

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

**GEOPOLİMER BETONDA CAM TOZU KULLANIMININ  
ARAŞTIRILMASI**

**Majed Ali Ibrahim ANNAKOA**

**Danışman  
Jüri Üyesi  
Jüri Üyesi**

**Dr. Öğr . Üyesi Selçuk MEMİŞ  
Prof. Dr. İlhami DEMİR  
Dr. Öğr . Üyesi Gökhan KAPLAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI  
KASTAMONU – 2019**

## TEZ ONAYI

**Majed Ali Ibrahim ANNAKOA** tarafından hazırlanan "**Geopolimer Betonda Cam Tozu Kullanımının Araştırılması**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde savunulmuş ve **oy birliği** ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ  
Kastamonu Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. İlhami DEMİR  
Kırıkkale Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN  
Kastamonu Üniversitesi



02/12/2019

Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Nur BELKAYALI



## TAAHHÜTNAME

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

Majed Ali Ibrahim ANNAKOA



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### GEOPOLİMER BETONDA CAM TOZU KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Majed Ali Ibrahim ANNAKOA

Kastamonu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ

Geopolimer beton, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül gibi endüstriyel atık ürünlerini betonlar için bağlayıcıya dönüştüren mükemmel bir alternatiftir. Geopolimer bağlayıcıları, geopolimer beton üretmek için agregalarla birlikte kullanılır. İlk dayanımları çok yüksek olduğundan altyapıların ve ön dökme ünitelerinin inşası ve onarımı için idealdir. Atık camın başarılı bir şekilde kullanılması, atık camın ortadan kaldırılması ile ilgili çevresel ve sağlık sorunlarının giderilmesine ve atık bertarafı için gereken arazi alanının azaltılmasına yardımcı olacaktır. Geopolimer betonda cam tozunun kullanılmasını içeren çalışmalara ait test sonuçlarındaki çelişki ve farklılıklar nedeniyle bu çalışmada amaç, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (YFC), atık cam (GP), sodyum hidroksit (SH), sodyum silikat (SS) ile çeşitli oranlarda karıştırılan kaba agrega ve ince agregaların geopolimer betonda etkilerini incelemektir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, basınç dayanımlarının kullanılan GP ile karışımlardaki GP artış oranlarının, kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında su emme oranında azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, GP içeren geopolimer betonda yangın dayanımının sıcaklık arttıkça düştüğü, en yüksek dayanımın %10 GP ve 1,5 SS/SH oranındaki karışım için 300 °C'de 45.23 MPa olarak ölçülmüştür. Ultrasonik ses geçiş hızı sonuçları, tüm atık cam beton karışımlarının ideal betonlardaki iyi ve üzeri değerler olan 3,2 km / s'den daha yüksek değerlerde olduğu elde edilmiştir. Bu davranış, cam parçacıklarının özgül ağırlığının düşüklüğüne bağlanır. YFC ve GP'nun etkisini karşılaştırmak için beton üzerinde çökme akış testleri deneysel olarak incelenmiş, kullanılan GP miktarını artmasıyla Geopolimerbetonun YFC ile karşılaştırıldığında akışkanlığını azaltmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Geopolimer harcı, sodyum silikat, sodyum hidroksit, cüruf, cam tozu, basınç dayanımı

**2019, 71 Sