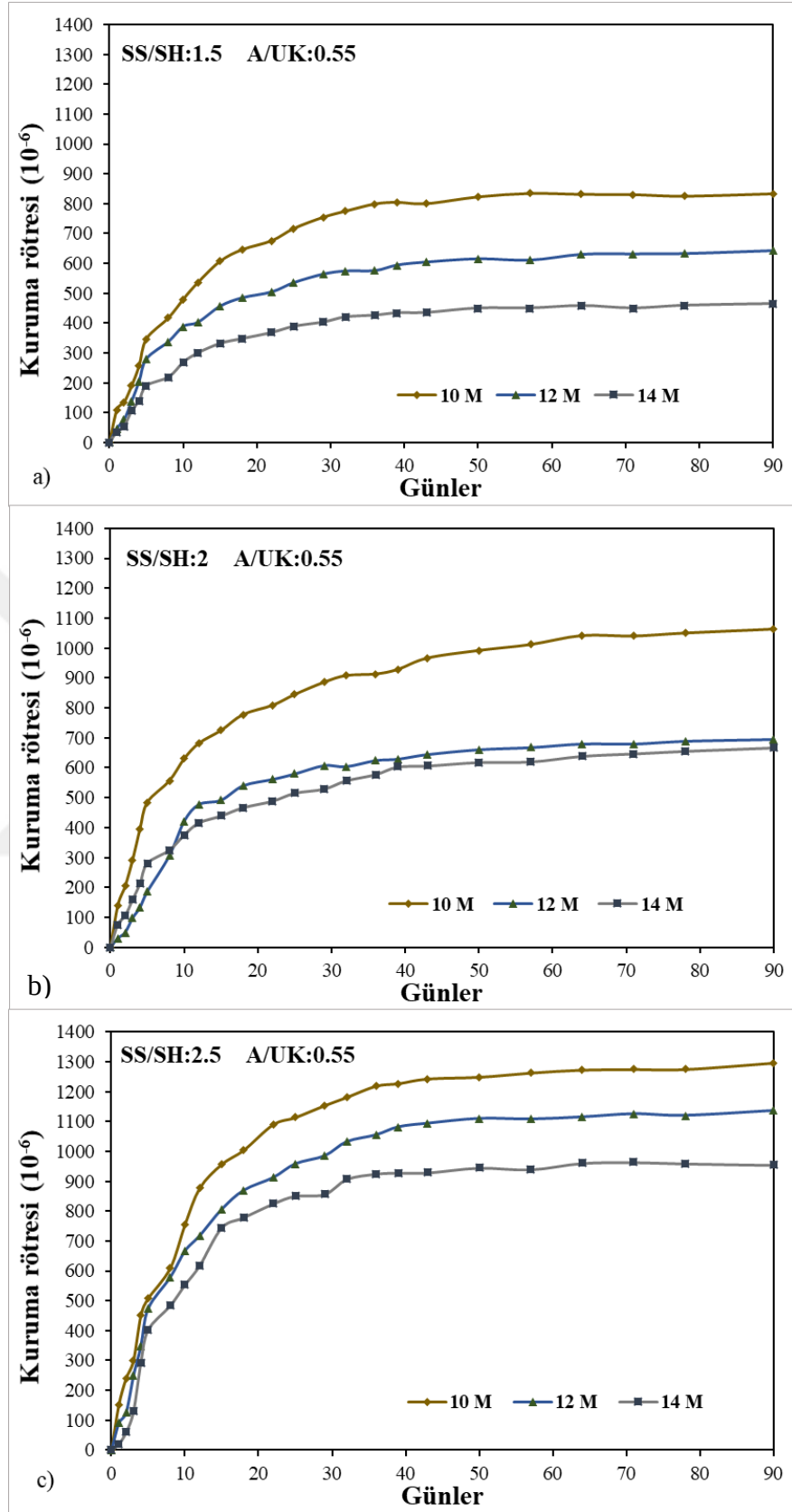
Şekil 4.19. ve 4.20. çeşitli SS/SH oranları, SH molariteleri ve A/UK oranlarının hafif geopolimer harçların 90 günlük kuruma rötresi değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 4.19.'da görüldüğü gibi, kuruma rötresi sonuçlarının yaklaşık yüzde 80'ine 3 hafta içinde ulaşılabilmektedir.

Elde edilen veriler yorumlandığında, SS/SH oranlarından ve A/UK oranlarından bağımsız olarak SH molaritesi arttıkça geopolimer harçların kuruma rötresi değerlerinin azaldığı, ancak değişim seviyesinin iki parametreye göre farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Örneğin SH molaritesi 10 M'den 12 M'ye yükseltildiğinde, %44.4 en yüksek kuruma rötresi artışı değeri 2.5 SS/SH oranı ve 0.45 A/UK oranı ile elde edilmiştir. Bununla birlikte, SH konsantrasyonunun 12 M'den 14 M'ye değişimi göz önüne alındığında, 2 SS/SH oranı ve 0.55 A/UK oranı ile %52.9 oranında maksimum rötresi artışı gözlenmiştir. Bu bulgu, geopolimerizasyon reaksiyonunun gelişimine ve dolayısıyla hacim stabilitesine bağlanabilir. Diğer araştırmacılar tarafından da benzer sonuçlar bildirilmiştir (Atış ve ark., 2009; Aydın ve Baradan, 2014; Jiao ve ark., 2018).

Genel olarak, SS/SH oranındaki azalmanın tüm karışımların rötresi değerlerinde düşüşe neden olduğu, ancak SS/SH oranı 2.5'ten 2'e düşürüldüğünde daha yüksek azalış seviyelerinin elde edildiği görülmüştür. 0.45 A/UK oranı için, SS/SH oranı 2'den 2.5'e çıktığında, 10 M, 12 M ve 14 M SH konsantrasyonu içeren karışımlarda sırasıyla %35.75, %35.4 ve %55.4 nihai rötresi artışına ulaşılmıştır. 0.55 A/UK oranını içeren karışımlara ilişkin olarak yukarıda belirtilen değerler sırasıyla %22, %63.4 ve %43 olarak elde edilmiştir. Bazı yazarların çalışmalarında da benzer bir eğilim olduğu bildirilmiştir (Cincotto ve ark., 2003; Atış ve ark., 2009; Aydın ve Baradan, 2014; Deb ve ark., 2015). Şekil 4.19. ve Şekil 4.20. incelendiğinde, A/UK oranının 0.45'ten 0.55'e artmasının, çeşitli SS/SH oranları ve SH molaritelerine göre değişen oranlarda daha yüksek kuruma rötresine neden olduğu sonucuna varılmıştır. A/UK oranındaki artış göz önüne alındığında en yüksek kuruma rötresi artışı %33.4 olarak 2 SS/SH oranı ve 14 M SH molaritesini içeren karışım ile elde edilmiştir.



Şekil 4.19. Hafif geopolimer harçların A/UK: 0.45 için kuruma rötresi sonuçları a) SS/SH:1.5, b) SS/SH:2 ve c) SS/SH:2.5

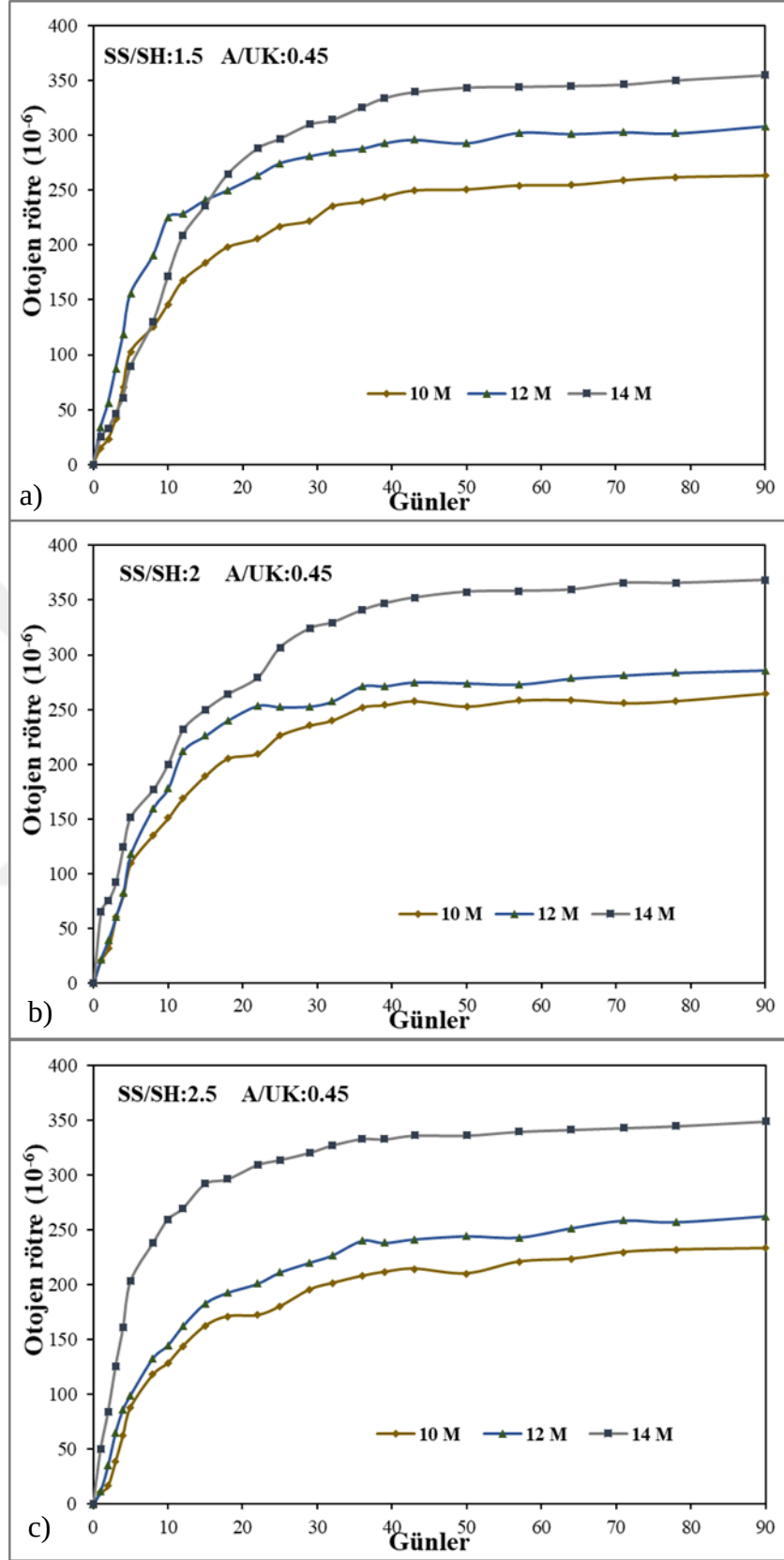


Şekil 4.20. Hafif geopolimer harçların A/UK: 0.55 için kuruma rötresi sonuçları a) SS/SH:1.5, b) SS/SH:2 ve c) SS/SH:2.5

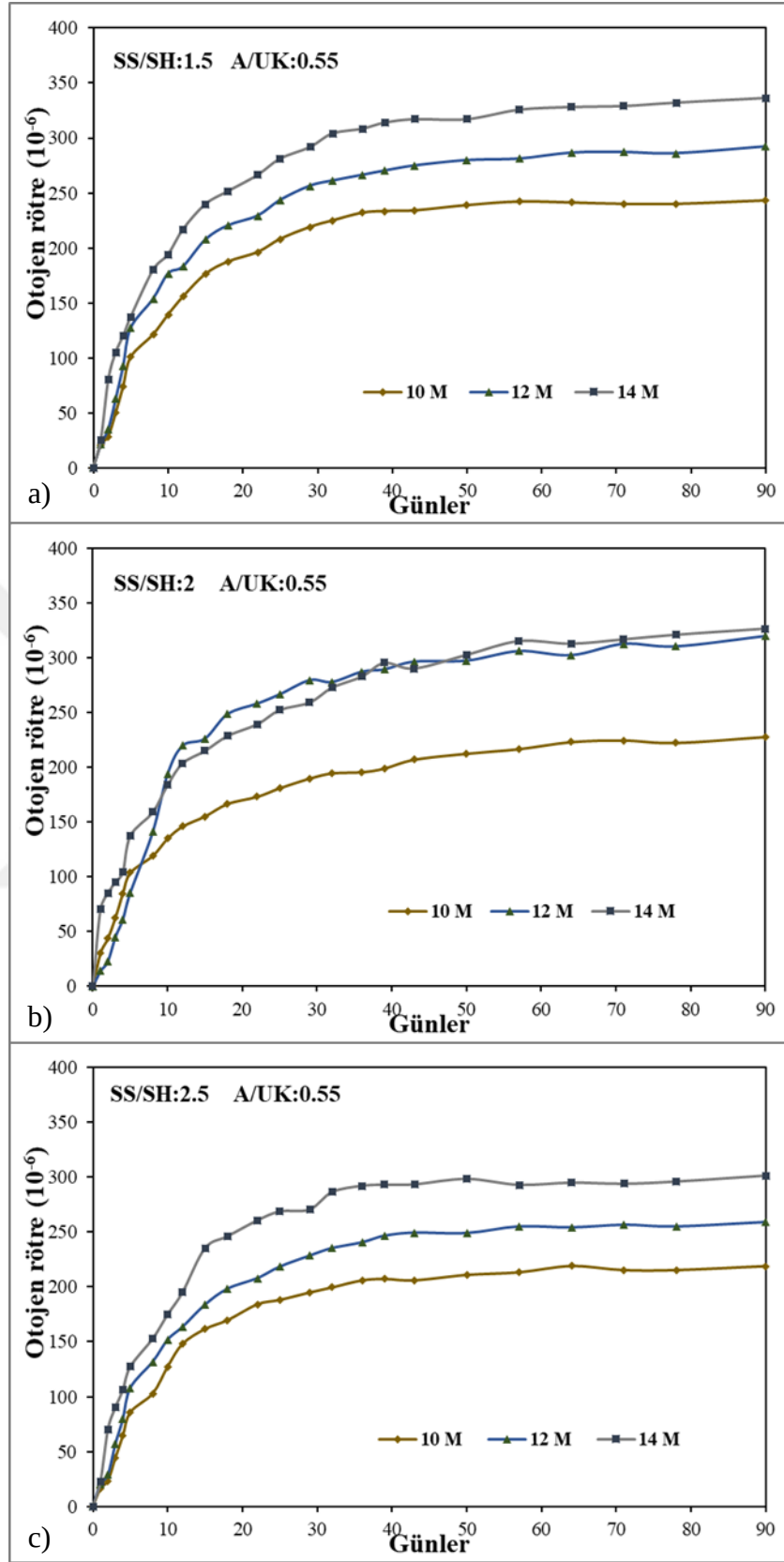
Çeşitli SS/SH oranlarının, SH molaritelerinin ve A/UK oranlarının hafif geopolimer harç numunelerinin otojen rötre sonuçları üzerindeki etkileri Şekil 4.20.'de verilmiştir. Daha yüksek SS/SH oranı daha düşük otojen rötre sonuçlarına yol açmıştır. Otojen rötre seviyesi, matristeki reaksiyon gelişimi ile ilgilidir. Bu nedenle, otojen rötre değerleri ile SS/SH oranları arasındaki eğilim, bu çalışmada elde edilen SS/SH oranındaki düşüşe bağlı olarak ulaşılan dayanım artışı bulgusuna paralel sonuç sunmuştur. Benzer bir gözlem, SH konsantrasyon artışının basınç dayanımı sonuçları üzerindeki olumlu etkisi dikkate alındığında, SH molaritesi ve otojen rötre sonuçları arasındaki ilişki için geçerli olabilir.

SH molarite artışının otojen rötre değerleri üzerindeki etkisi, kullanılan SS/SH oranları ve A/UK oranlarına göre değişiklik göstermiştir. Örneğin, SH konsantrasyonu 10 M'den 12 M'ye çıktığında, en fazla otojen rötre artışı %40.4 olarak 2 SS/SH oranı ve 0.55 A/UK oranına sahip karışım ile elde edilmiştir.

%33 maksimum otojen rötre artışına, 12 M'den 14 M'ye olan SH molaritesinin 12 M'den 14 M'ye çıkarılması sonucunda 2.5 SS/SH oranı ve 0.45 A/UK oranı içeren karışım ile ulaşılmıştır. Şekil 4.21. ve 4.22.'den, A/UK oranı artışının otojen rötre sonuçları üzerindeki sınırlı etkisi de görülmektedir. A/UK oranının 0.45'ten 0.55'e artmasıyla en yüksek otojen rötre artışı, tüm karışımlar dikkate alınarak 10 M SH molaritesi ve 2 SS/SH oranı ile %11.15 olarak belirlenmiştir. Tüm sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, minimum ve maksimum otojen rötre değerleri 219 ve 368 mikro uzama olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.21. Hafif geopolimer harçların A/UK: 0.45 için otojen rötresi sonuçları a) SS/SH:1.5, b) SS/SH:2 ve c) SS/SH:2.5



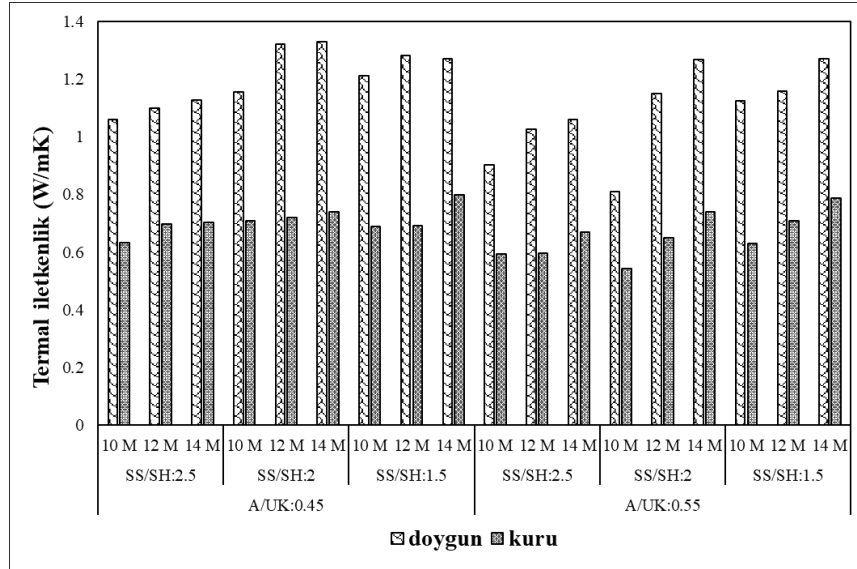
Şekil 4.22. Hafif geopolimer harçların A/UK: 0.55 için otojen rötresi sonuçları a) SS/SH:1.5, b) SS/SH:2 ve c) SS/SH:2.5

4.3.4. Termal iletkenlik tayini

Şekil 4.23., çeşitli karışım parametrelerine göre hafif geopolimer harçların doymuş ve kuru koşullar için termal iletkenlik sonuçlarını göstermektedir. Beklendiği gibi doymuş koşullarda numunelerin ısı iletkenlik değeri kuru koşullarda bulundurulmuş numunelere göre daha yüksek olarak elde edilmiştir. Molarite artışı, tüm karışımlar için ancak farklı derecelerde daha yüksek termal iletkenlik değeri ile sonuçlanmıştır.

En yüksek termal iletkenlik değişimi, hem 0.45 hem de 0.55 A/UK oranı için SS/SH oranı 2 olan karışımlarda SH konsantrasyonu 10 M'den 12 M'ye yükseldiğinde elde edilmiştir. Genel olarak, A/UK oranının 0.45'ten 0.55'e yükselmesi, daha fazla gözenek yapısına neden olması nedeniyle termal iletkenlik düşüşünü kolaylaştırmıştır. SS/SH oranının ısı iletkenlik değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde, iki parametre arasındaki ilişkiyi temsil eden belirgin bir eğilim olmadığı sonucuna varılmıştır. SS/SH oranının etkisi, SH molaritesi ve A/UK oranı değişimine göre farklılık göstermiştir.

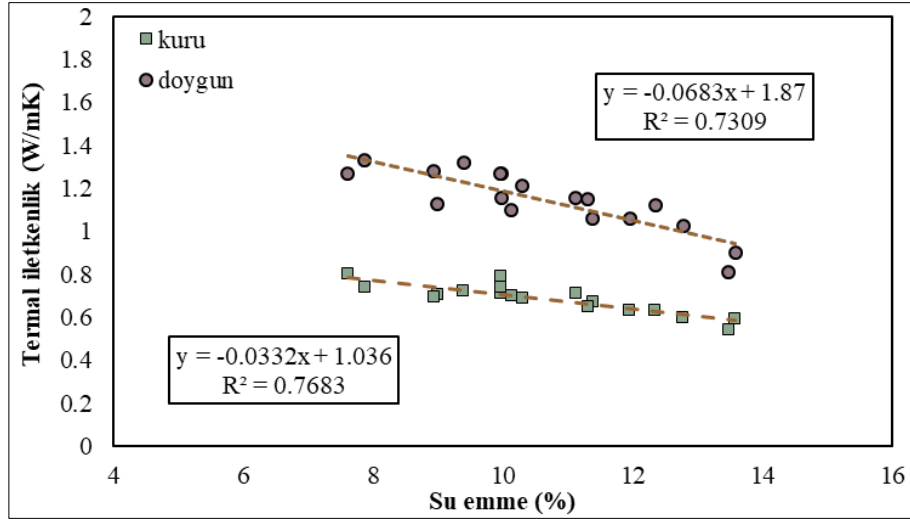
Numunelerin çeşitli SS/SH oranları, SH molariteleri ve A/UK oranlarına karşılık gelen ısı iletkenlik değeri aralığı, numunelerin sırasıyla kuru ve doymuş durumları için 0.54-0.79 W/mK ve 0.81-1.33 W/mK olarak ölçülmüştür. A/UK oranı 0.55 ve SH molaritesi 10 M olan numunelerde doymuş ve kuru koşullar için minimum ısı iletkenlik değeri sırasıyla 0.81 W/mK ve 0.54 W/mK olarak belirlenmiştir. Bu değerler çelik için 120 W/mK, tahta için 0.17 W/mK, cam için 0.78 W/mK, su için 0.5 W/mK, çimento hamuru için 1-1.3 W/mK arasında, beton için ise 1.5-3.5 W/mK arasında değişmektedir.



Şekil 4.23. Hafif geopolimer harçların termal iletkenlik değerleri

Gözenekliliğin numunelerin ısı direncini etkileyen özelliklerden biri olduğu ve yapı malzemelerinin su emme değerlerinin gözeneklilik değerleri ile ilişkili olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, ısı iletkenlik değerleri ile su emme sonuçları arasındaki ilişki Şekil 4.24.'te verilmiştir. Numunelerin ısı iletkenlikleri hem doymuş hem de kuru koşullar için belirlenmiştir. Ölçülen ısı iletkenlik değerleri, artan su emme sonuçlarıyla birlikte bir düşüş eğilimi göstermektedir.

Isı iletkenliği ile su emme değerleri arasında kuru ve doymuş koşullar için sırasıyla 0.73 ve 0.76 R^2 değerleri ile iyi bir ilişki bulunmuştur. Numunelerin çeşitli SS/SH oranları, SH molariteleri ve A/UK oranlarına karşılık gelen ısı iletkenlik değerleri aralığı, numunelerin kuru ve doymuş durumları için sırasıyla 0.54-0.79 W/mK ve 0.81-1.33 W/mK olarak ölçülmüştür.

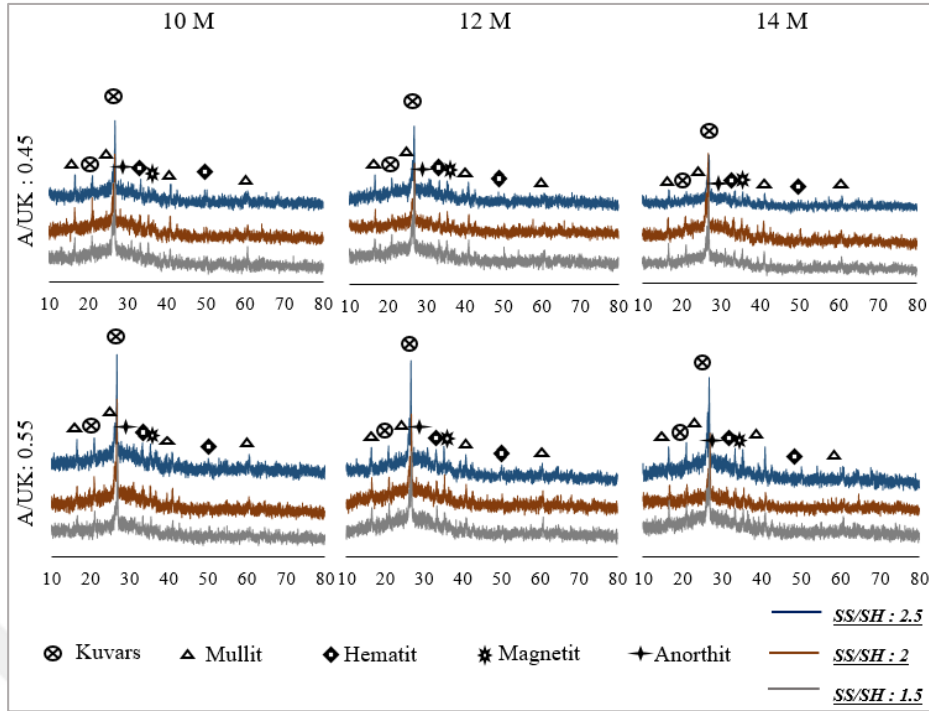


Şekil 4.24. Termal iletkenlik ve su emme değerleri arasındaki ilişki

4.4. Mikro Yapı İncelemesi

4.4.1. XRD analizi

Şekil 4.25., 75 °C’de 24 saat kürlenmiş ve çeşitli SH konsantrasyonları, SS/SH oranları ve A/UK oranları ile hazırlanan hafif ağırlıklı geopolimer hamurların XRD modellerini göstermektedir. Bu bölümde numunelerin mineralojik bileşimlerinin tespiti amaçlanmıştır. Hamurların XRD kırınım grafiği tepe eğilimleri, hamur bileşenleri nedeniyle benzerdir. Bununla birlikte, tepe noktalarının yoğunluğu, geopolimerizasyon derecesine bağlı olarak çeşitli değerlerde görünmektedir. Amorf yapı, tüm numuneler için 25-35° (2θ) bölgesindeki geniş alan ile görülmüştür.



Şekil 4.25. Hafif geopolimer hamurların XRD grafikleri

Şekil 4.25.'te sembollerle işaretlenmiş tepeler, uçucu kül bileşimi ve geopolimerizasyon reaksiyonundan türetilen kristalli bileşenleri temsil etmektedir. Kuvars (SiO_2), Mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), Hematit (Fe_2O_3), Magnetit ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) ve Anorthit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) bu sertleşmiş hafif geopolimer örneklerinde tespit edilen kristal yapılarıdır. Elde edilen kristal yapılar kullanılan yüksek uçucu kül miktarına bağlı olarak SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bileşenlerini içermektedir. Tepe yoğunluklarındaki değişim, fazların kristalleşmesine bağlanmaktadır. A/UK oranının 0.45'ten 0.55'e yükselmesi, kristal fazların yoğunluklarında küçük artışlar göstermiş ve amorf aralık küçük oranlarda ötelenmiştir.

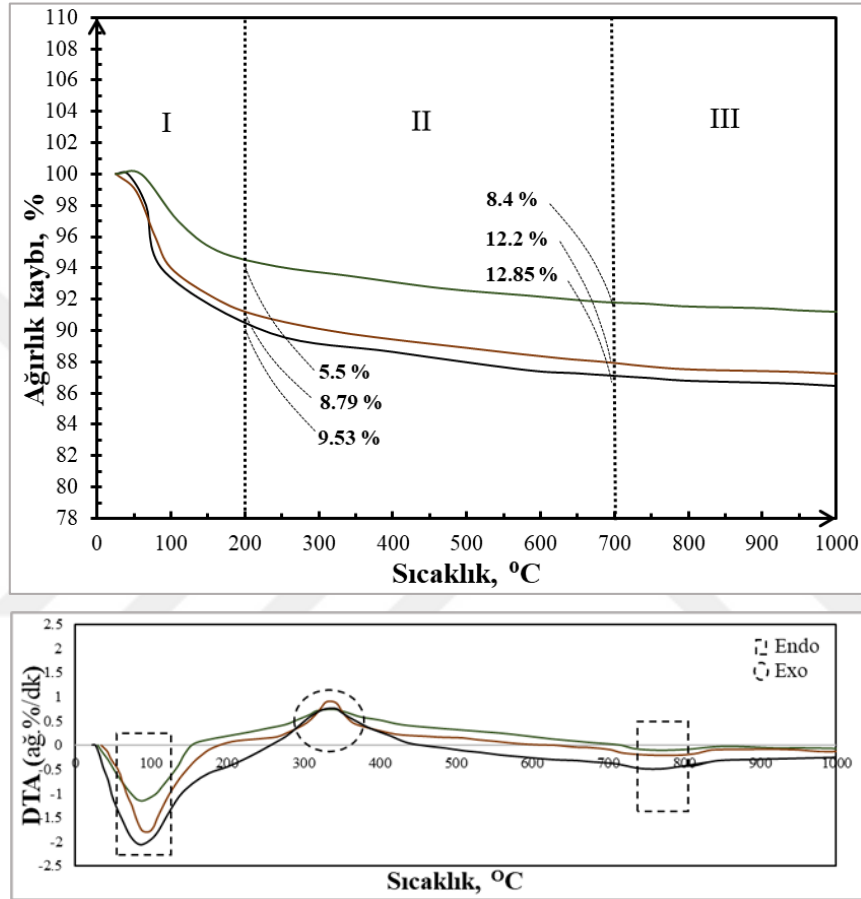
SH konsantrasyonundaki artışın, daha düşük pik yoğunlukları ile de ortaya çıkan hamurların kristallik fazlarını azalttığı ve geopolimer jeldeki fazların yeniden düzenlenmesinin, basınç dayanımında iyileşme ile sonuçlanan daha yüksek miktarda reaksiyon ürünü oluşumuna olanak sağladığı görülmüştür. Ham uçucu külden kaynaklanan ana piklerin (kuvars, mullit ve hematit) yoğunluk değerleri, geopolimerizasyon reaksiyonunun gelişimine bağlı olarak değişiklik göstermiştir.

4.4.2. TGA ve DTA sonuçları

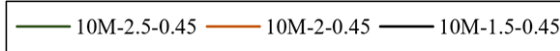
Şekil 4.26., 4.27. ve 4.28, 25-1000 °C sıcaklık aralığında hafif geopolimer harçların Termogravimetrik Analizi (TGA) ve Diferansiyel Termal Analizi (DTA) sonuçlarını göstermektedir. Bu şekillerde hem 200 °C hem de 700 °C sıcaklıkları için numunelerin kütle kaybı değerleri detaylı olarak gösterilmiştir. TGA eğrileri, ısının artması sırasındaki kütle kaybı yüzdesi dikkate alınarak ısı kararlılığı belirlemek için genellikle üç aşamaya ayrılır (Ranjbar ve ark., 2014; Nath ve ark., 2016; Cui ve ark., 2019; Bernal ve ark., 2010; Burduhos ve ark., 2020; Nath ve Kumar, 2020). İlk kısım, fiziksel olarak bağlı ve serbest suyun buharlaşmasının neden olduğu kütle kaybını temsil eden 200 °C'ye kadar olan bölümdür ve keskin bir düşüş içermektedir. Geniş 200 °C-700 °C sıcaklık arasında, kütle kaybı eğilimi kimyasal olarak bağlı su molekülleri ile ilişkilidir. Bu nedenle geopolimer jelden ayrılması ilk aşamaya göre daha fazla zamana ve sıcaklığa ihtiyaç duymaktadır. Tüm harç numuneleri için 700 °C ile 1000 °C sıcaklıkları arasında küçük bir kütle düşüşü olmuştur. Bu eğilim, geopolimerlerin termal davranışını analiz eden diğer bazı çalışmalarda da bildirilmiştir (Ariffin ve ark., 2013; Abdulkareem ve ark., 2014; Tuyan ve ark., 2018; Giosuè ve ark., 2019).

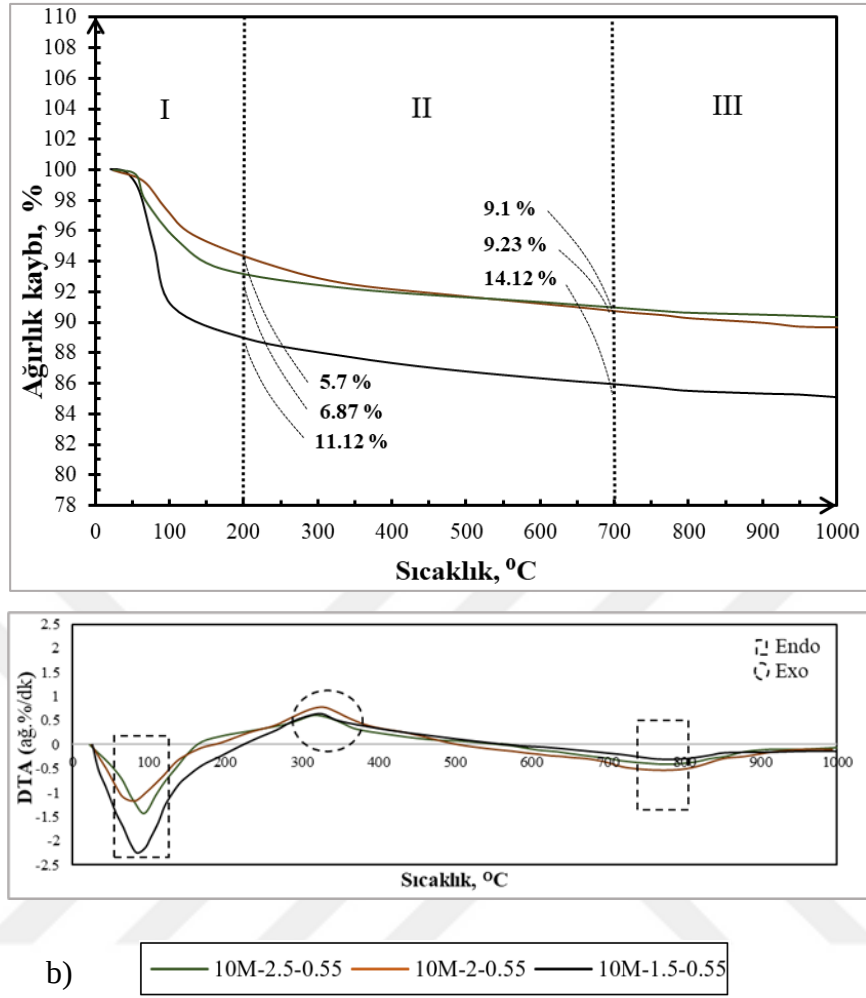
Şekil 4.26. (a) ve Şekil 4.26. (b), sırasıyla 0.45 ve 0.55 A/UK oranları için 10 M SH molaritesi ve farklı SS/SH oranları ile hazırlanan hafif geopolimer harçların TGA ve DTA verilerini sunmaktadır. SS/SH oranındaki azalma, 0.45 A/UK oranı için daha yüksek bir kütle kaybına neden olmuştur. 0.45 A/UK oranı ile hazırlanan örneklerde 2.5, 2 ve 1.5 SS/SH oranları için toplam kütle kaybı değerleri sırasıyla %8.4, %12.2 ve %12.85 olarak belirlenmiştir. Şekil ayrıca A/UK oranının 0.45'ten 0.55'e artmasının 200 °C sıcaklıkta kütle kaybında artışa neden olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte toplam kütle kaybı değerleri, çeşitli SS/SH oranlarında A/UK oranlarına bağlı olarak da değişiklik göstermektedir. DTA eğrilerinde yaklaşık 100 °C'de bir endotermik tepe, 320 °C'de ekzotermik tepe ve 750 °C'de küçük bir endotermik tepe gözlenmiştir. Su dehidrasyonu ile ilgili ilk endotermik tepe, diğer tepelere kıyasla en yüksek büyüklüğe sahiptir ve değerler TGA eğrilerindeki kütle kaybı sonuçlarıyla uyumludur. Isıya maruz kaldığında, ferrihidrit hematite dönüşür ve 300 °C'ye yakın

DTA eğrilerinde ekzotermik bir tepe noktasına neden olur (Bowles, 1997). DTA termogramındaki yaklaşık 320 °C'deki ekzotermik pikin faz geçişinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Rickard ve ark., (2010) F sınıfı uçucu kül bazlı geopolimerin ısı davranışı ile ilgili çalışmada aynı sonucu elde etmişlerdir. 750 °C civarındaki diğer küçük endotermik tepenin ise karbonatlaşma nedeniyle oluştuğu bilinmektedir.



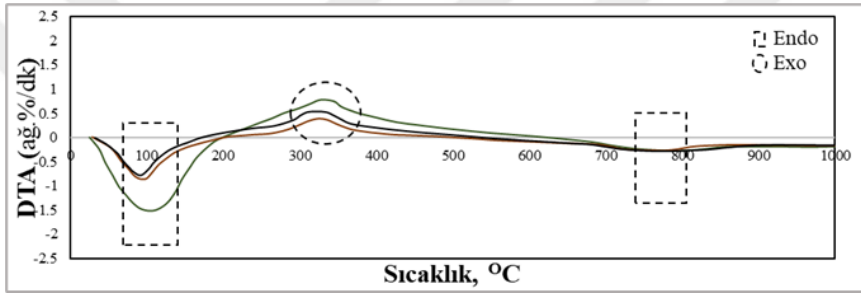
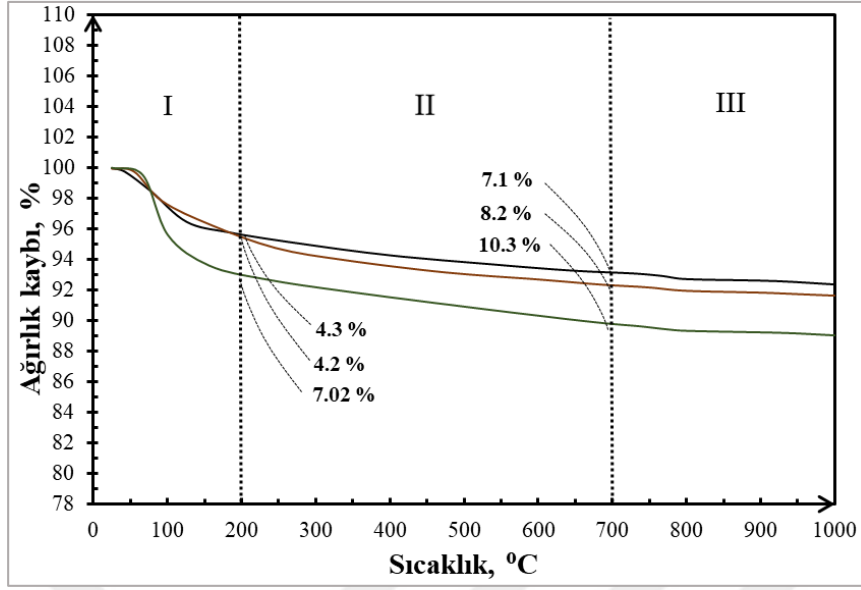
a)



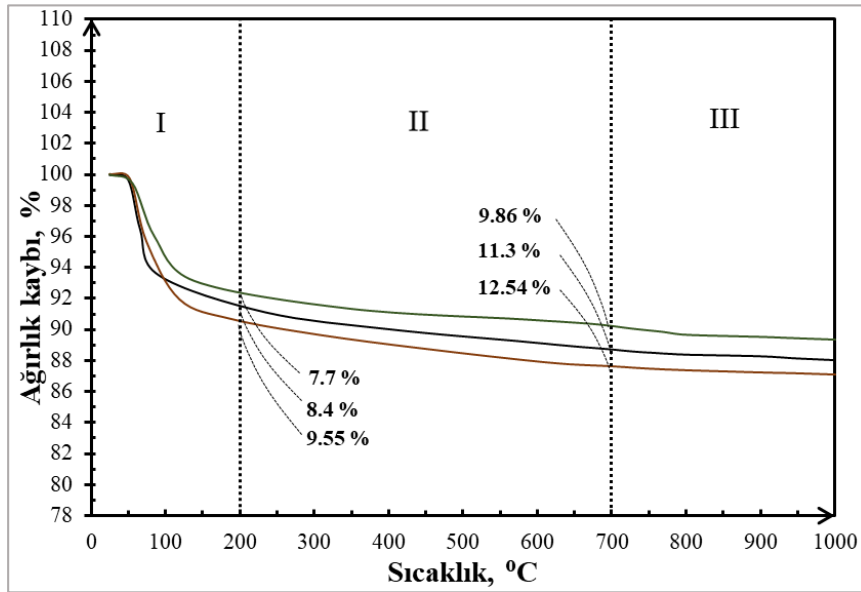
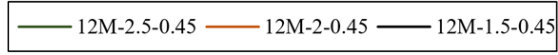


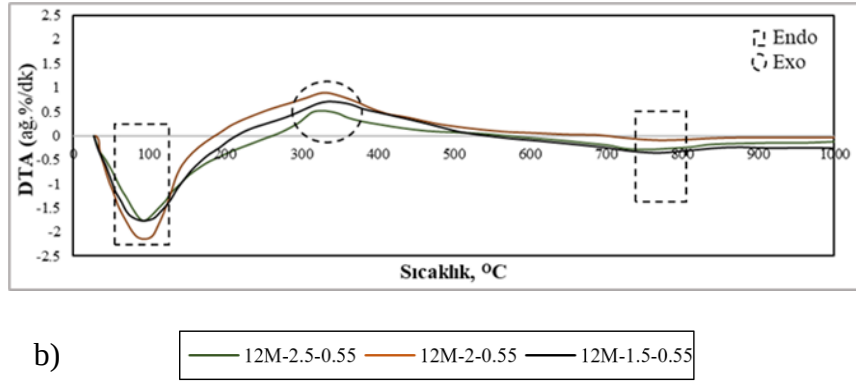
Şekil 4.26. 10 M SH konsantrasyonu ile hazırlanmış hafif geopolimer harçların a) 0.45 A/UK ve b) 0.55 A/UK için TGA ve DTA sonuçları

Şekil 4.27. (a) ve Şekil 4.27. (b) 12 M SH konsantrasyonu için sırasıyla 0.45 ve 0.55 A/UK oranlarında çeşitli SS/SH oranları ile elde edilen harçların TGA ve DTA eğrilerini göstermektedir. Oksit oranındaki değişiklik, daha fazla kimyasal bağlı su içeren farklı jel ürünlerinin oluşumuna neden olmaktadır (Nath ve ark., 2016; Cui ve ark., 2019). SH konsantrasyonu 12 M olan numunelerde, en düşük kütle kaybı 1.5 SS/SH oranı ve 0.45 A/UK oranı ile elde edilmiştir.



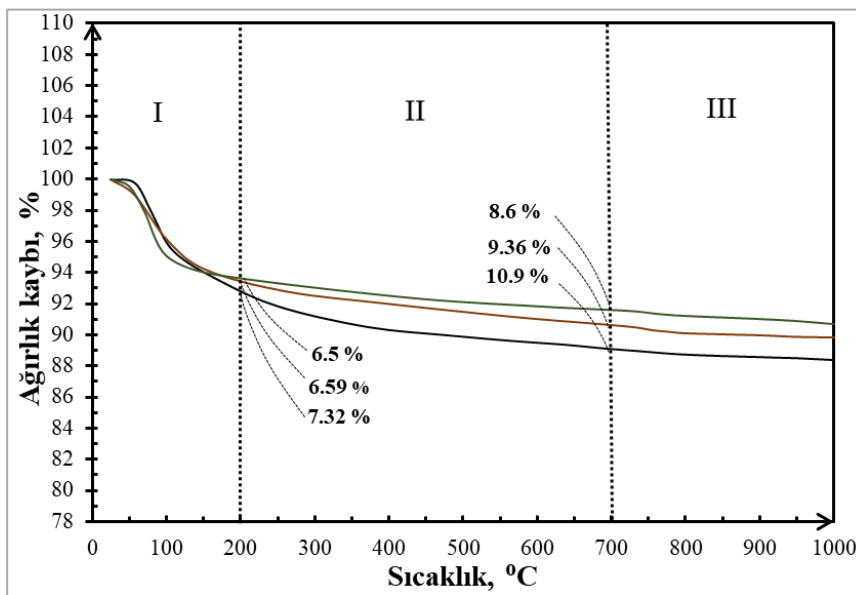
a)

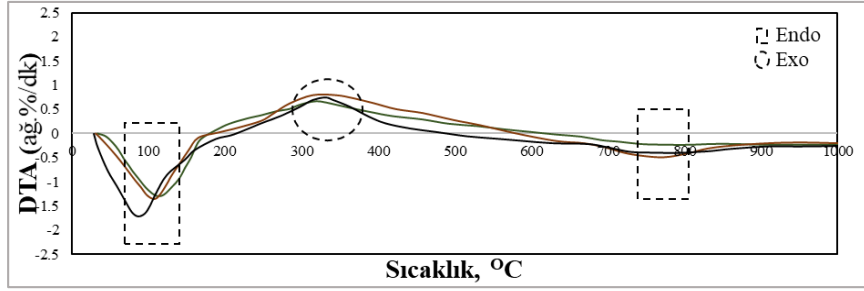




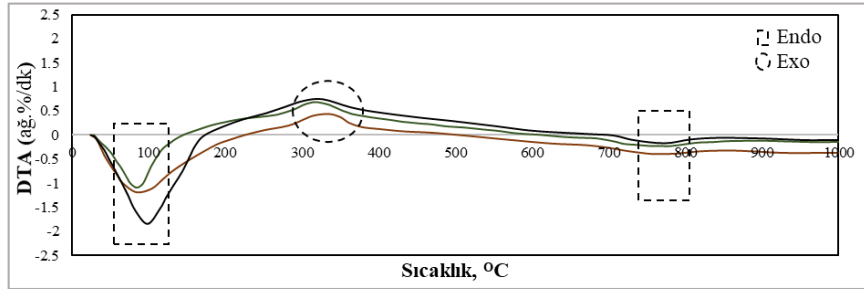
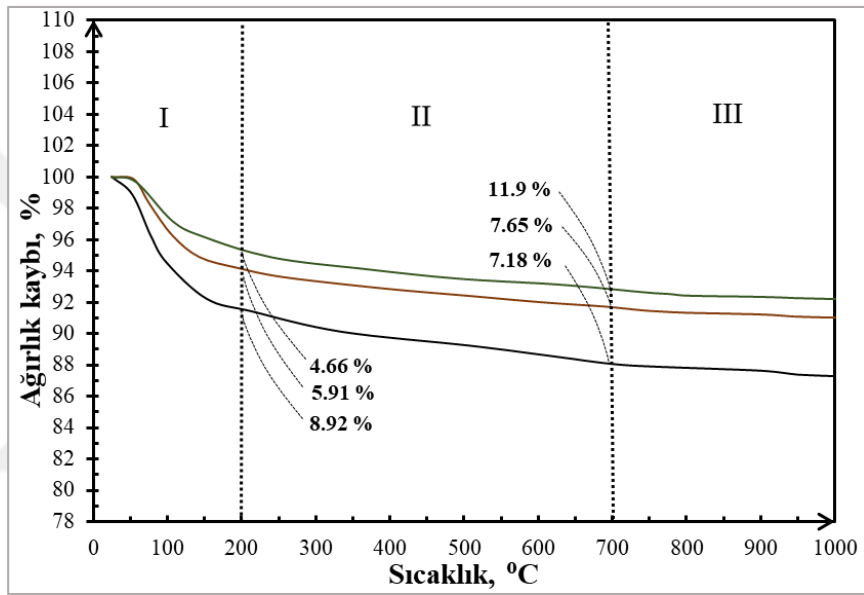
Şekil 4.27. 12 M SH konsantrasyonu ile hazırlanmış hafif geopolimer harçların a) 0.45 A/UK ve b) 0.55 A/UK için TGA ve DTA sonuçları

Şekil 4.28. (a) ve Şekil 4.28. (b), sırasıyla 0.45 ve 0.55 A/UK oranları için 14 M SH konsantrasyonu ve üç farklı SS/SH oranı ile üretilen numunelerin TGA ve DTA termogramlarını göstermektedir. SS/SH oranındaki düşüş, karışımın reaksiyon ürünleri ve bileşimi nedeniyle daha yüksek kütle kaybına ve termal değişime neden olmuştur. Daha önce belirtildiği gibi, SS/SH oranlarının düşmesiyle birlikte basınç dayanımı sonuçları da artmıştır ve yüksek dayanım daha fazla geopolimerizasyon ürünü oluşumu ile ilişkilendirilebilir ve bu da kütle kaybının artmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, daha düşük dayanım gelişimi, daha az kütle kaybıyla sonuçlanmıştır. Benzer sonuç bazı araştırmacılar tarafından da gözlemlenmiştir (Nath ve ark., 2016; Burduhos ve ark., 2020; Nath ve Kumar, 2020).

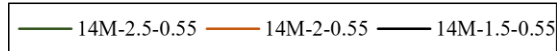




a)



b)



Şekil 4.28. 14 M SH konsantrasyonu ile hazırlanmış hafif geopolimer harçların a) 0.45 A/UK ve b) 0.55 A/UK için TGA ve DTA sonuçları

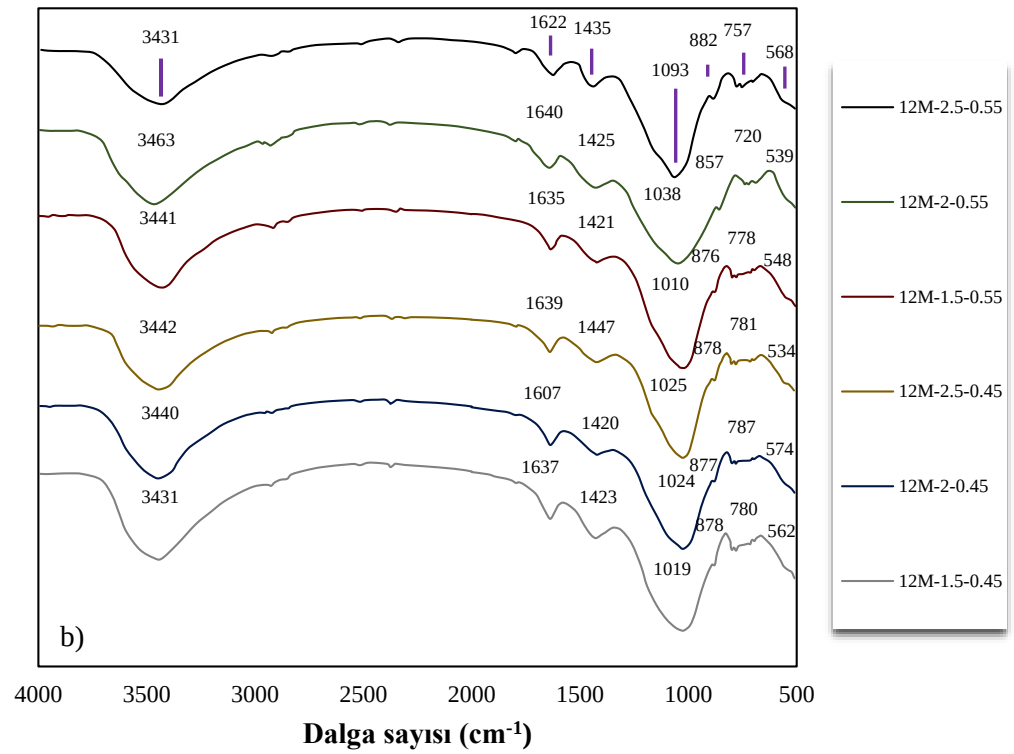
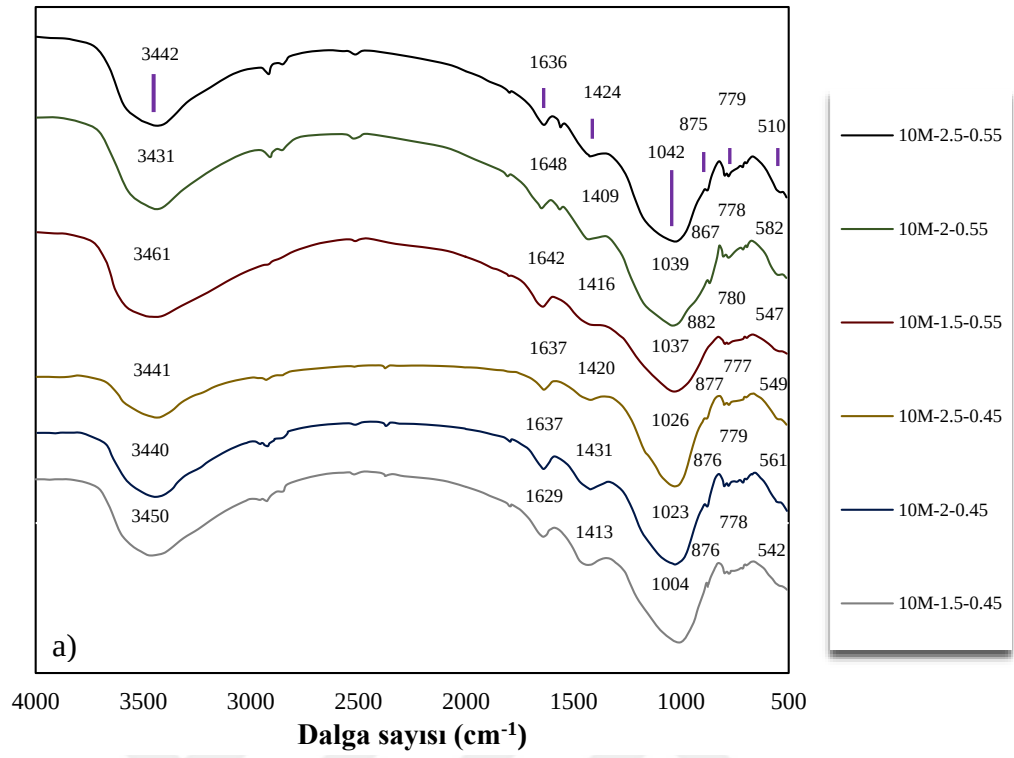
4.4.3. FTIR analizi

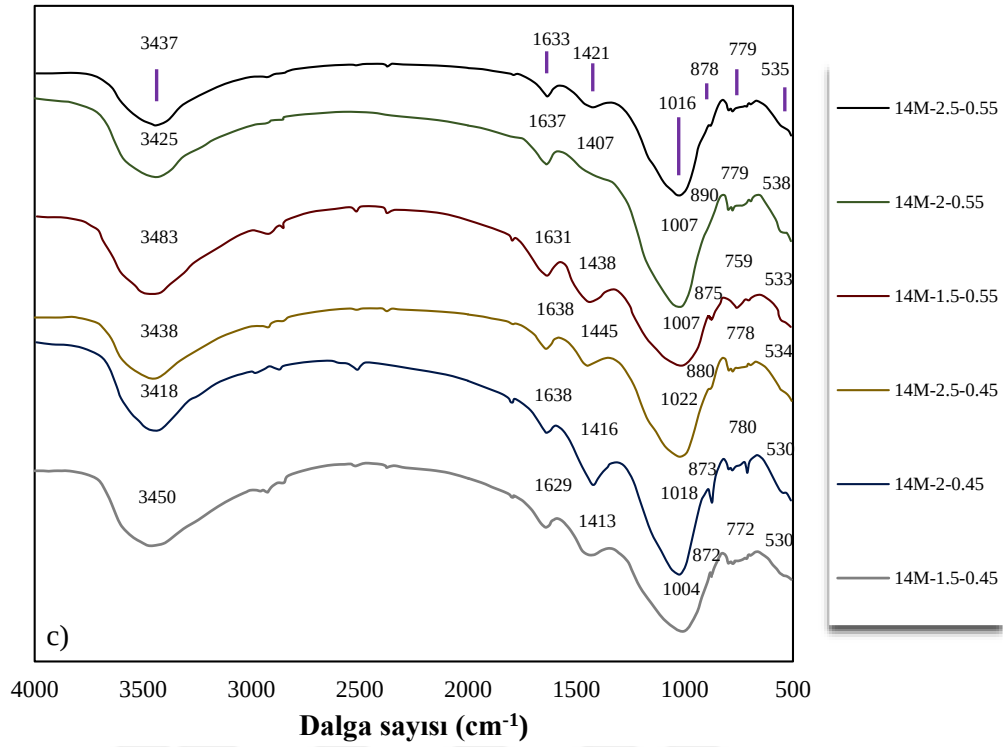
Hafif geopolimer harçların aktivasyon ürünlerinin incelenmesi amaçlandığından FTIR spektrum araştırması gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.29. (a), 4.29. (b) ve 4.29. (c), sırasıyla 10 M, 12 M ve 14 M SH konsantrasyonuna sahip hafif geopolimer harçların FTIR spektrum grafiklerini sunmaktadır. Tüm harç numuneleri için reaksiyon ürünlerine bağlı olarak benzer FTIR bantları oluşmuştur. Hafif geopolimer harçların elde edilen ana FTIR bant aralıkları Çizelge 4.5.'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. FTIR bant aralıkları

Dalga sayısı (cm ⁻¹)	Oluşum
3425-3483	O-H gerilme titreşimi
1607-1648	H-O-H eğilme titreşimi
1407-1447	O-C-O bağlarının gerilme titreşimi
1007-1093	Si/Al-O-Si bağlarının gerilme titreşimi
857-890	Al-O eğilme modu
510-574	Si/Al-O eğilme modu

3425-3483 ve 1607-1648 cm⁻¹'deki tepe bantları, sırasıyla tüm sentezlenmiş harç numunelerinde bağlı suyun gerilme titreşimi ve eğilme titreşimi ile ilişkilidir. Hidratasyon sürecinin ve reaksiyon ürünlerinin oluşumunu kanıtladığı için iki absorbans spektrumları oldukça önemlidir (Giannopoulou ve ark., 2010; Kovtun ve ark., 2015). Bant değerlerinin artışı, emilen su moleküllerinin derecesi ile ilişkilendirilebilir.





Şekil 4.29. Hafif geopolimer harçların a) 10M SH konsantrasyonu, b) 12M SH konsantrasyonu ve c) 14M SH konsantrasyonu için FTIR sonuçları

Şekil 4.29. (a) 'dan görüldüğü gibi, A/UK oranının 0.55'ten 0.45'e düşmesi, 3400 cm^{-1} civarında daha yüksek absorbands spektrumları ile sonuçlanmıştır, bu da geopolimerizasyon aşamasında daha fazla suyun bağlandığını göstermektedir. 1407-1447 cm^{-1} aralığındaki bantlar, tüm hafif geopolimer harç örneklerinde karbonat gruplarının oluşumunun kanıtı olan O-C-O bağlarının gerilme titreşimine karşılık gelmektedir (Farmer, 1974; Criado ve ark., 2005; Yip ve ark., 2008; Cui ve ark., 2019). Atmosferik karbonatlaşma, yüksek SH konsantrasyon değerlerine bağlanmaktadır. Şekil 4.29. (a), 4.29. (b) ve 4.29. (c) karşılaştırıldığında, 1400 cm^{-1} civarındaki dalga sayısı değerlerinin harç karışımlarındaki SH molarite artışından bağımsız olarak değiştiği tespit edilmiştir. 1007 ve 1093 cm^{-1} arasındaki belirgin bantlar ise Si/Al-O-Si bağlarının asimetrik gerilme titreşimine bağlanmaktadır (Pereira ark., 2015). Düşük bant frekansları, geopolimerizasyon ürünlerinin artışına karşılık gelmektedir. Bu kapsamda, SS/SH oranındaki düşüşle 1000 cm^{-1} civarındaki bantların yoğunluklarının azaldığı ve basınç dayanımı sonuçları ile uyumlu olduğu Şekil 4.29'dan görülmektedir. 857-890 cm^{-1} arasında değişen küçük absorbands pikleri, yapıdaki AlO_4 gruplarının titreşimi ile ilişkilendirilirken (Abdalqader ve ark., 2016) 510-574 cm^{-1}

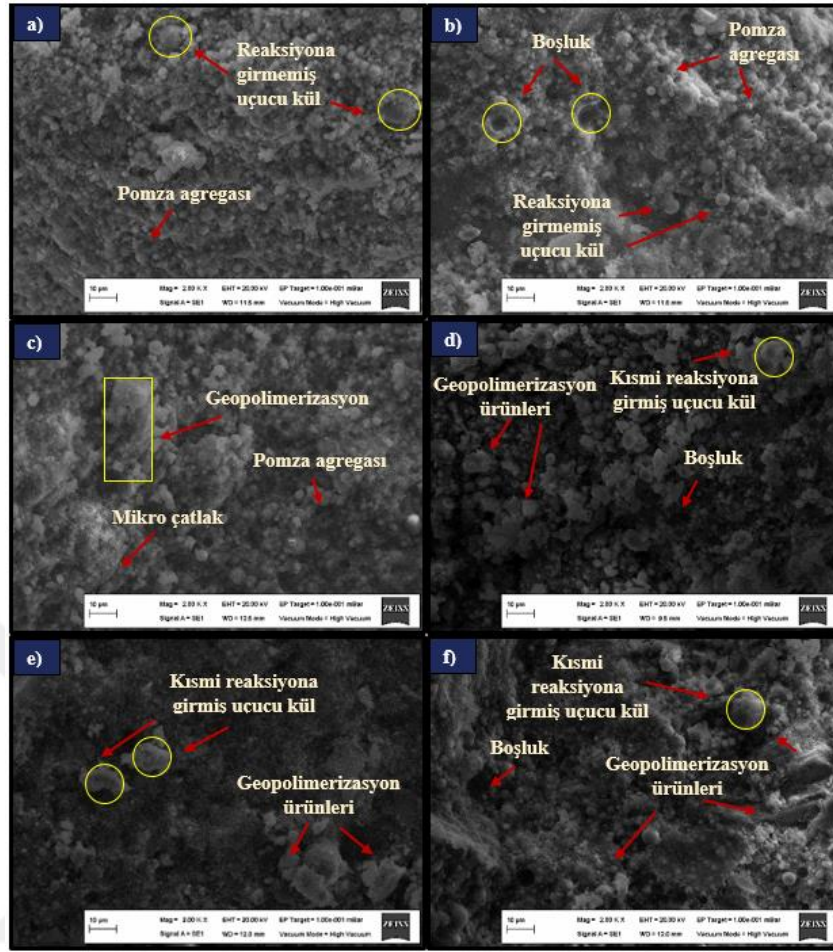
aralığındaki pikler ise SiO_4 veya AlO_4 tetrahedranının eğilme modu ile ilişkilidir (Rahier ve ark., 1997). Bu iki pik frekansı, geopolimerizasyon derecesine göre daha düşük değerlere kaymaktadır.

Tüm FTIR spektrumları göz önüne alındığında, çeşitli SS/SH oranları, SH molariteleri ve A/UK oranlarının kullanılmasının sentezlenen geopolimerizasyon ürünleri üzerindeki etkisinin çeşitli jel gruplarının oluşumuna bağlı olarak değişebileceği elde edilmektedir.

4.4.4. SEM analizi

Sem görüntüleri, hafif geopolimer harçların çalışmada incelenen farklı parametrelere bağlı olarak değişen mikro yapısını göstermektedir. İki farklı A/UK oranı ve üç farklı SS/SH oranı dikkate alınarak hazırlanmış 10 M, 12 M ve 14 M SH konsantrasyonlu numunelerinin sem görüntüleri sırasıyla Şekil 4.30., 4.31. ve 4.32.'de verilmiştir. Örneklerin sem görüntülerinde reaksiyona girmemiş uçucu kül, mikro/büyük gözenekler, çatlaklar, karışım parametreleri ve oranlarına göre değişen reaksiyon ürünleri ve kimyasal bileşenlerin görülmesi beklenmektedir. Bu yapılar sem görüntülerinde daha net bir şekilde işaretlenmiştir.

Şekillerde görüldüğü gibi SS/SH oranının düşmesi ile daha kompakt bir yapıya ulaşılmış ve bu durum elde edilen dayanım sonuçları ile de paralellik göstermektedir. Elde edilen bulgu, geopolimerizasyon reaksiyonunu engelleyen SiO_2 miktarındaki artış ile bağlantılıdır ve sem görüntülerinde de reaksiyona girmemiş uçucu kül partiküllerinin artışı gözlenmiştir.

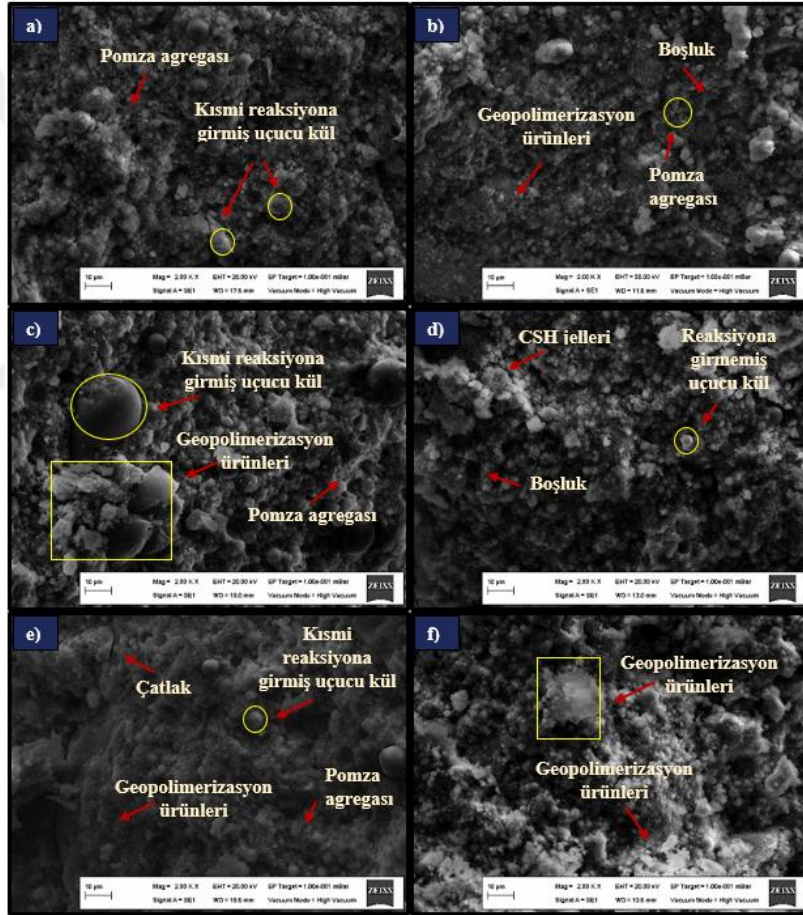


Şekil 4.30. 10M SH konsantrasyonu ile hazırlanan hafif geopolimer harçların a) S/FA:0.45 ve SS/SH:2.5 b) S/FA:0.55 ve SS/SH:2.5 c) S/FA:0.45 ve SS/SH:2 d) S/FA:0.55 ve SS/SH:2 e) S/FA:0.45 ve SS/SH:1.5 f) S/FA:0.55 ve SS/SH:1.5 için SEM görüntüleri

A/UK oranının 0.45'ten 0.55'e yükselmesi, fazla su miktarı nedeniyle daha gözenekli bir yapıya neden olmuştur. Suyun buharlaşmasıyla ortaya çıkan gözenekler matrisi zayıflatarak ve çatlak oluşumunu sebep olmaktadır. Kütleme veya numune hazırlama aşamalarında da bazı çatlak yapılarının oluştuğu düşünülmektedir ve bu bulgu bazı çalışmalarda da bildirilmiştir (Abdulkareem ve ark., 2014; ul Haq ve ark., 2014). Kullanılan uçucu kül oldukça ince tanelere sahip olduğundan mikro gözeneklerin dolmasına da katkıda bulunmuştur (Nath ve Kumar, 2020; Chindaprasirt ve Rattanasak, 2010; Martin ve ark., 2015; Zheng ve ark., 2016).

Daha yüksek SH konsantrasyonunda, OH^- alkali miktarı artmakta ve uçucu külde bulunan Si, Al katyonlarının daha fazla miktarlarda çözünmesine olanak sağlamaktadır. Sonuç olarak, ortaya çıkan reaksiyon ürünleri artmakta ve bu

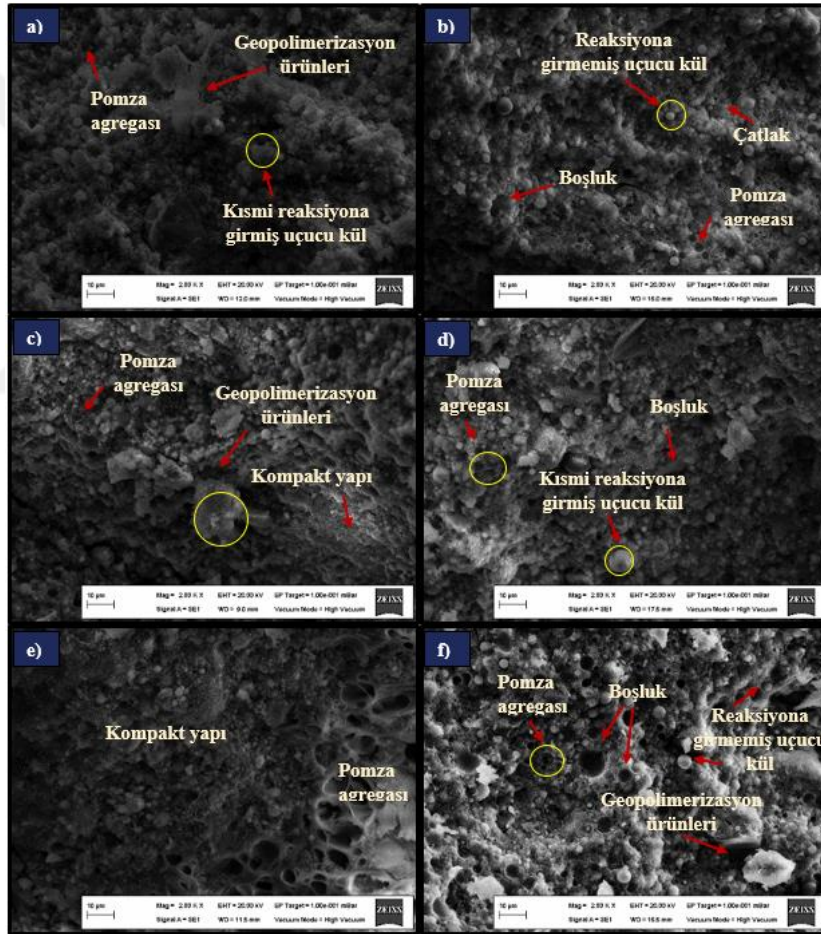
geopolimerizasyon ürünlerinin artışı, agrega/matrıs arayüzünü daha yoğun ve kusursuz hale getirmektedir (Chindaprasirt ve ark., 2009; De Vargas ve ark., 2011; Somna ve ark., 2011; Nazari ve Sanjayan, 2015; Nath ve ark., 2016). Oluşan jel yapıları boşlukları doldururken gözeneklerin miktarında ve boyutunda bir azalma gözlenmiştir. Şekil 4.31., 12 M SH konsantrasyonu ile hazırlanan harç numuneleri için sem görüntülerini göstermektedir Şekil 4.30.'de verilen görüntüler ile karşılaştırıldığında SH molaritesinin artması nedeniyle daha kompakt bir yapı görülebilmektedir. A/UK oranını ve SS/SH oranını artırmanın etkisi görüntülerde gözenek oluşumundaki artış ile ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.31. 12M SH konsantrasyonu ile hazırlanan hafif geopolimer harçların a) S/FA:0.45 ve SS/SH:2.5 b) S/FA:0.55 ve SS/SH:2.5 c) S/FA:0.45 ve SS/SH:2 d) S/FA:0.55 ve SS/SH:2 e) S/FA:0.45 ve SS/SH:1.5 f) S/FA:0.55 ve SS/SH:1.5 için SEM görüntüleri

Şekil 4.32., 14 M en yüksek SH molaritesi ile üretilen hafif geopolimer harç numunelerinin görüntülerini göstermektedir. Geopolimer matrıs ile agrega arasında bir

etkileşim söz konusudur. Pomza agregası içi boşluklu bir yapıya sahip olduğundan, matrisin agregaya nüfuzu daha kolay hale gelmektedir ve bu durum daha kompakt bir arayüz sağlamaktadır. Gözenekli pomza agregası tanelerinin içine nüfuz eden uçucu kül ve oluşan geopolimer jel Şekil 4.32.'de görülebilmektedir. Ke ve ark., (2010) bu olayı emprenye etme modeli ile açıklamıştır. Pomza agregasının pürüzlü ve gözenekli yapısı nedeniyle, hamur fazın agreganın içine nüfuz etmesi mümkündür ve bu durum, arayüz bölgesinin SEM görüntülerinde net bir şekilde görünmesini de engellemiştir. Bu sonuca, Topçu ve Uygunoğlu (2007) ile Abdulkareem ve Ramli (2015) tarafından yapılan çalışmalarda da yer verilmiştir.



Şekil 4.32. 14M SH konsantrasyonu ile hazırlanan hafif geopolimer harçların a) S/FA:0.45 ve SS/SH:2.5 b) S/FA:0.55 ve SS/SH:2.5 c) S/FA:0.45 ve SS/SH:2 d) S/FA:0.55 ve SS/SH:2 e) S/FA:0.45 ve SS/SH:1.5 f) S/FA:0.55 ve SS/SH:1.5 için SEM görüntüleri

Matristeki su molekülü miktarı daha yüksek A/UK oranı ile artmaktadır ve uçucu kül ile alkali çözelti arasındaki bağlantı engellendiğinden daha gözenekli bir yapı elde

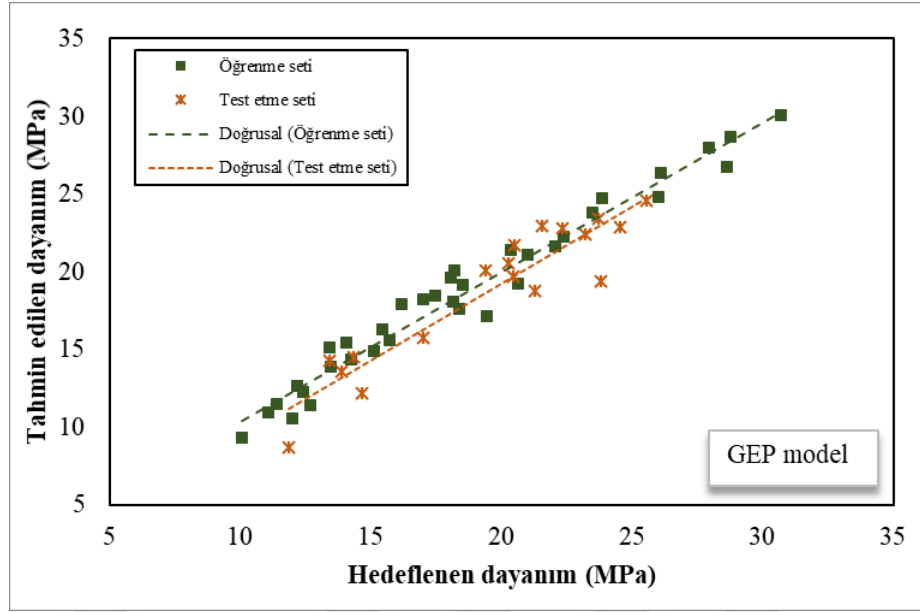
edilmektedir. Benzer bir sonuç He ve ark., (2011) tarafından potasyum bazlı geopolimer beton ile yapılan bir çalışmada da sunulmuştur. Sem görüntülerindeki boşluklar, Bakharev, (2005)'in araştırmasına paralel olarak fazla suyun buharlaşması ile de açıklanabilmektedir.

4.5. İstatistiksel Analiz ve Modelleme

Deneysel çalışma sonucunda elde edilen basınç dayanımı ve rötre değerleri için istatistiksel modelleme yapılmıştır. GEP ve ÇDR kullanılarak tahmin modelleri oluşturulmuş ve bu değerlerin hedeflenen sonuçlar ile ilişkisine bakılmıştır. Aynı zamanda her iki tahmin modeli ile elde edilen verilerin kıyaslanmasına da bu bölümde yer verilmiştir.

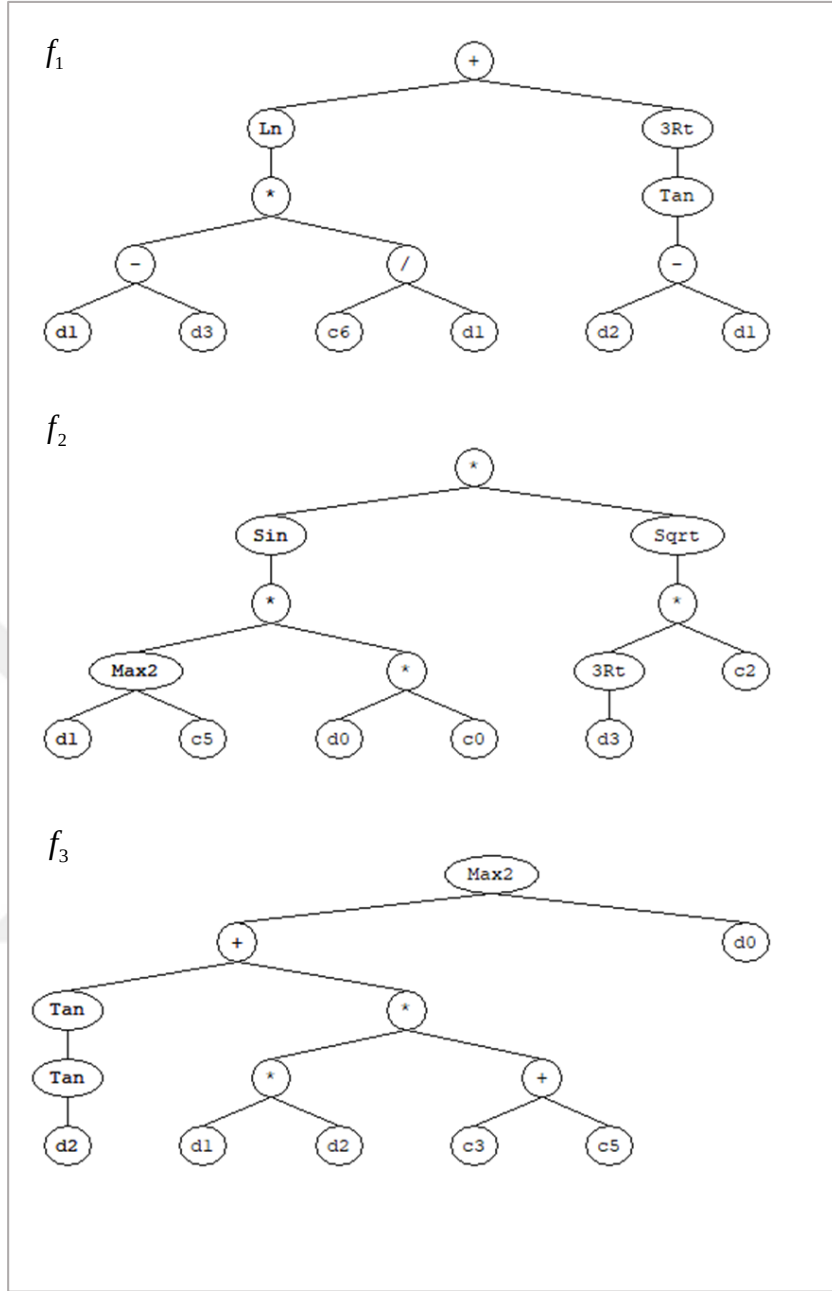
4.5.1. Basınç dayanım sonuçlarının değerlendirilmesi

Şekil 4.33.'te GEP kullanılarak tahmin edilen ile hedeflenen dayanımlar arasındaki ilişki verilmiştir. Öğrenme veri seti ile ilk olarak algoritma oluşturulması sağlandıktan sonra test veri seti ile modellemenin uygunluğu test edilmiş olmaktadır. Şekil 4.33.'te hem öğrenme seti için kullanılan veriler hem de test seti için kullanılan değerler sunulmuştur. Öğrenme aşaması için 36 veri kullanılırken, test aşamasında 18 veri kullanılmıştır. Her iki set için de tahmin edilen değerlerin deneysel çalışmadan elde edilen verilerle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 4.33. GEP modeli ile tahmin edilen dayanım değerleri ile hedeflenen değerler arasındaki ilişki

Gen ekspresyon programlama kullanılarak çeşitli sodyum hidroksit molariteleri, alkali/uçucu kül (A/UK) oranları, sodyum silikat/sodyum hidroksit (SS/SH) oranları ve farklı yaşları içeren girdiler ile elde edilen basınç dayanımları oluşturulan model ile tahmin edilebilmektedir. Oluşturulan modeli temsil eden ağaç gösterimi Şekil 4.34.'te nihai sonuç ise Denklem 4.6.'da (Denklem 4.2.-4.5.'te verilen denklemlerin toplamı) verilmiştir.



Şekil 4.34. Oluşturulan GEP modelinin ağaç gösterimi

Modeli temsil eden eşitliklerde d_0 ; molariteyi, d_1 ; A/UK oranını, d_2 ; SS/SH oranını, d_3 ; yaş parametresini temsil etmektedir. Denklem 4.6. için elde edilen korelasyon katsayısı 0.937 olarak bulunmuştur.

$$f_1 = \ln \left[\frac{-4.106 \times (d_1 - d_3)}{d_1} \right] + \sqrt[3]{A} \quad (4.2)$$

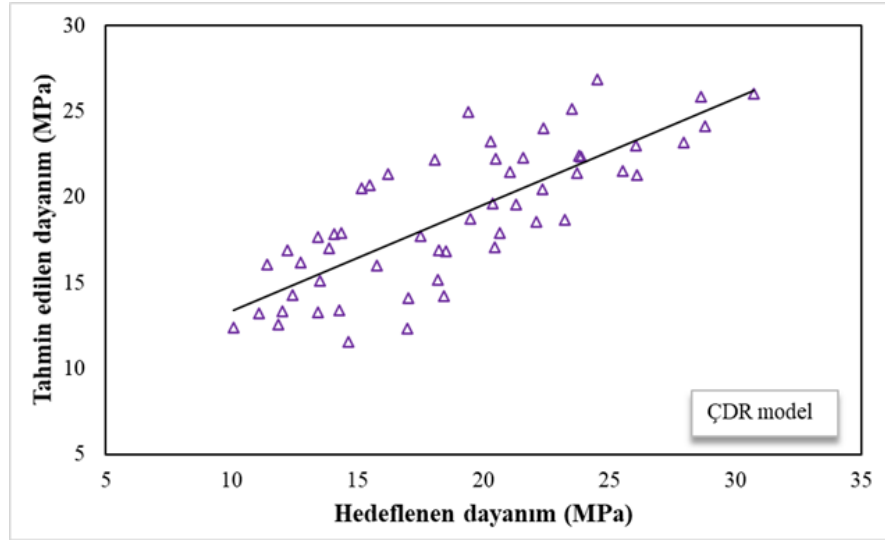
$$f_1' = \ln \left[\frac{-4.106 \times (d_1 - d_3)}{d_1} \right] - \sqrt[3]{-A} \quad (4.3)$$

$$f_2 = \sin \left[3.613 \times d_0 \times \max(d_1; 0.453) \right] \times \sqrt{7.341 \times \sqrt[3]{A}} \quad (4.4)$$

$$f_3 = \max \left[\tan(\tan d_2) + 11.908 \times d_1 \times d_2; d_0 \right] \quad (4.5)$$

$$f_{c(GEP)} = \left\{ \begin{array}{ll} f_1 + f_2 + f_3 & A \geq 0 \\ f_1' + f_2 + f_3 & A < 0 \end{array} \right\} \quad A = \tan(d_2 - d_1) \quad (4.6)$$

Laboratuvar çalışması ile elde edilen basınç dayanım değerleri kullanılarak ÇDR yardımıyla, GEP ile oluşturulan modelden farklı bir model oluşturulmuştur. Bu kapsamda hedeflenen dayanım değerleri ile tahmin edilen değerler arasındaki lineer ilişki Şekil 4.35.'te gösterilmiştir.



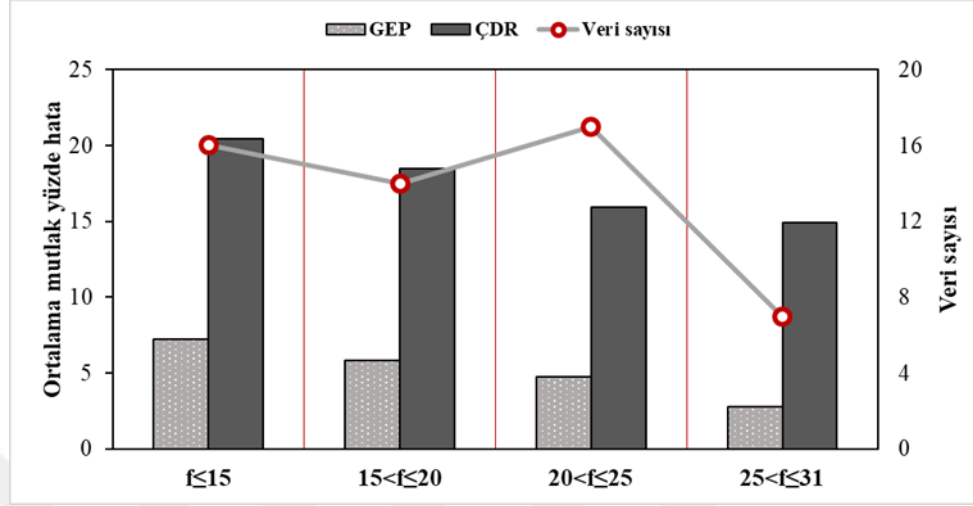
Şekil 4.35. GEP modeli ile tahmin edilen dayanım değerleri ile hedeflenen değerler arasındaki ilişki

ÇDR ile oluşturulan tahmin modelini temsil eden eşitlik, denklem 4.7.’de sunulmuştur. Girdi parametreleri olan d_0 , d_1 , d_2 ve d_3 sırasıyla SH molaritesini, A/UK oranını, SS/SH oranını ve yaş değişimini göstermektedir. Oluşturulan tahmin modelini temsil eden denklem için elde edilen korelasyon katsayısı 0.787 olarak bulunmuştur.

$$f_{c(MLR)} = 34.98 + 0.434 \times d_0 - 10.13 \times d_1 - 8.94 \times d_2 + 0.135 \times d_3 \quad (4.7)$$

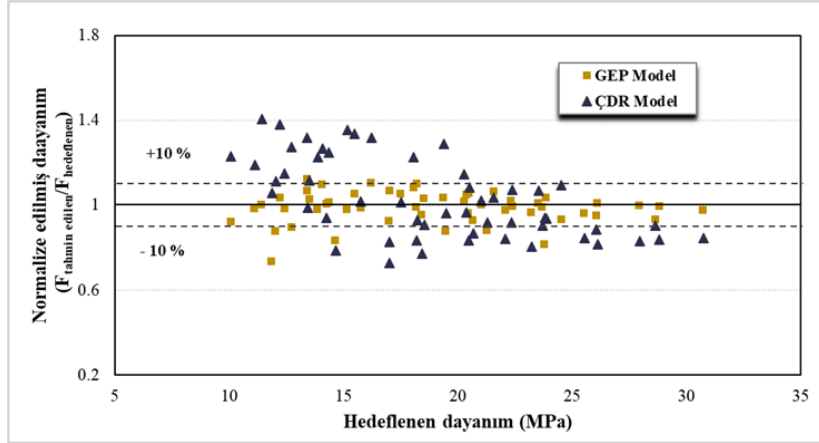
Deneyisel çalışma sonucunda elde edilen dayanım değerleri 15 ile 31 MPa arasında değişiklik göstermiştir. Şekil 36.’da da görüldüğü gibi hem GEP hem de ÇDR modeli kullanılarak ulaşılan bu dayanım değerleri kategorilere ayrılarak her bir kategoride bulunan veri sayısını dikkate alacak şekilde ortalama mutlak yüzde hata değerleri sunulmuştur. Değerler 15 MPa’dan küçük, 15 ile 20 MPa, 20 ile 25 MPa ve 25 ile 31 MPa arasında olacak şekilde 4 farklı kategoriye ayrılmıştır. Bu kategoride bulunan veri sayıları sırasıyla 16, 14, 17 ve 7 olmuştur. ÇDR analizi yardımı ile ulaşılan hata yüzdelерinin GEP programı kullanılarak ulaşılan hatalardan daha yüksek olması ÇDR ile elde edilen verilerin hedeflenen verilere yakınlığının ve uygunluğunun daha düşük olduğunu göstermiştir. En yüksek hata 15 MPa’dan küçük dayanım değerleri için elde edilirken en düşük hata oranları 25 ile 31 MPa arasında bulunan dayanım değerleri için elde edilmiştir. Ortalama mutlak yüzde hatalarının kabul

edilebilir bir düzeyde olması oluşturulan model ile tahmin edilen verilerin hedeflenen değerlere yakınlığını ve dolayısıyla oluşturulan modelin uygunluğunun göstergesidir.



Şekil 4.36. GEP ve ÇDR modelleri kullanılarak elde edilen dayanım değerleri için ortalama yüzde hata sonuçları

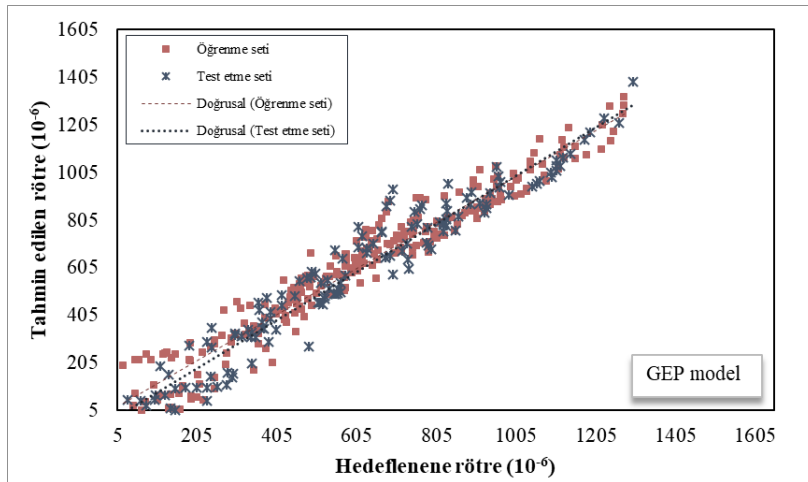
Şekil 4.37.'de hem GEP hem de ÇDR modeli için hedeflenen dayanımlara karşılık gelen normalize edilmiş dayanım değerleri sunulmuştur. Normalize edilmiş dayanım değerleri tahmin edilen dayanım değerlerinin hedeflenen dayanım değerlerine bölünmesi ile elde edilmiştir. Bu oranın 1' yakınlığı oluşturulan modellerin doğruluğunun göstergesi olarak düşünülebilmektedir. Şekilde 4.37.'de görüldüğü gibi ÇDR ile oluşturulan model yardımı ile elde edilen dayanım sonuçları GEP ile elde edilen verilerden daha uyumsuz sonuçlar sunmuştur. Bu durum, 0.937 korelasyon katsayısına sahip GEP modelinin 0.787 korelasyon katsayısına sahip ÇDR'den daha iyi tahminler yaptığını doğrulamaktadır.



Şekil 4.37. GEP ve ÇDR modelleri için normalize edilmiş dayanım değerleri

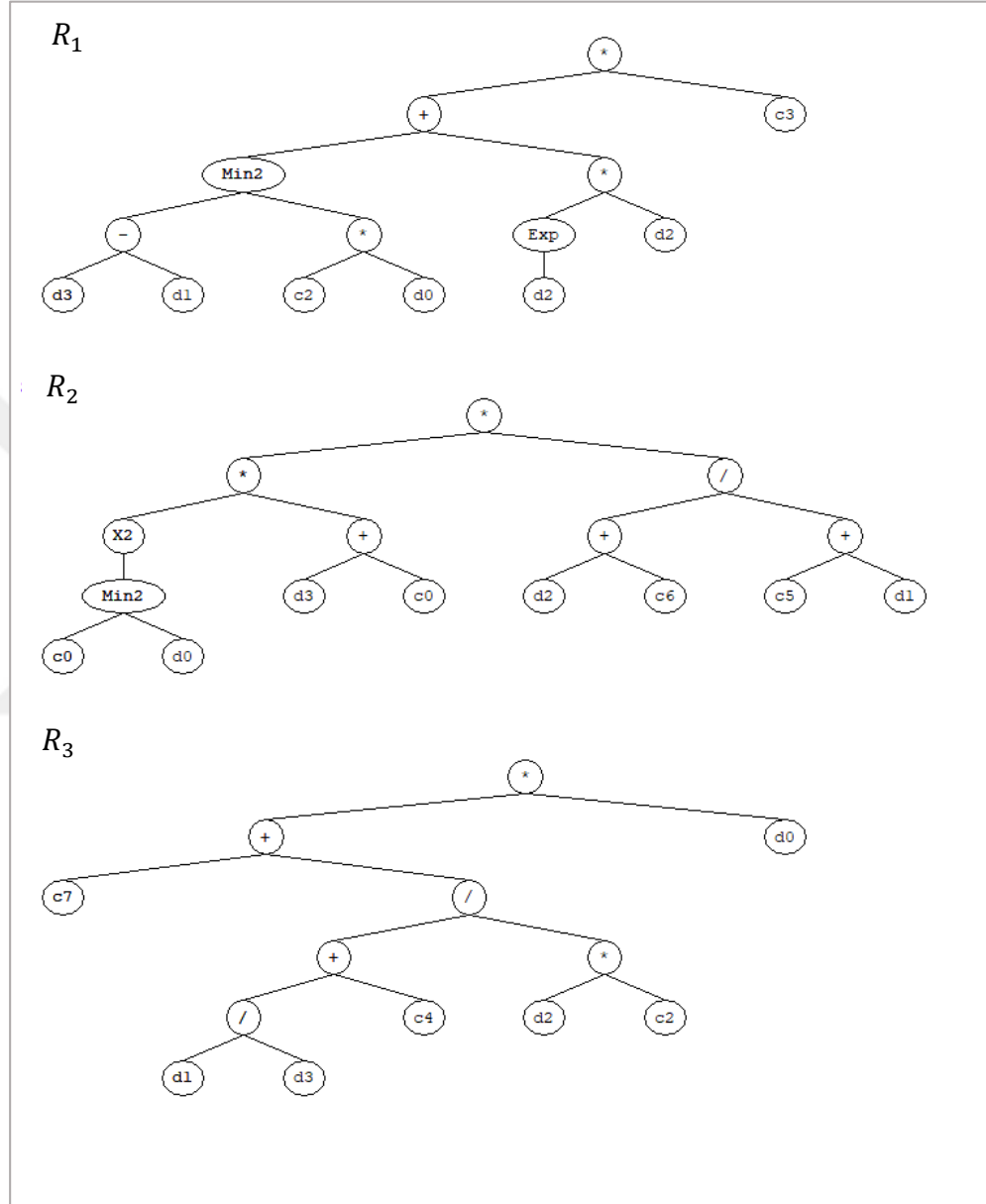
4.5.2. Rötire sonuçlarının değerlendirilmesi

Şekil 4.38.'de GEP kullanılarak oluşturulan model yardımı ile mevcut rötire değerlerine karşılık gelen tahmin değerleri sunulmuştur. Hafif geopolimer harçlar için SH molaritesi, SS/SH oranları, A/UK oranları ve yaş parametreleri dikkate alınarak hazırlanan numuneler üzerinde laboratuvar ortamında gerçekleştirilen rötire ölçümleri sonucunda elde edilen değerler 20 ile 1296.43 mikro uzama arasında değişmektedir. Uygun model oluşturulurken ilk olarak 288 rötire verisi kullanılarak öğrenme seti oluşturulmuş daha sonra 144 adet veri seti ile test etme aşaması gerçekleştirilmiştir. Şekilde 4.38. tahmin edilen ve hedeflenen değerler arasındaki ilişki oluşturulan modelin uygunluğunu göstermektedir.



Şekil 4.38. GEP modeli ile tahmin edilen rötire değerleri ile hedeflenen değerler arasındaki ilişki

Şekil 4.39.'da GEP programı ile oluşturulan modele ait denklemlerin ağaç gösterimi verilmiştir. Nihai eşitlik ise denklem 4.8.-4.10.'da verilen denklemlerin toplamından oluşan denklem 4.11.'de verilmiştir.



Şekil 4.39. Oluşturulan GEP modelinin ağaç gösterimi

Elde edilen eşitliklerde belirtilen d_0 , d_1 , d_2 ve d_3 sırasıyla yaş, SH molaritesi, SS/SH oranı ve A/UK oranı parametrelerini temsil etmektedir. Denklem 4.11.'de verilen denklem için korelasyon katsayısı 0.97 olarak bulunmuştur.

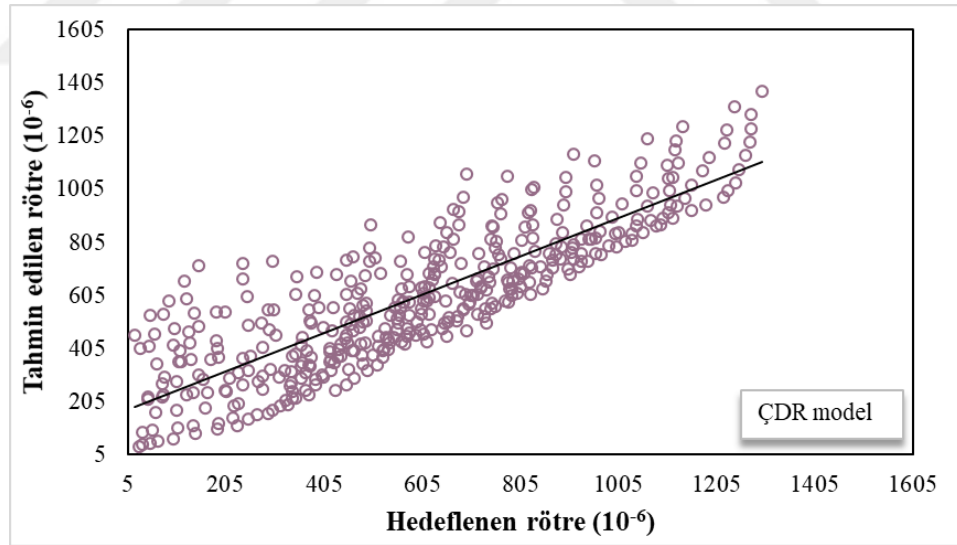
$$R_1 = ([\min[(d_3 - d_1); (-0.349 \times d_0)] + (d_2 \times e^{d_2})] \times 10.687) \quad (4.8)$$

$$R_2 = ([\min[8.804; d_0]^2 \times (8.804 + d_3)] \times [\frac{(4.53 + d_2)}{-1.257 + d_1}]) \quad (4.9)$$

$$R_3 = ([10.612 + \frac{(\frac{d_1}{d_3} - 12.332)}{-1.495 \times d_2}] \times d_0) \quad (4.10)$$

$$R_{(GEP)} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (4.11)$$

Elde edilen veriler için aynı zamanda ÇDR kullanılarak da tahmin modeli oluşturulmuş ve hedeflenen rötre değerleri ile tahmin edilen rötre değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.40.'da sunulmuştur.

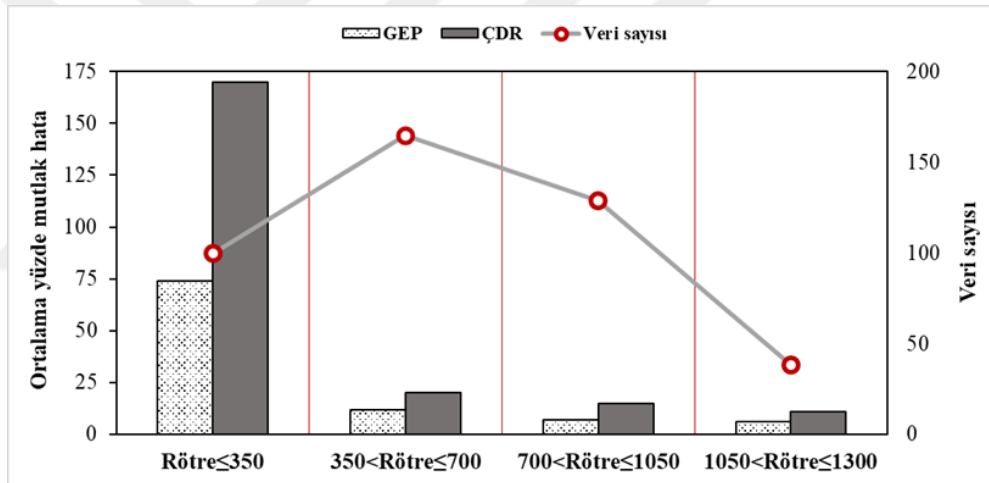


Şekil 4.40. ÇDR modeli ile tahmin edilen rötre değerleri ile hedeflenen değerler arasındaki ilişki

ÇDR ile oluşturulan tahmin modelini temsil eden eşitlik, denklem 4.12.'de sunulmuştur. Girdi parametreleri olan d_0 , d_1 , d_2 ve d_3 sırasıyla yaş, SH molarite değeri, SS/SH oranı ve A/UK oranı değişimini göstermektedir. Oluşturulan tahmin modelini temsil eden denklem için elde edilen korelasyon katsayısı 0.849 olarak bulunmuştur.

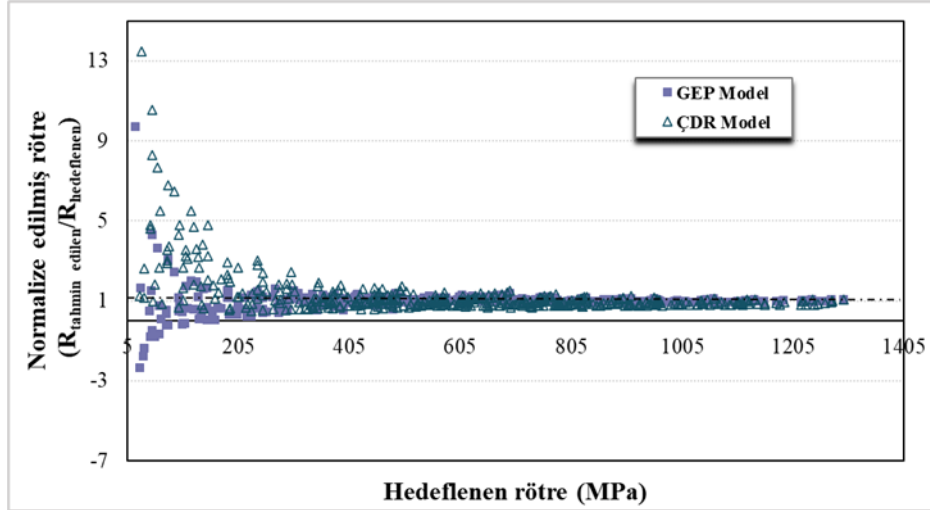
$$R_{(MLR)} = 152 + 7.378 \times d_0 - 65.92 \times d_1 + 361.3 \times d_2 + 530 \times d_3 \quad (4.12)$$

Şekil 4.41.'de kategorilere ayrılan rötre değerleri için kullanılan veri sayıları ile birlikte elde edilen ortalama yüzde mutlak hata oranları gösterilmiştir. Mikro uzaması 350 'den küçük, 350 ile 700 arasında, 700 ile 1050 arasında ve 1050 ile 1300 arasında olacak şekilde oluşturulan 4 farklı kategoride bulunan veri sayıları sırasıyla 100, 165, 129 ve 38 olmuştur. Şekil 4.41.'de görüldüğü üzere ÇDR modeli ile elde edilen veriler için ortalama yüzde mutlak hata değerleri GEP modeli ile elde edilen sonuçlardan daha yüksek olmuştur. Bu durum GEP modelinin daha uygun olduğunun göstergesidir. Aynı zamanda artan rötre değerleri ile ulaşılan ortalama yüzde hatalarının da düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.41. GEP ve ÇDR modelleri kullanılarak elde edilen dayanım değerleri için ortalama yüzde hata sonuçları

Şekil 4.42.'de hem GEP hem de ÇDR modeli için hedeflenen rötreye değerlerine karşılık gelen normalize edilmiş rötreye değerleri sunulmuştur. Tahmin edilen rötreye değerlerinin hedeflenen rötreye değerlerine bölünmesi ile elde edilen normalize rötrenin 1' yakınlığı oluşturulan modelin uygunluğunu göstermektedir. Şekil 4.42.'de ÇDR modeli ile oluşturulan mikro uzaması 350 'den küçük rötreye değerleri için normalize edilmiş rötreye sonuçlarında görülen bariz sapma aynı zamanda Şekil 4.41.'de de görülmektedir.



Şekil 4.42. GEP ve ÇDR modelleri için normalize edilmiş dayanım değerleri

Çizelge 4.6.'da dayanım ve rötre sonuçları için GEP ve ÇDR ile elde edilen tahmin modelleri sonucunda ortaya çıkan veriler kullanılarak hesaplanan MSE (ortalama kare hata), RMSE (kök ortalama kare hata), MAPE (ortalama mutlak yüzde hata) ve R (korelasyon katsayısı) parametreleri verilmiştir. MSE, RMSE ve MAPE sonuçları ile kullanılan model sayesinde ulaşılan verilerin, mevcut hedeflenen değerlere uyumu belirlenebilmektedir. Elde edilen bu değerlerin artması tahmin değerlerindeki hata oranlarının artması olarak ortaya çıkmaktadır.

Diğer tüm parametrelerin de dikkate alınmasıyla R korelasyon katsayılarındaki artış da verilerin uygunluğunun bir diğer göstergesi olabilmektedir. Bu durumda ortaya çıkan sonuçlar değerlendirildiğinde, GEP modeli kullanılarak oluşturulan tüm veri tahminlerinin ÇDR modeli ile oluşturulan veri tahminlerine göre hedeflenen değerlere daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Çizelge 4.6.İstatistiksel değerlendirme

	Model	MSE	RMSE	MAPE	R
Dayanım	GEP _{test}	2.983	1.727	7.186	0.937
	ÇDR	10.122	3.181	15.735	0.787
Rötre	GEP _{test}	6735.610	82.071	22.937	0.9697
	ÇDR	27242.942	165.054	54.342	0.8487

4.6. Optimizasyon

Bu araştırma kapsamında gerçekleştirilen ÇAO analizinde, piyasada bulunan Design-Expert (2010) adlı bir yazılım paketi kullanılmıştır. Çalışmada, program bünyesinde bulunan TYM ile tepkiler ve girdiler arasındaki işlevsel ilişkiyi bulmada en yaygın kullanılan tasarım yöntemi olan Merkezi Birleşik Tasarım tercih edilmiştir. SH molarite değerleri, SS/SH ve A/UK oranları birer girdi değişkeni olarak ele alınmış ve bu kapsamda uçucu kül esaslı hafif geopolimer harçların su emme, basınç dayanımı, termal iletkenlik ve kuruma rötresi deney sonuçları olmak üzere 4 farklı çıktı parametresi için elde edilen optimum değerler belirlenmiştir. Gerçekleştirilen optimizasyon analizi ile, bağımsız değişkenlere bağlı olarak deney sonuçlarını temsil eden en iyi modellerin elde edilmesi amaçlanmıştır. İstatistiksel ve matematiksel yaklaşımların bir kombinasyonu olan TYM kullanılarak oluşturulan bu modellerde, uçucu kül esaslı hafif geopolimer harçlarının maksimum basınç dayanımı, minimum su emme, minimum kuruma rötresi ve termal iletkenlik değerlerini sağlayacak SS/SH, A/UK oranları ve SH molarite değerlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışma kapsamındaki optimizasyon uygulamasında, çok değişkenli regresyon analizleri her bir tepki için yüksek dereceli polinom modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modellerin karmaşıklığını basitleştirmek için adımsal geriye doğru seçim algoritması kullanılmış ve istatistiksel olarak anlamlı model terimleri varyans analizi ile saptanmıştır. Ayrıca su emme, basınç dayanımı, termal iletkenlik ve kuruma rötresi tepkilerine ait belirlenen bu modellere üssel transformasyon uygulanmış olup, analizde bu kapsamda iyileştirmeye gidilmiştir. Su emme, basınç dayanımı, termal iletkenlik ve kuruma rötresi tepkileri için gerçekleştirilen regresyon

analizinden elde edilen ve üssel transformasyon uygulanan denklemler (Denklem 4.13-4.16) aşağıda verilmiştir. Bu denklemlerde kullanılan terimler, bu terimlerin katsayı değerleri ve her bir tepki için yapılan varyans analizinden (ANOVA) elde edilen sonuçlar Çizelge 4.7.'de sunulmuştur. Su emme, basınç dayanımı, termal iletkenlik ve kuruma rötresi tepki modellerine ait p -değerlerinin 0.05'ten daha küçük olması sunulan bu modellerin %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.7. Su emme, termal iletkenlik, basınç dayanımı ve kuruma rötresi için regresyon modellerinde (Denklem 4.13-4.16) kullanılan katsayılar ve ANOVA sonuçları

Tepki	Kaynak	Katsayı	İstatistiksel parametreler						Anlamlılık
			Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F	p-değeri	Katkı (%)	
Su emme (%)	Model	$a_1=4.14103$	2.83	4	0.71	150.73	<0.0001	-	Evet
	A-A/UK	$a_2=5.40288$	1.31	1	1.31	279.74	<0.0001	45.31	Evet
	B-SS/SH	$a_3=1.27223$	0.33	1	0.33	70.47	<0.0001	11.41	Evet
	C-Molarite	$a_4=0.15454$	1.15	1	1.15	244.12	<0.0001	39.78	Evet
	B²	$a_5=0.40109$	0.040	1	0.040	8.56	0.0118	1.38	Evet
	Artık		0.061	13	4.696×10^{-3}			2.11	Evet
Termal iletkenlik (W/mK)	Model	$b_1=0.52536$	0.12	3	0.038	18.56	<0.0001	-	Evet
	A-A/UK	$b_2=0.67684$	0.021	1	0.021	9.97	0.0070	14.48	Evet
	B-SS/SH	$b_3=0.098061$	0.029	1	0.029	13.95	0.0022	20.00	Evet
	C-Molarite	$b_4=0.036993$	0.066	1	0.066	31.76	<0.0001	45.52	Evet
	Artık		0.029	14	2.068×10^{-3}			20.00	Evet
Basınç dayanımı (MPa)	Model	$c_1=148.20235$	33.50	7	4.79	57.38	<0.0001	-	Evet
	A-A/UK	$c_2=296.98021$	0.016	1	0.016	0.20	0.6682	0.05	Hayır
	B-SS/SH	$c_3=3.36198$	12.83	1	12.83	153.81	<0.0001	38.40	Evet
	C-Molarite	$c_4=24.51643$	18.55	1	18.55	226.36	<0.0001	55.51	Evet
	AC	$c_5=50.05407$	0.018	1	0.018	0.21	0.6551	0.05	Hayır
	B²	$c_6=1.35750$	0.46	1	0.46	5.52	0.0406	1.38	Evet
	C²	$c_7=1.05542$	1.369×10^{-3}	1	1.369×10^{-3}	0.016	0.9006	0.00	Hayır
	AC²	$c_8=2.10158$	0.71	1	0.71	8.47	0.0155	2.12	Evet
	Artık		0.83	10	0.083			2.48	-
Kuruma rötresi (10⁻⁶)	Model	$d_1=3627.78543$	32914.95	7	4702.14	80.98	<0.0001	-	Evet
	A-A/UK	$d_2=7822.01811$	12.55	1	12.55	0.22	0.6520	0.04	Hayır
	B-SS/SH	$d_3=92.26683$	18440.69	1	18440.69	317.57	<0.0001	56.15	Evet
	C-Molarite	$d_4=665.36748$	12752.55	1	12752.55	219.61	<0.0001	38.83	Evet
	AC	$d_5=1331.51049$	63.59	1	63.59	1.10	0.3200	0.19	Hayır
	B²	$d_6=42.66724$	455.12	1	455.12	7.84	0.0188	1.39	Evet
	C²	$d_7=28.88240$	28.13	1	28.13	0.48	0.5023	0.09	Hayır
	AC²	$d_8=56.43880$	509.65	1	509.65	8.78	0.0142	1.55	Evet
	Artık		580.68	10	58.07			1.77	-

$$\text{Su emme} = (a_1 + a_2A - a_3B - a_4C + a_5B^2)^{\frac{1}{0.6}} \quad (4.13)$$

$$\text{Termal iletkenlik} = (a_1 - a_2A - a_3B + a_4C)^{\frac{1}{2.22}} \quad (4.14)$$

$$\text{Basınç dayanımı} = (c_1 - c_2A + c_3B - c_4C + c_5AC - c_6B^2 + c_7C^2 - c_8AC^2)^{\frac{1}{0.67}} \quad (4.15)$$

$$\text{Kuruma rötresi} = (-d_1 + d_2A - d_3B + d_4C - d_5AC + d_6B^2 - d_7C^2 + d_8AC^2)^{\frac{1}{0.77}} \quad (4.16)$$

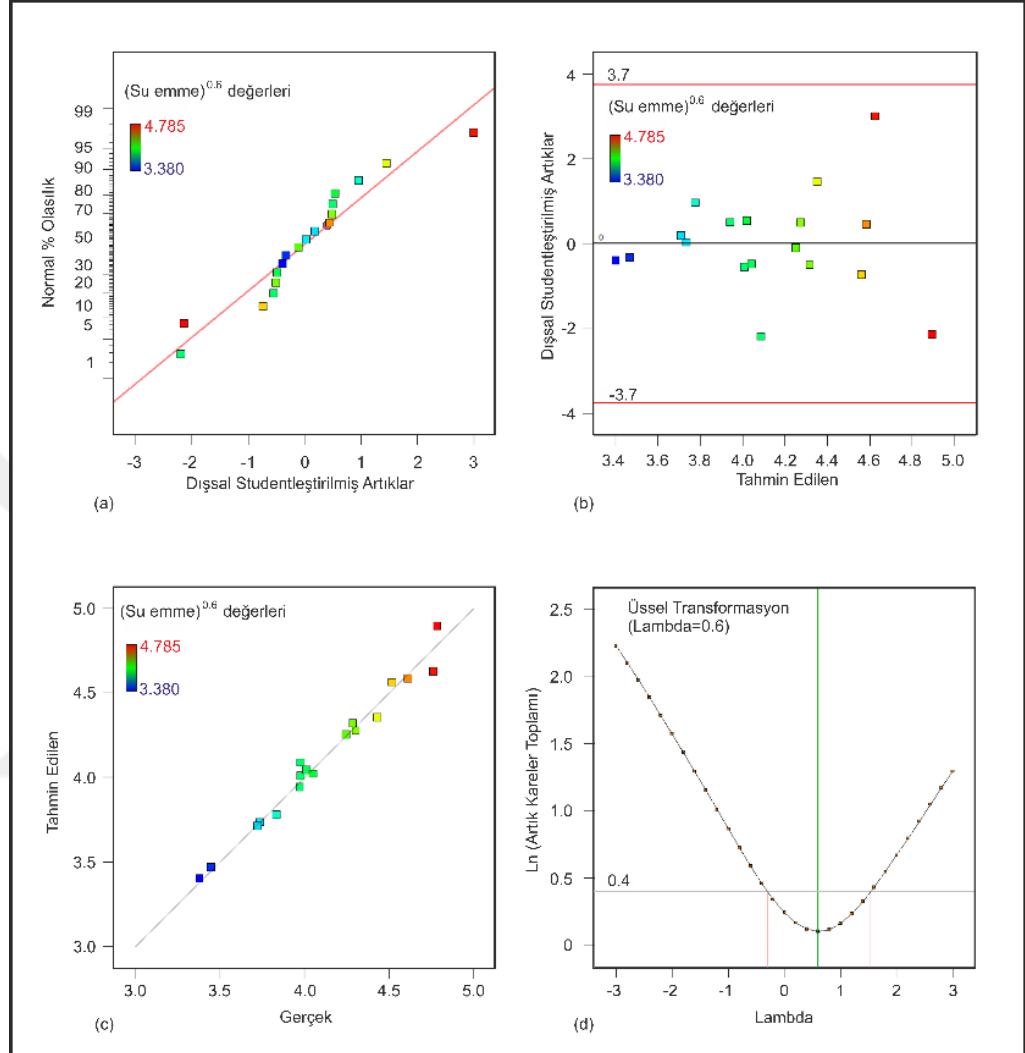
Her bir tepkiye ait regresyon modeli için tanımlayıcı istatistiksel veriler Çizelge 4.8.'de sunulmuştur. Çizelge 4.8.'de görüldüğü gibi, su emme, basınç dayanımı ve kuruma rötresi modelleri 0.98 R^2 değerine sahip olup, termal iletkenlik için ise bu değer 0.8 olarak elde edilmiştir. Tüm modeller için düzeltilmiş R^2 ve tahmin edilen R^2 değerleri arasındaki fark 0.2'den azdır, böylece modellerin uygunluğu ve güvenilirliği kabul edilebilir aralıkta olduğu söylenebilir. Ayrıca tüm modeller için yeterli kesinlik değeri 4'ten büyüktür. Çizelge 4.8.'de verilen bu değerler sunulan modellerin yeterliliği konusunda destekleyici bilgiler sunmaktadır.

Çizelge 4.8. Tepki modelleri için tanımlayıcı istatistikler

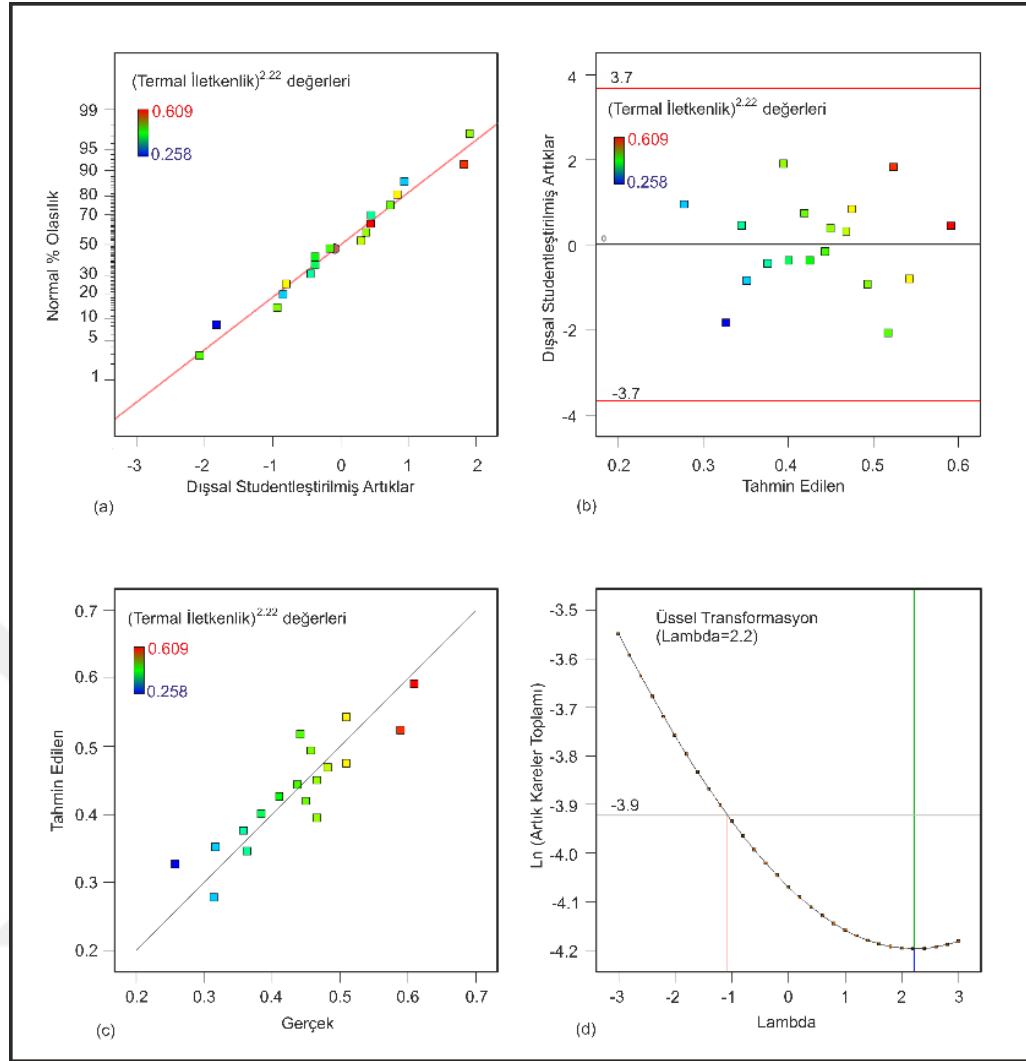
Tepki	R^2	Düzeltilmiş R^2	Tahmin edilen R^2	Yeterli kesinlik
Su emme (%)	0.98	0.97	0.96	41.27
Termal iletkenlik (W/mK)	0.8	0.76	0.67	14.63
Basınç dayanımı (MPa)	0.98	0.96	0.92	27.48
Kuruma rötresi (10^{-6})	0.98	0.97	0.94	32.14

Su emme, termal iletkenlik, basınç dayanımı ve kuruma rötresi tepkilerinin modelleri için artıkların normal grafiği, sırasıyla Şekil 4.43.(a), 4.44.(a), 4.45.(a) ve 4.46.(a)'da verilmiş olup, bu şekillerde artıkların düz bir hat üzerinde olduğu görülmektedir. Bu durum, yeterli sonuçları sağlamak için tepkiler üzerinde gerçekleştirilen transformasyon nedeniyle artıkların normal bir dağılım izlediğini gösterir. Şekil 4.43.(b), 4.44.(b), 4.45.(b) ve 4.46.(b)'de sırasıyla su emme, termal iletkenlik, basınç dayanımı ve kuruma rötresi modelleri için artıklar ve tahmin edilen tepkilerin değerleri arasındaki grafikler verilmiştir. Bu şekillerde tüm modeller için eşik çizgileri içinde kalan noktaların rastgele dağılmış desen oluşturduğu görülmektedir. Gerçek ve tahmin edilen su emme, termal iletkenlik, basınç dayanımı ve kuruma rötresi tepki değerlerinin grafikleri sırasıyla Şekil 4.43.(c), 4.44.(c), 4.45.(c) ve 4.46.(c)'de verilmiştir. Bu şekillerde 45 derecelik eğimli çizginin verileri yaklaşık olarak eşit böldüğü görülmektedir. Su emme, termal iletkenlik, basınç dayanımı ve kuruma rötresi modelleri için Box–Cox transformasyon analizi sırasıyla Şekil 4.43.(d), 4.44.(d), 4.45.(d) ve 4.46.(d)'de görülmektedir. Box-Cox analizi sonucunda, istatistiksel analiz ve tanısal grafiklerde bir gelişme sağlamak için tüm modellerde

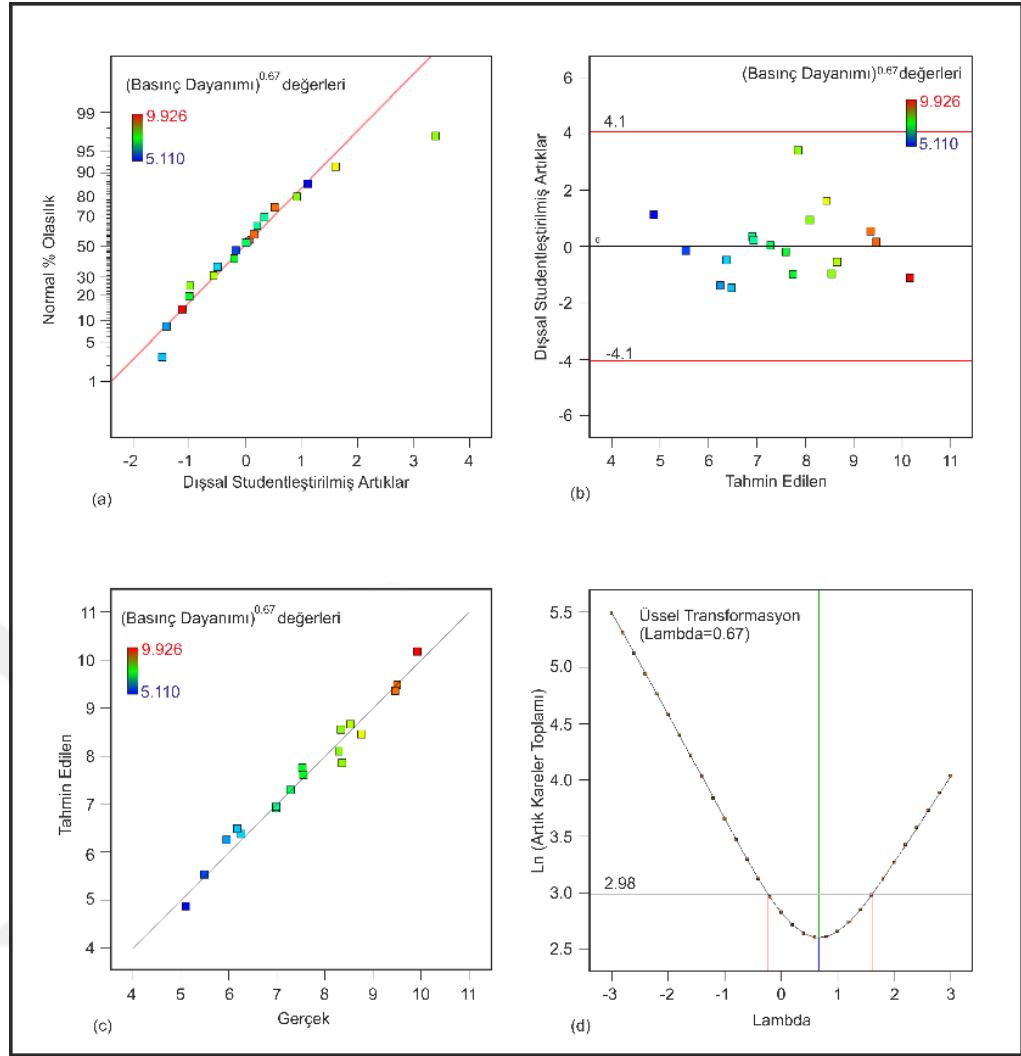
üssel transformasyon uygulanmasına karar verilmiştir. Böylelikle optimizasyon analizinde bu kapsamda iyileştirmeye gidilmiştir.



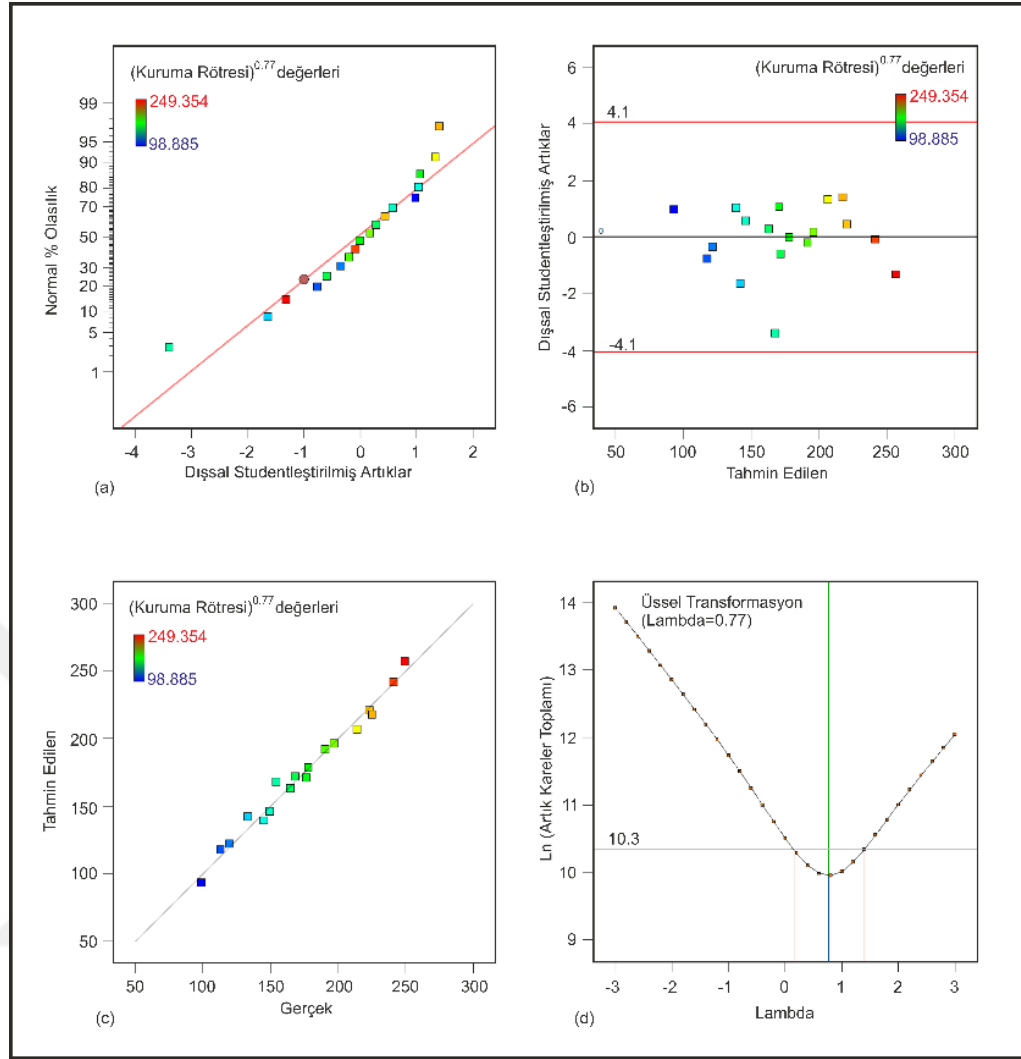
Şekil 4.43. Su emme modelinin regresyon analizi için grafikler (Denklem 1): (a) artıkların normal grafiği; (b) artıklara karşı tahmin edilen tepkinin grafiği; (c) tahmin edilene karşı gerçek tepkinin grafiği; (d) Üssel transformasyon için Box-Cox dönüşüm grafiği



Şekil 4.44. Termal iletkenlik modelinin regresyon analizi için grafikler (Denklem 2): (a) artıkların normal grafiği; (b) artıklara karşı tahmin edilen tepkinin grafiği; (c) tahmin edilene karşı gerçek tepkinin grafiği; (d) Üssel transformasyon için Box-Cox dönüşüm grafiği

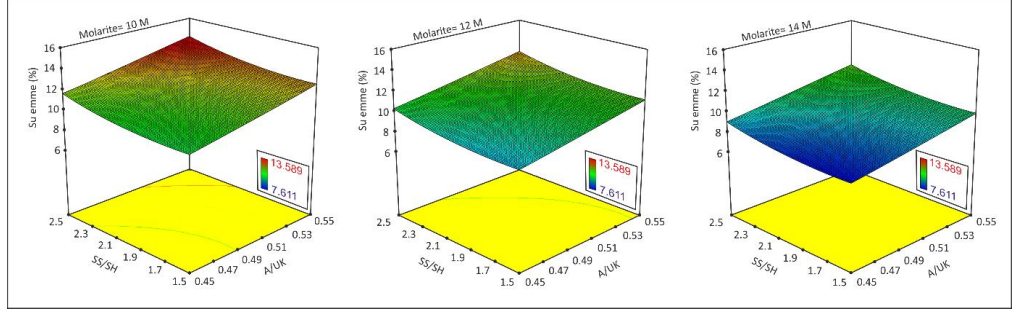


Şekil 4.45. Basınç dayanımı modelinin regresyon analizi için grafikler (Denklem 3): (a) artıkların normal grafiği; (b) artıklara karşı tahmin edilen tepkinin grafiği; (c) tahmin edilene karşı gerçek tepkinin grafiği; (d) Üssel transformasyon için Box-Cox dönüşüm grafiği

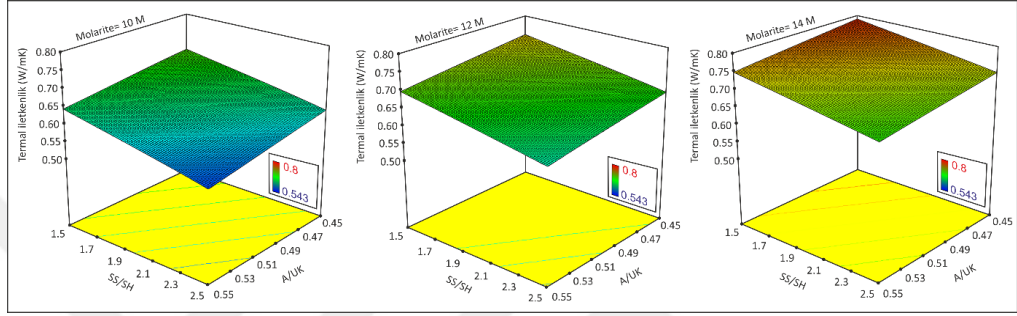


Şekil 4.46. Kuruma rötresi modelinin regresyon analizi için grafikler (Denklem 4): (a) artıkların normal grafiği; (b) artıklara karşı tahmin edilen tepkinin grafiği; (c) tahmin edilene karşı gerçek tepkinin grafiği; (d) Üssel transformasyon için Box-Cox dönüşüm grafiği

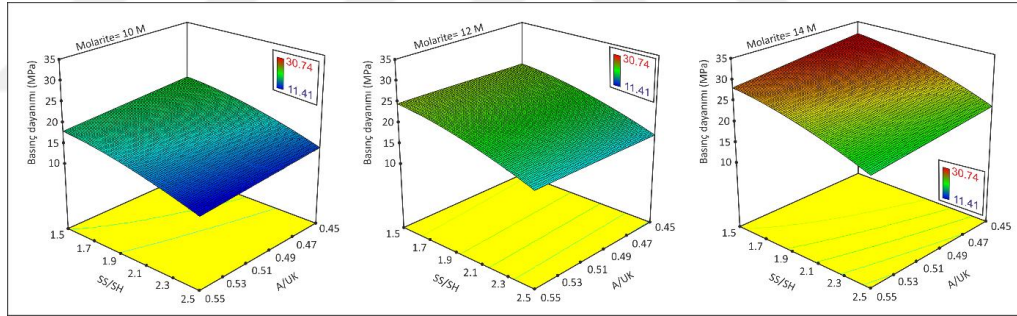
Su emme, termal iletkenlik, basınç dayanımı ve kuruma rötresi modelleri için (Denklem 4.13., 4.14., 4.15. ve 4.16.) üç boyutlu tepki yüzeyi grafikleri Şekil 4.47., 4.48., 4.49. ve 4.50.'de verilmiştir. Şekil 4.47., 4.48., 4.49. ve 4.50.'de molarite, SS/SH ve A/UK oranlarının su emme, termal iletkenlik, basınç dayanımı ve kuruma rötresi tepkileri üzerindeki etkisi görülmektedir.



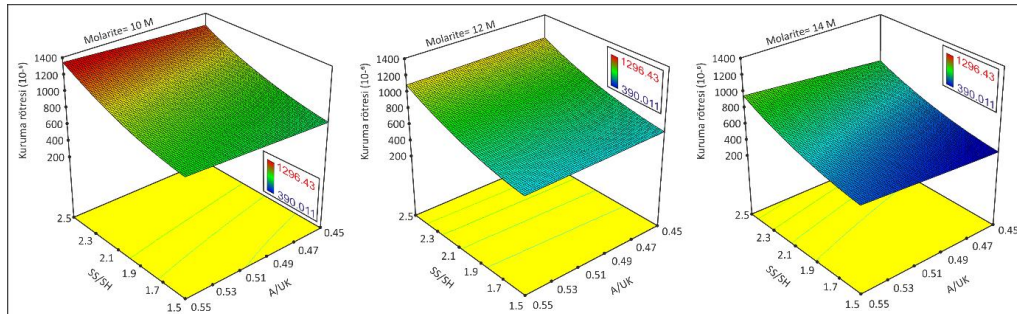
Şekil 4.47. Su emme için tepki yüzey modelinin üç boyutlu gösterimi



Şekil 4.48. Termal iletkenlik için tepki yüzey modelinin üç boyutlu gösterimi



Şekil 4.49. Basıncı dayanımı için tepki yüzey modelinin üç boyutlu gösterimi



Şekil 4.50. Kuruma rötresi için tepki yüzey modelinin üç boyutlu gösterimi

Bu çalışmada, tepki yüzey metodu, molarite, SS/SH ve A/UK oranları gibi faktörler ile tepkiler arasındaki ilişkileri belirlemekle beraber bu faktörlerin uçucu kül esaslı hafif geopolimer harçların özellikleri üzerindeki birleşik etkisini araştırmak ve maksimum basınç dayanımı, minimum su emme ve kuruma rötresi değerlerini sağlayan optimum SS/SH, A/UK ve molarite değerlerini belirlemek için kullanılmıştır. Sunulan optimizasyon çalışmasında dikkate alınan faktörler, tepkiler ve hedefler Çizelge 4.9.'da verilmiştir.

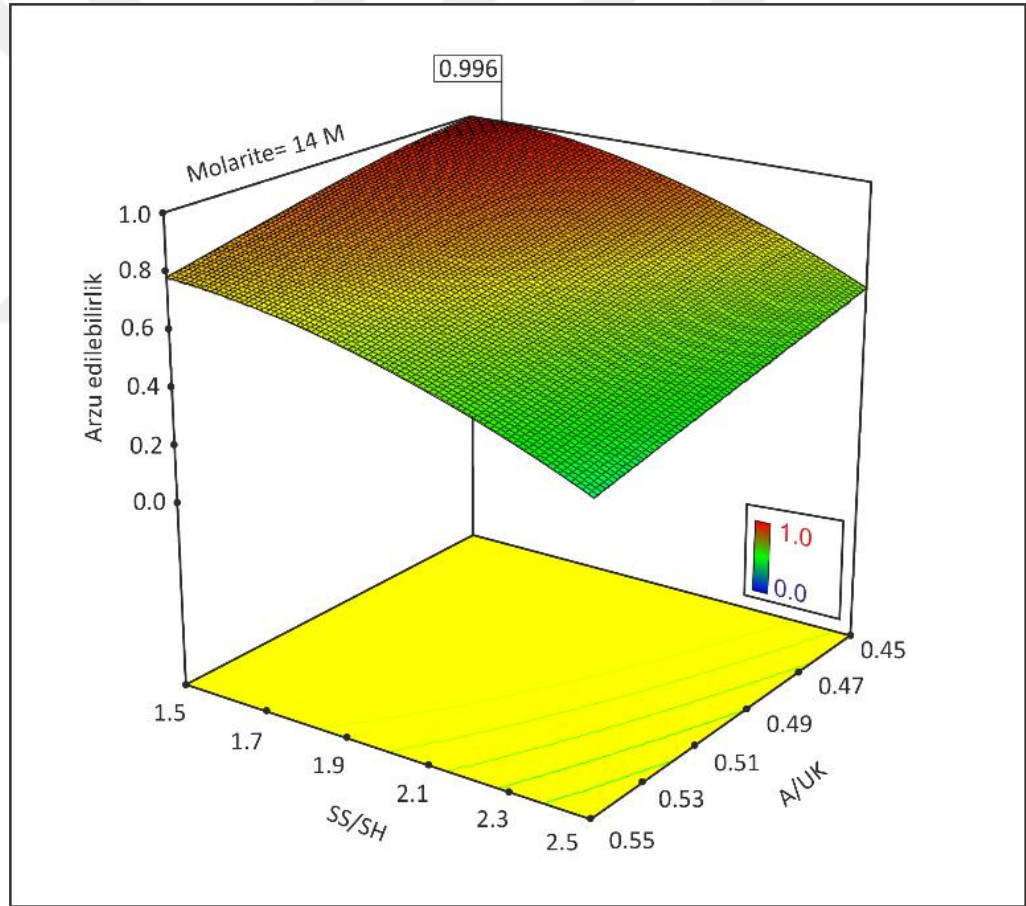
Çizelge 4.9. Optimizasyon analizinde kullanılan değişkenler ve bunlara karşılık gelen hedefler

Faktörler ve Tepkiler	Hedef	Alt limit	Üst limit
A/UK	aralıkta	0.45	0.55
SS/SH	aralıkta	1.5	2.5
Molarite (M)	aralıkta	10	14
Su emme (%)	minimum	7.611	13.589
Termal iletkenlik (W/mK)	aralıkta	0.543	0.8
Basınç dayanımı (MPa)	maksimum	11.41	30.74
Kuruma rötresi (10^{-6})	minimum	390.011	1296.43

Şekil 4.51., su emme, termal iletkenlik, basınç dayanımı ve kuruma rötresi tepkileri üzerinde gerçekleştirilen optimizasyon analizinden elde edilen arzu edilebilirlik fonksiyonunun değişimini göstermektedir. Tepki yüzey metodu kullanılarak optimizasyon analizinden elde edilen çözüm Çizelge 4.10.'da sunulmuştur. Molarite, SS/SH ve A/UK faktörleri için optimum değerler, maksimum basınç dayanımı, minimum su emme ve kuruma rötresi hedeflerine bağlı olarak sırasıyla 14 M, 1.586 ve 0.45 olarak belirlenmiştir. Bu optimizasyon analizinin arzu edilebilirlik değeri 0.996 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.10. Optimizasyon analizinin sonuçları

Faktörler ve Tepkiler	Optimum değerler ve tahmin edilen tepkiler
A/UK	0.45
SS/SH	1.586
Molarite (M)	14
Su emme (%)	7.689
Termal iletkenlik (W/mK)	0.784
Basınç dayanımı (MPa)	31.519
Kuruma rötresi (10^{-6})	379.3
Arzu edilebilirlik	0.996



Şekil 4.51. Optimizasyon analizinden elde edilen arzu edilebilirlik fonksiyonunun üç boyutlu grafiksel gösterimi

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Çeşitli SH molaritelerinin, SS/SH oranlarının, A/UK oranlarının, karşılık gelen oksit oranlarının ve yaşların hafif geopolimer harçların taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca belirlenen parametreler dikkate alınarak su emme, kılcal su emme, rötre (kuruma ve otojen), termal iletkenlik (kuru ve doymuş) değerleri ve mikroyapısal analiz sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veriler değerlendirilerek optimizasyon çalışması ve istatistiksel analiz işlemleri de gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

Hafif geopolimer harçların taze özelliklerinin, karışım oranlarının değişen kombinasyonlarından etkilendiği görülmüştür. Taze karışımların akışkanlık özellikleri, A/UK oranındaki düşüş ile azalma göstermiştir. Artan SH molarite değerleri ve SS/SH oranları, etkilerini akışkanlığı azaltarak göstermiştir.

Hafif geopolimer harçlardaki reolojik davranış, artan kayma hız değerlerine karşı kayma gerilmesi değerlerindeki artış ile Herschel-Bulkley modeline uymaktadır. Artan hız oranlarına bağlı olarak azalan görünür viskozite değerleri ise kayma incilmesi davranışını temsil etmektedir. SH molaritesi ve SS/SH oranlarının artması ile kayma gerilmesi ve görünür viskozite değerlerinde artış meydana gelmiştir. Daha yüksek SH konsantrasyonu, muhtemelen daha fazla oranlarda uçucu kül çözünmesine bağlı olarak oluşan erken reaksiyon ürünleri ile daha yüksek akma gerilmesi değerlerine neden olmuştur.

Hafif geopolimer harç numunelerinin ortalama yoğunluğu 1., 7. ve 28. günlerde sırasıyla 1855-1935 kg/m³, 1853-1932 kg/m³ ve 1846-1904 kg/m³ aralığında değişmiştir. Bu sonuçlar, hafif yapı malzemeleri için belirtilen uygun sınırlar içerisinde olduğundan kabul edilebilir boyuttadır.

28 günlük hafif geopolimer harçların basınç dayanımı sonuçları, 0.45 ve 0.55 A/UK oranları için sırasıyla 12.72-30.74 MPa ve 11.41-28.65 MPa arasında değişmiştir. Daha yüksek SH konsantrasyonunda ve daha düşük SS/SH oranında, geopolimerizasyon reaksiyonunun gelişmesi nedeniyle basınç dayanımı değerleri iyileşmiştir. SH molaritesinin artması sonucunda çözünen uçucu kül partiküllerinde görülen artış ile hafif harçların basınç dayanımı değerlerinde iyileşme görülmüştür. 0.55 A/UK oranı için en yüksek dayanım artışı SH molaritesinin 10 M'den 12 M'ye çıkarılmasıyla elde edilirken 0.45 A/UK oranına sahip karışım dikkate alındığında, en yüksek dayanım artışı, sabit 2 SS/SH oranında SH konsantrasyonunun 12 M'den 14 M'ye artmasıyla elde edilmiştir.

SiO₂/Na₂O oranındaki artış ve %Na₂O içeriğinin azalması, hafif geopolimer harçlarda daha düşük basınç dayanımı değerlerinin elde edilmesine neden olmuştur. Artan H₂O/Na₂O ve H₂O/katı malzeme oranları, esas olarak daha fazla gözenek oluşması ve H₂O miktarının artmasına bağlı olarak geopolimerizasyon reaksiyonunun engellenmesi nedeniyle hafif geopolimer harçların basınç dayanımı değerleri üzerinde olumsuz etki yapmıştır.

Hafif geopolimer harçların eğilme dayanımı sonuçları, basınç dayanımı ile benzer gelişme eğilimini takip etmiştir. En yüksek eğilme dayanımı değerleri 0.45 A/UK oranı, 14 M SH molaritesi ve 1.5 SS/SH oranına sahip karışım ile 1, 7 ve 28 gün için sırasıyla 3.49, 3.94 ve 4.23 MPa olarak elde edilmiştir.

Hafif geopolimer harçların ultrases geçiş hızı test sonuçları, farklı SH konsantrasyonları ve SS/SH oranlarına bağlı olarak sırasıyla 0.45 ve 0.55 A/UK oranları için 1790-3160 m/sn ve 1770-2890 m/sn arasında değişmektedir. Tüm karışım bileşimleri dikkate alındığında, ultrases geçiş hızı test sonuçları ve basınç dayanımı sonuçları arasında güçlü bir ilişki olduğu gözlenmiştir.

Su emme ve basınç dayanımı değerleri arasında iyi bir ilişki bulunmaktadır. 0.45 A/UK oranında su emme değerleri (%)7.61 ile (%)11.96 arasında değişirken, 0.55 A/UK oranı için su emme aralığı (%)9.96-13.59 olarak bulunmuştur.

0.45 ve 0.55 A/UK oranları için sırasıyla 0.0042-0.0175 mm/dk^{0.5} ve 0.0039-0.0257 mm/dk^{0.5} aralıklarında kılcal su emme değerlerine ulaşılmıştır. Kılcal su emme ve basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren korelasyon katsayıları (R^2) sırasıyla 0.84 ve 0.72 olarak elde edilmiştir.

Azalan SS/SH oranı, artan SH molaritesi ve A/UK oranı daha yüksek kuruma büzülmesi değerleri ile sonuçlanmıştır. A/UK oranındaki artış göz önüne alındığında en yüksek kuruma büzülme artışı %33.4 olarak 2 SS/SH oranı ve 14 M SH molaritesi içeren karışım ile elde edilmiştir. A/UK oranının 0.45'ten 0.55'e artmasıyla en yüksek otojen büzülme artışı, 10 M SH molaritesi ve 2 SS/SH oranı ile %11.15 olarak belirlenmiştir. Tüm sonuçlar dikkate alınarak minimum ve maksimum otojen büzülme değerleri 219 ve 355 mikrometreye olarak elde edilmiştir.

Çeşitli SS/SH oranları, SH molariteleri ve A/UK oranları dikkate alındığında elde edilen ısı iletkenlik değerleri aralığı, kuru ve doymuş durumdaki numuneler için sırasıyla 0.54-0.79 W/mK ve 0.81-1.33 W/mK olarak ölçülmüştür.

Hafif geopolimer harçların mikroyapısal analizi çeşitli karışım oranlarında gerçekleştirilmiş ve bu çalışmada oluşan reaksiyon ürünleri ve matris fazının özellikleri ortaya çıkarılmıştır. TGA analizi ile daha düşük dayanım gelişiminin daha az kütle kaybıyla sonuçlandığı, FTIR sonuçları incelendiğinde A/UK oranının 0.55'ten 0.45'e düşmesi sonucunda 3400 cm⁻¹ civarında daha yüksek absorban spektrumları ile geopolimerizasyon aşamasında daha fazla suyun bağlandığı, SEM görüntüleri incelendiğinde, daha yüksek SH konsantrasyonunda ortaya çıkan reaksiyon ürünlerinin artması ile birlikte agrega/matris arayüzünü daha yoğun ve kusursuz hale geldiği bilgilerine ulaşılmıştır.

Yapılan analitik modellemelerde GEP modeli kullanılarak oluşturulan tüm veri tahminlerinin ÇDR modeli ile oluşturulan veri tahminlerine göre hedeflenen değerlere daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Gerçekleştirilen optimizasyon çalışması sonucunda optimum A/UK oranı, SS/SH oranı ve SH molarite değerleri sırasıyla 0.45, 1.586 ve 14 M olarak belirlenmiştir.

5.2. Öneriler

Gelecekteki çalışma için, farklı pomza agregası miktarlarının taze ve sertleşmiş özellikler üzerindeki etkisi, matris fazının farklı parametreler ve ITZ zon özellikleri ile değişimi dikkate alınarak incelenebilir.

Hafif pomza agregası kullanılarak üretilen harç numuneleri için kullanılan optimum parametre oranları dikkate alınarak hafif geopolimer beton numuneler üretilir.

Farklı doğal ve/veya yapay hafif agregası çeşitlerinin kombinasyonları dikkate alınarak hafif geopolimer yapı malzemeleri üretilir. Bu sayede daha düşük birim ağırlık değerlerine sahip hafif malzeme üretiminin gerçekleştirilmesi sağlanabilir.

Atık malzeme olarak kullanılan uçucu külün yanı sıra diğer yan ürünler de numune üretimlerinde kullanılarak birbirleriyle olan etkileşimleri ve elde edilen test sonuçlarına etkileri incelenebilir.

Yürütülen mekanik, durabilite deneysel çalışmaları çeşitlendirilerek hafif geopolimer yapı malzemelerinin donma-çözünme, aşınma gibi farklı dış etkiler altındaki durumları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- ABDALQADER, A. F., JİN, F. and AL-TABBAA, A., 2016. Development of greener alkali-activated cement: utilisation of sodium carbonate for activating slag and fly ash mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 113: 66–75.
- ABDOLLAHNEJAD Z., MASTALI M. and DALVAND A. 2017. Comparative study on the effects of recycled glass–fiber on drying shrinkage rate and mechanical properties of the self-compacting mortar and fly ash–slag geopolymer mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8): 1-10.
- ABDULKAREEM, O. A., AL BAKRİ, A. M., KAMARUDİN, H., NİZAR, I. K., and ALA’EDDİN, A. S., 2014. Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 50: 377-387.
- ABDULKAREEM, O. A., and RAMLİ, M., 2015. Optimization of alkaline activator mixing and curing conditions for A fly ash-based geopolymer paste system. *Modern Applied Science*, 9(12): 61.
- ACI COMMITTEE, and INTERNATIONAL ORGANIZATION for STANDARDIZATION, 2008. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. American Concrete Institute.
- ALBİTAR, M., ALİ, M. M., VİSİNTİN, P., and DRECHSLER, M., 2017. Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. *Construction and Building Materials*, 136: 374-385.
- ALİABDO, A. A., ABD ELMOATY, M., and SALEM, H. A., 2016. Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopolymer concrete performance. *Construction and Building Materials*, 121: 694-703.
- AMEL, C. L., KADRI, E. H., SEBAIBI, Y., and SOUALHI, H., 2017. Dune sand and pumice impact on mechanical and thermal lightweight concrete properties. *Construction and Building Materials*, 133:209-218.
- AMERİ, F., SHOAİ, P., ZAREİ, S. A., and BEHFOROUZ, B., 2019. Geopolymers vs. alkali-activated materials (aams): a comparative study on durability, microstructure, and resistance to elevated temperatures of lightweight mortars. *Construction and Building Materials*, 222: 49-63.
- ARİFFİN, M. A. M., BHUTTA, M. A. R., HUSSİN, M. W., TAHİR, M. M., and AZİAH, N., 2013. Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 43: 80-86.
- ASSI, L., CARTER, K., DEEVER, E. E., ANAY, R., and ZIEHL, P., 2018. Sustainable concrete. building a greener future. *Journal of Cleaner Production*, 198:1641-1651.
- ASTM C 618, 2001. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, Pa., 4.
- ASTM, C., 2009. 597, Standard test method for pulse velocity through concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM., 2009b. Standard test method for drying shrinkage of mortar containing hydraulic cement. C596-09, Philadelphia.

- ASTM, C., 2010. Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). In American Society for Testing and Materials, 100: 19428-2959.
- ASTM, C., 2013. 1585. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-, ASTM Int, 4-9.
- ASTM, C., 2016. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). Annual Book of ASTM Standards, 4.
- ASTM C33/C33M, 2018. Standard Specification for Concrete Aggregates.
- ATİŞ, C. D., BİLİM, C., ÇELİK, Ö., and KARAHAN, O., 2009. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construction and Building Materials*, 23(1): 548-555.
- AYDIN, S. and BARADAN, B., 2012. Mechanical and microstructural properties of heat cured alkali-activated slag mortars. *Materials & Design*, 35:374-383.
- AYDIN, S., and BARADAN, B., 2007. Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement-based mortars. *Cement and Concrete Research*, 37(6):988-995.
- AYDIN, S., and BARADAN, B., 2014. Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars. *Composites Part B: Engineering*, 57: 166-172.
- BAKHAREV, T., 2005. Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 35(6): 1224-1232.
- BERNAL, S. A., DE GUTIERREZ, R. M., PROVÍS, J. L., and ROSE, V., 2010. Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags. *Cement and Concrete Research*, 40(6): 898-907.
- BERNTSSON, L., 2008. Lightweight aggregate concrete. William Andrew.
- BİDECİ, A., GÜLTEKİN, A. H., YILDIRIM, H., OYMAEL, S., and BİDECİ, Ö. S., 2013. Internal structure examination of lightweight concrete produced with polymer-coated pumice aggregate. *Composites Part B: Engineering*, 54:439-447.
- BİDECİ, Ö. S., 2016. The effect of high temperature on lightweight concretes produced with colemanite coated pumice aggregates. *Construction and Building Materials*, 113:631-640.
- BOWLES, J. F. W., 1997. RM Cornell and U. Schwertmann The Iron Oxides: Structure, Properties Reactions Occurrence and Uses. *Mineralogical Magazine*, 61(408): 740-741.
- BURDUHOS NERGİS, D. D., ABDULLAH, M. M. A. B., SANDU, A. V., and VIZUREANU, P., 2020. XRD and TG-DTA study of new alkali activated materials based on fly ash with sand and glass powder. *Materials*, 13(2): 343.
- BURUBERRİ, L. H., TOBALDİ, D. M., CAETANO, A., SEABRA, M. P., and LABRİNCHA, J. A., 2019. Evaluation of reactive si and al amounts in various geopolymer precursors by a simple method. *Journal of Building Engineering*, 22:48-55.
- CHI, M. and HUANG, R., 2013. Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars. *Construct. Build Mater.*, 40:91–298.
- CHI, M.-C., CHANG, J.-J. and HUANG, R., 2012. Strength and drying shrinkage of alkali-activated slag paste and mortar. *Advances in Civil Engineering*.

- CHINDAPRASIRT, P., and RATTANASAK, U., 2010. Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer. *Waste Management*, 30(4): 667-672.
- CHINDAPRASIRT, P., CHAREERAT, T., and SIRIVIVATNANON, V., 2007. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 29(3): 224-229.
- CHINDAPRASIRT, P., JATURAPITAKKUL, C., CHALEE, W., and RATTANASAK, U., 2009. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Management*, 29(2): 539-543.
- CHITHAMBARAM, S. J., KUMAR, S., and PRASAD, M. M., 2019. Thermo-mechanical characteristics of geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 213: 100-108.
- CINCOTTO, M. A., MELO, A. A., and REPETTE, W. L., 2003. Effect of different activators type and dosages and relation to autogenous shrinkage of activated blast furnace slag cement. In *Proceedings of the 11th International Congress on The Chemistry of Cement*, Durban, South Africa, Vol:18781888.
- COLANGELO, F., ROVIELLO, G., RICCIOTTI, L., FERRANDIZ-MAS, V., MESSINA, F., FERONE, C., ... and CHEESEMAM, C. R. 2018. Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites*, 86:266-272.
- CONTRAFATTO, L., DANZUSO, C. L., GAZZO, S., and GRECO, L. 2020. Physical, mechanical and thermal properties of lightweight insulating mortar with recycled Etna volcanic aggregates. *Construction and Building Materials*, 240:117917.
- CRIADO, M., PALOMO, A., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., and BANFILL, P. F. G. 2009. Alkali activated fly ash: effect of admixtures on paste rheology. *Rheologica Acta*, 48(4):447-455.
- CRIADO, M., PALOMO, A., and FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., 2005. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. *Fuel*, 84(16): 2048-2054.
- CUÍ, Y., WANG, D., WANG, Y., SUN, R., and RUI, Y., 2019. Effects of the n (H₂O: Na₂O_{eq}) ratio on the geopolymerization process and microstructures of fly ash-based geopolymers. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 511: 19-28.
- DA SILVA ALVES, L. C., DOS REIS FERREIRA, R. A., MACHADO, L. B., and DE CASTRO MOTTA, L. A., 2019. Optimization of metakaolin-based geopolymer reinforced with sisal fibers using response surface methodology. *Industrial Crops and Products*, 139: 111551.
- DAO, D. V., TRINH, S. H., LY, H. B., and PHAM, B. T., 2019. Prediction of compressive strength of geopolymer concrete using entirely steel slag aggregates: Novel hybrid artificial intelligence approaches. *Applied Sciences*, 9(6): 1113.
- DAVIDOVITS, J., 1991. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8):1633-1656.
- DESIGN EXPERT, 2010. Design Expert, Stat-Ease, Minneapolis, USA.
- DE VARGAS, A. S., DAL MOLIN, D. C., VILELA, A. C., DA SILVA, F. J., PAVAO, B., and VEIT, H., 2011. The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure

- of alkali-activated fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Composites*, 33(6): 653-660.
- DEB, P. S., NATH, P., and SARKER, P. K., 2015. Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Procedia Engineering*, 125: 594-600.
- ELYAMANY, H. E., ABD ELMOATY, M., and ELSHABOURY, A. M., 2018. Magnesium sulfate resistance of geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 184: 111-127.
- FAKHRIAN, S., BEHBAHANI, H., and MASHHADİ, S., 2020. Predicting post-fire behavior of green geopolymer mortar containing recycled concrete aggregate via GEP approach. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 4(2): 22-45.
- FARMER, V. C., 1974. *Infrared spectra of minerals*. Mineralogical society.
- FAVIER, A., HOT, J., HABERT, G., ROUSSEL, N., and DE LACAILLERIE, J. B. D. E. 2014. Flow properties of MK-based geopolymer pastes. A comparative study with standard Portland cement pastes. *Soft Matter*, 10(8):1134-1141.
- FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. M., PALOMO, A. and LOPEZ-HOMBRADOS, C., 2006. Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. *ACI Mater. J.*, 103 (2):106–112.
- FLATT, R. J., and BOWEN, P., 2006. Yodel: a yield stress model for suspensions. *Journal of the American Ceramic Society*, 89(4): 1244-1256.
- GEBREGZIABIHER, B. S., THOMAS, R., and PEETHAMPARAN, S., 2015. Very early-age reaction kinetics and microstructural development in alkali-activated slag. *Cement and Concrete Composites*, 55: 91-102.
- GHANBARI, M., HADIAN, A. M., NOURBAKHSH, A. A., and MACKENZIE, K. J. D., 2017. Modeling and optimization of compressive strength and bulk density of metakaolin-based geopolymer using central composite design: a numerical and experimental study. *Ceramics International*. 43(1): 324-335.
- GHOSH, R., SAGAR, S. P., KUMAR, A., GUPTA, S. K., and KUMAR, S., 2018. Estimation of geopolymer concrete strength from ultrasonic pulse velocity (UPV) using high power pulser. *Journal of Building Engineering*, 16: 39-44.
- GIANNOPOULOU, I., and PANIAS, D., 2010. Hydrolytic stability of sodium silicate gels in the presence of aluminum. *J. Mater. Sci*, 45 (19): 370–5377.
- GIOSUÈ, C., MOBILÌ, A., DI PERNA, C., and TITTARELLI, F., 2019. Performance of lightweight cement-based and alkali-activated mortars exposed to high-temperature. *Construction and Building Materials*, 220: 565-576.
- GLUKHOVSKY, V. D., 1959. *Soil silicates*. Gosstroyizdat USSR, Kiev.
- GOMAA, E., SARGON, S., KASHOSI, C., and ELGAWADY, M., 2017. Fresh properties and compressive strength of high calcium alkali activated fly ash mortar. *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.* 29: 356–364.
- GÖRHAN, G., and KÜRKLÜ, G., 2014. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites Part B: Engineering*, 58: 371-377.
- GÜLLÜ, H., CEVIK, A., AL-EZZI, K. M., and GÜLSAN, M. E., 2019. On the rheology of using geopolymer for grouting: A comparative study with cement-based grout included fly ash and cold bonded fly ash. *Construction and Building Materials*, 196:594-610.

- HADI, M. N., FARHAN, N. A., and SHEIKH, M. N., 2017. Design of geopolymer concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 140: 424-431.
- HADI, M. N., ZHANG, H., and PARKINSON, S. 2019. Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive strength, setting time and workability. *Journal of Building Engineering*, 23: 301-313.
- HANJITSUWAN, S., HUNPRATUB, S., THONGBAI, P., MAENSIRI, S., SATA, V., and CHINDAPRASIRT, P., 2014. Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cement and Concrete Composites*, 45: 9-14.
- HARDJITO, D., WALLAH, S. E., SUMAJOUW, D. M., and RANGAN, B. V., 2004. On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *Materials Journal*, 101(6):467-472.
- HARDJITO, D., WALLAH, S. E., SUMAJOUW, D. M., and RANGAN, B. V., 2004. On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *Materials Journal*, 101(6): 467-472.
- HE, P., JIA, D., WANG, M., and ZHOU, Y., 2011. Thermal evolution and crystallization kinetics of potassium-based geopolymer. *Ceramics International*, 37(1): 59-63.
- HERSCHEL, W. H., and BULKLEY, R., 1926. Model for time dependent behavior of fluids. In *Proc. American Society of Testing Materials*, 26: 621-629.
- HUSEİN, G. F., MİRZA, J., ISMAİL, M., GHOSHAL, S. K., and HUSSEİN, A. A., 2017. Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80: 54-74.
- ISMAİL, N., and EL-HASSAN, H. 2018. Development and characterization of fly ash-Slag blended geopolymer mortar and lightweight concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4):04018029.
- IWAMOTO, T., ONOUE, K., SAGAWA, Y., and TSUTSUMI, R., 2018. Optimization of Fly Ash-Based Geopolymer Using a Dynamic Approach of the Taguchi Method. In *International Congress on Polymers in Concrete*. 517-524.
- JIAO, Z., WANG, Y., ZHENG, W., and HUANG, W., 2018. Effect of dosage of sodium carbonate on the strength and drying shrinkage of sodium hydroxide based alkali-activated slag paste. *Construction and Building Materials*, 179: 11-24.
- JUMRAT, S., CHATVEERA, B., and RATTANADECHO, P., 2011. Dielectric properties and temperature profile of fly ash-based geopolymer mortar. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(2): 242-248.
- KAUR, K., SINGH, J., and KAUR, M., 2018. Compressive strength of rice husk ash based geopolymer: The effect of alkaline activator. *Construction and Building Materials*, 169: 188-192.
- KAUR, M., SINGH, J., and KAUR, M., 2018. Synthesis of fly ash based geopolymer mortar considering different concentrations and combinations of alkaline activator solution. *Ceramics International*, 44(2): 1534-1537.
- KAYALI, O., 2008. Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 22(12):2393-2399.
- KE, Y., ORTOLA, S., BEAUCOUR, A. L., and DUMONTET, H., 2010. Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregate

- concretes by micromechanical modelling including the interfacial transition zone (ITZ). *Cement and Concrete Research*, 40(11): 1590-1600.
- KHALE, D., and CHAUDHARY, R., 2007. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of Materials Science*, 42(3):729-746.
- KOVTUN, M., KEARSLEY, E. P., and SHEKHOVTSOVA, J., 2015. Chemical acceleration of a neutral granulated blast-furnace slag activated by sodium carbonate. *Cement and Concrete Research*, 72: 1-9.
- KRIZAN, D. and ZIVANOVIC, B., 2002. Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements. *Cement and Concrete Research*, 32(8):1181-1188.
- KUMAR PATEL, J., PATIL, H., PATIL, Y., and VESMAWALA, G. 2018. Production and performance of alkali-activated cold-bonded lightweight aggregate in concrete. *Journal of Building Engineering*, 20:616-623.
- KUPAEI, R. H., ALENGARAM, U. J., JUMAAT, M. Z. B., and NIKRAZ, H. 2013. Mix design for fly ash based oil palm shell geopolymer lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 43:490-496.
- LEE, N. K., and LEE, H. K., 2013. Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature. *Construction and Building Materials*, 47: 1201-1209.
- LEE, W. K. W., and VAN DEVENTER, J. S. J., 2002. The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 211(2-3): 115-126.
- LOWKE, D., 2009. Interparticle forces and rheology of cement based suspensions. In *Nanotechnology in Construction*, 3: 295-301.
- LUUKKONEN, T., ABDOLLAHNEJAD, Z., YLÄNIEMI, J., KINNUNEN, P., and ILLIKAINEN, M., 2018. One-part alkali-activated materials: A review. *Cement and Concrete Research*, 103: 21-34.
- MA, Y., and YE, G., 2015. The shrinkage of alkali activated fly ash. *Cement and Concrete Research*, 68: 75-82.
- MALHOTRA, V.M., 2001. Introduction Sustainable Development and Concrete Technology. *Concr Int*, 24:7-22.
- MALKAWI, A. B., NURUDDIN, M. F., FAUZI, A., ALMATTARNEH, H., and MOHAMMED, B. S., 2016. Effects of alkaline solution on properties of the HCFA geopolymer mortars. *Procedia Engineering*, 148: 710-717.
- MARTIN, A., PASTOR, J. Y., PALOMO, A., and JIMÉNEZ, A. F., 2015. Mechanical behaviour at high temperature of alkali-activated aluminosilicates (geopolymers). *Construction and Building Materials*, 93: 1188-1196.
- MERMERDAŞ, K., MANGURI, S., NASSANI, D. E., and OLEİWİ, S. M., 2017. Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption characteristics of geopolymer mortar. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(6): 1642-1652.
- METWALLY, A.A., ELATY, GHAZY, M. F., and HAMEED, M. F., 2017. Optimization of Geopolymer Concrete by Principal Component Analysis. *Materials Journal*. 14(2).
- MOHSENI, E., 2018. Assessment of Na₂SiO₃ to NaOH ratio impact on the performance of polypropylene fiber-reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 186: 904-911.

- MOULI, M., and KHELAFI, H., 2008. Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan. *Building and Environment*, 43(1):31-36.
- NAGHIZADEH, A., and EKOLU, S. O. 2019. Method for comprehensive mix design of fly ash geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 202: 704-717.
- NAJIMI, M., GHAFORI, N., and SHARBAF, M., 2018. Alkali-activated natural pozzolan/slag mortars: A parametric study. *Construction and Building Materials*, 164: 625-643.
- NATH, P., and SARKER, P. K., 2017. Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 130: 22-31.
- NATH, S. K., and KUMAR, S., 2020. Role of particle fineness on engineering properties and microstructure of fly ash derived geopolymer. *Construction and Building Materials*, 233: 117294.
- NATH, S. K., MAITRA, S., MUKHERJEE, S., and KUMAR, S., 2016. Microstructural and morphological evolution of fly ash based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 111: 758-765.
- NAZARI, A., and SANJAYAN, J. G., 2015. Synthesis of geopolymer from industrial wastes. *Journal of Cleaner Production*, 99: 297-304.
- NEHDI, M., and RAHMAN, M. A., 2004. Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction. *Cement and Concrete Research*, 34(11).
- NEMATOLLAHI, B., SANJAYAN, J., and AHMED SHAIKH, F. U 2015. Tensile Strain Hardening Behavior of PVA Fiber-Reinforced Engineered Geopolymer Composite. *J. Mater. Civ. Eng.*, 27: 1–12.
- NETO, A.A.M., CINCOTTO, M.A. and REPETTE, W., 2008. Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement. *Cement and Concrete Research*, 38(4):565-574.
- NEUPANE, K., KIDD, P., CHALMERS, D., BAWEJA, D. and SHRESTHA, R. 2016. Investigation on compressive strength development and drying shrinkage of ambient cured powder-activated geopolymer concretes. *Austr. J. Civ. Eng.*, 14(1):1-12.
- NEVILLE, A. M., 1995. *Properties of concrete*. Vol. 4. London: Longman.
- NG, C., ALENGARAM, U. J., WONG, L. S., MO, K. H., JUMAAT, M. Z., and RAMESH, S., 2018. A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete. *Construction and Building Materials*, 186: 550-576.
- NUAKLONG, P., SATA, V., and CHINDAPRASIRT, P., 2016. Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, 112: 2300-2307.
- OLIVIER, J. G., PETERS, J. A., and JANSSENS-MAENHOUT, G., 2012. Trends in Global CO₂ Emissions 2012 Report.
- PALACIOS, M., BANFILL, P. F., and PUERTAS, F., 2008. Rheology and setting of alkali-activated slag pastes and mortars: effect of organic admixture. *ACI Materials Journal*, 105(2): 140.

- PANAGIOTOPOULOU, C., TSIVILIS, S., and KAKALI, G., 2015. Application of the Taguchi approach for the composition optimization of alkali activated fly ash binders. *Construction and Building Materials*, 91: 17-22.
- PEREIRA, A., AKASAKI, J. L., MELGES, J. L., TASHIMA, M. M., SORIANO, L., BORRACHERO, M. V., and PAYÁ, J., 2015. Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag. *Ceramics International*, 41(10): 13012-13024.
- PHOO-NGERNKHAM, T., SATA, V., HANJITSUWAN, S., RIDTIRUD, C., HATANAKA, S., and CHINDAPRASIRT, P., 2015. High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material. *Construction and Building Materials*, 98: 482-488.
- POSI, P., TEERACHANWIT, C., TANUTONG, C., LIMKAMOLTIP, S., LERTNIMOOLCHAI, S., SATA, V., and CHINDAPRASIRT, P., 2013. Lightweight geopolymer concrete containing aggregate from recycle lightweight block. *Materials and Design*, 52:580-586.
- PUERTAS, F., VARGA, C., and ALONSO, M. M., 2014. Rheology of alkali-activated slag pastes. Effect of the nature and concentration of the activating solution. *Cement and Concrete Composites*, 53: 279-288.
- RAHIER, H., SIMONS, W., MELE, B.V., and BIESEMAN, M., 1997. Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses: Part III Influence of the composition of the silicate solution on production, structure and properties, *J. Mater. Sci.* 32(9): 2237–2247.
- RANGAN, B. V., 2008. Fly ash-based geopolymer concrete.
- RANJBAR, N., MEHRALI, M., BEHNIA, A., ALENGARAM, U. J., and JUMAAT, M. Z., 2014. Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar. *Materials and Design*, 59: 532-539.
- RATTANASAK, U., and CHINDAPRASIRT, P., 2009. Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Miner. Eng.* 22: 1073–1078.
- REHMAN, M. U., RASHID, K., ZAFAR, I., ALQAHTANI, F. K., and KHAN, M. I. 2020. Formulation and characterization of geopolymer and conventional lightweight green concrete by incorporating synthetic lightweight aggregate. *Journal of Building Engineering*, 101363.
- REVATHI, T., JEYALAKSHMI, R., and RAJAMANE, N. P., 2018. Geopolymeric binder: the effect of silica fume addition on Fly activation by using response surface methodology. *Materials Today: Proceedings*, 5(2): 8727-8734.
- REX, J., and KAMESHWARI, B., 2016. Studies on pumice lightweight aggregate concrete with quarry dust using mathematical modeling aid of ACO techniques. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- RIDTIRUD, C., CHINDAPRASIRT, P. and PIMRAKSA, K. 2011. ‘‘Factors affecting the shrinkage of fly ash geopolymers’’. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 18(1):100-104.
- RIFAAL, Y., YAHIA, A., MOSTAFA, A., AGGOUN, S., and KADRI, E. H., 2019. Rheology of fly ash-based geopolymer: Effect of NaOH concentration. *Construction and Building Materials*, 223: 583-594.
- RICKARD, W. D., RIESSEN, A. V., and WALLS, P., 2010. Thermal character of geopolymers synthesized from class F fly ash containing high concentrations of iron and α -quartz. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 7(1): 81-88.

- ROMAGNOLI, M., LEONELLI, C., KAMSE, E., and GUALTIERI, M. L. 2012. Rheology of geopolymer by DOE approach. *Construction and Building Materials*, 36:251-258.
- SAELI, M., NOVAIS, R. M., SEABRA, M. P., and LABRINCHA, J. A., 2017. Mix design and mechanical performance of geopolymer binder for sustainable construction and building material. In *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng*, 264:012002.
- SAELI, M., SENFF, L., TOBALDI, D. M., SEABRA, M. P., and LABRINCHA, J. A., 2019a. Novel biomass fly ash-based geopolymeric mortars using lime slaker grits as aggregate for applications in construction: Influence of granulometry and binder/aggregate ratio. *Construction and Building Materials*, 227: 116643.
- SAELI, M., SENFF, L., TOBALDI, D. M., SEABRA, M. P., and LABRINCHA, J. A., 2019b. Novel biomass fly ash-based geopolymeric mortars using lime slaker grits as aggregate for applications in construction: influence of granulometry and binder/aggregate ratio. *Construction and Building Materials*, 227:116643.
- SAELI, M., TOBALDI, D. M., SEABRA, M. P., & LABRINCHA, J. A., 2019. Mix design and mechanical performance of geopolymeric binders and mortars using biomass fly ash and alkaline effluent from paper-pulp industry. *Journal of Cleaner Production*, 208:1188-1197.
- SAFARI, Z., KURDA, R., AL-HADAD, B., MAHMOOD, F., and TAPAN, M., 2020. Mechanical characteristics of pumice-based geopolymer paste. *Resources, Conservation and Recycling*, 162:105055.
- SALIH, M. A., ALI, A. A. A., and FARZADNIA, N., 2014. Characterization of mechanical and microstructural properties of palm oil fuel ash geopolymer cement paste. *Construction and Building Materials*, 65: 592-603.
- SALOMA, SAGGAFF, A., HANAFIAH, and MAWARNI, A., 2016. Geopolymer mortar with fly ash. In *MATEC Web of Conferences*, 78: 01026.
- SATHONSAOWAPHAK, A., CHINDAPRASIRT, P., and PIMRAKSA, K., 2009. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. *Journal of Hazardous Materials*, 168(1): 44-50.
- SHAHMANSOURI, A. A., AKBARZADEH BENGAR, H., and GHANBARI, S., 2020. Experimental investigation and predictive modeling of compressive strength of pozzolanic geopolymer concrete using gene expression programming. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 5(1): 92-117.
- SHAHMANSOURI, A. A., NEMATZADEH, M., and BEHNOOD, A., 2021. Mechanical properties of GGBFS-based geopolymer concrete incorporating natural zeolite and silica fume with an optimum design using response surface method. *Journal of Building Engineering*, 36: 102138.
- SHAIKH, F. U., 2014. Effects of alkali solutions on corrosion durability of geopolymer concrete. *Advances in Concrete Construction*, 2(2): 109.
- SINGH, B., RAHMAN, M. R., PASWAN, R., and BHATTACHARYYA, S. K., 2016. Effect of activator concentration on the strength, ITZ and drying shrinkage of fly ash/slag geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 118:171-179.

- SÍTARZ, M., HAGER, I., and CHOÍŃSKA, M., 2020. Evolution of Mechanical Properties with Time of Fly-Ash-Based Geopolymer Mortars under the Effect of Granulated Ground Blast Furnace Slag Addition. *Energies*, 13(5): 1135.
- SOMNA, K., JATURAPITAKKUL, C., KAJITVICHYANUKUL, P., and CHINDAPRASIRT, P., 2011. NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, 90(6): 2118-2124.
- STANDARD, A. S. T. M. C642, 2013, "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete." ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, DOI: 10.1520/C0642-13.
- TOPÇU, İ. B., and UYGUNOĞLU, T., 2007. Properties of autoclaved lightweight aggregate concrete. *Building and Environment*, 42(12): 4108-4116.
- TUYAN, M., ÇAKİR, Ö., and RAMYAR, K., 2018. Effect of alkali activator concentration and curing condition on strength and microstructure of waste clay brick powder-based geopolymer. *Composites Part B: Engineering*, 135: 242-252.
- UL HAQ, E., PADMANABHAN, S. K., and LICCIULLI, A., 2014. Synthesis and characteristics of fly ash and bottom ash based geopolymers—A comparative study. *Ceramics International*, 40(2): 2965-2971.
- VANCE, K., DAKHANE, A., SANT, G., and NEITHALATH, N., 2014. Observations on the rheological response of alkali activated fly ash suspensions: the role of activator type and concentration. *Rheologica Acta*, 53(10-11): 843-855.
- VİJAİ, K., KUMUTHA, R., and VİSHNURAM, B. G., 2010. Effect of types of curing on strength of geopolymer concrete. *International Journal of Physical Sciences*, 5(9): 1419-1423.
- VİLLA, C., PECİNA, E. T., TORRES, R., and GÓMEZ, L., 2010. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. *Construction and Building Materials*, 24(11): 2084-2090.
- WONGPA, J., KIATTIKOMOL, K., JATURAPITAKKUL, C., and CHINDAPRASIRT, P., 2010. Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete. *Materials and Design*, 31(10): 4748-4754.
- WONGSA, A., SATA, V., NUAKLONG, P., and CHINDAPRASIRT, P., 2018. Use of crushed clay brick and pumice aggregates in lightweight geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 188:1025-1034.
- XIE, J., LIU, J., LIU, F., WANG, J., and HUANG, P. 2019. Investigation of a new lightweight green concrete containing sludge ceramsite and recycled fine aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 235:1240-1254.
- YAHIA, A., MANTELLATO, S., and FLATT, R. J., 2016. Concrete rheology: a basis for understanding chemical admixtures. In *Science and Technology of Concrete Admixtures*, 97-127.
- YANG, K. H., MUN, J. H., SIM, J. I., and SONG, J. K. 2011. Effect of water content on the properties of lightweight alkali-activated slag concrete. *Journal of materials in Civil Engineering*, 23(6):886-894.
- YANG, T., ZHU, H., ZHANG, Z., GAO, X., ZHANG, C., and WU, Q. 2018. Effect of fly ash microsphere on the rheology and microstructure of alkali-activated fly ash/slag pastes. *Cement and Concrete Research*, 109:198-207.

- YİP, C. K., PROVİS, J. L., LUKEY, G. C., and VAN DEVENTER, J. S., 2008. Carbonate mineral addition to metakaolin-based geopolymers. *Cement and Concrete Composites*, 30(10): 979-985.
- ZAHİD, M., SHAFİQ, N., ISA, M. H., and GİL, L., 2018. Statistical modeling and mix design optimization of fly ash based engineered geopolymer composite using response surface methodology. *Journal of cleaner production*, 194: 483-498.
- ZAREEI, S. A., AMERI, F., and BAHRAMI, N., 2018. Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 184:258-268.
- ZHENG, K., CHEN, L., and GBOZEE, M. 2016. Thermal stability of geopolymers used as supporting materials for TiO₂ film coating through sol-gel process: Feasibility and improvement. *Construction and Building Materials*, 125: 1114-1126.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Şevin EKMEN

EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe / İl	Bitirme Yılı
Lise	: Adapazarı Atatürk Lisesi	Adapazarı/Sakarya	2008
Üniversite	: Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü	Davutpaşa/İstanbul	2013
Yüksek Lisans	: Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	Haliliye/Şanlıurfa	2017
Doktora	: Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	Haliliye/Şanlıurfa	2021

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2014	Harran Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Yapı Malzemeleri, Özel Betonlar, Geopolimerler

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Uluslararası Hakemli Dergilerdeki Yayınlar (SCI/SCI E.)

Ekmen, Ş., Mermerdaş, K., & Algin, Z. (2021). Effect of Oxide Composition and Ingredient Proportions on the Rheological and Mechanical Properties of Geopolymer Mortar Incorporating Pumice Aggregate. Journal of Building Engineering, 101893. (Doktora tezinden yapılmıştır).

Mermerdaş, K., Algin, Z., **Ekmen, Ş.** (2020). Experimental assessment and optimization of mix parameters of fly ash-based lightweight geopolymer mortar with respect to shrinkage and strength. Journal of Building Engineering, 101351.

Mermerdaş, K., İpek, S., Algin, Z., **Ekmen, Ş.**, Güneş, İ. (2020). Combined effects of microsilica, steel fibre and artificial lightweight aggregate on the shrinkage and mechanical performance of high strength cementitious composite. Construction and Building Materials, 262, 120048.

Ulusal hakemli dergilerdeki yayınlar (TR Dizin)

Mermerdaş, K., İpek, S., Sor, N., Mulapeer, E., **Ekmen, Ş.** (2020). The Impact of Artificial Lightweight Aggregate on the Engineering Features of Geopolymer Mortar. Türk Doğa ve Fen Dergisi, 9 (1) , 79-90. DOI: 10.46810/tdfd.71889.

Hakemli Dergilerdeki Yayınlar (Diğer İndeksler)

Ekmen Şevin, Mermerdaş Kasım (2018). Alkali Aktivatör Parametrelerinin ve Test Kosullarının Geopolimer Betonların Büzülme ve Sünme Davranışı Üzerine Etkisi. Harran Mühendislik Dergisi, 3(3), 93-101. (Yayın No: 4738979)

Mermerdaş Kasım, **Ekmen Şevin** (2017). Correlation Between Tensile and Compressive Strength of Concretes Incorporating Calcined Crude Kaolin and High Purity Metakaolin. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 2, 93-100. (Yayın No: 3595917)

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında (Proceedings) Basılan Bildiriler

Karadağ M., Mermerdaş K., Algin Z., **Ekmen Ş.** (2020). “SBR Lateks Modifiyeli Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” 6th International Conference on Engineering & Natural Sciences, Şanlıurfa, 77-88.

Mulapeer, E.S., Mermerdaş, K., Algin, Z., Sor, N.H., **Ekmen Ş.**, (2019). “Engineering Properties of Steel and Basalt Fiber Reinforced Geo-polymer Mortar”

6th International Scientific Research Congress-Science and Engineering, Şanlıurfa, 77-88.

Ekmen Şevin, Mermerdaş Kasım, (2018). Investigation of Time-Dependent Deformation Behaviour of Building Materials with Geopolymer Binder, 6th International GAP Engineering Conference – GAP2018.

Mermerdaş Kasım, **Ekmen Şevin** (2017). Kalsine ham kaolen ve yüksek saflıktaki metakaolen içeren betonların çekme ve basınç dayanımları arasındaki korelasyon (Correlation between Tensile and Compressive Strength of Concretes Incorporating Calcined Crude Kaolin and High Purity Metakaolin). International Conference on Civil and Environmental Engineering, ICOCEE-Cappadocia-2017 (Özet Bildiri/Sözlü Sunum).

Pekgökgöz Recep Kadir, **Ekmen Şevin**, Gürel Arif (2017). Urfa Ulu Cami minaresinin çevresel titreşim yöntemiyle dinamik özelliklerinin belirlenmesi (Determination of the Dynamic Properties of Historical Urfa Ulu Mosque Minaret by Ambient Vibration Test). International Conference on Civil and Environmental Engineering, ICOCEE-Cappadocia-2017 (Tam Metin Bildiri).

Projeler

Tarihi Urfa Ulu Cami Minaresinin Çevresel Titreşim Testi Yöntemiyle Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi.

Uçucu kül esaslı geopolimer hafif harçların rötre davranışlarının incelenmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi.

Yapay Hafif Agregalı Çelik Lif Takviyeli Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozitlerin Rötre Davranışının İncelenmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi.

Uçucu Kül Esaslı Hafif Geopolimer Harçların Taze ve Sertleşmiş Özelliklerinin İncelenmesi, Modellenmesi ve Optimizasyonu, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi.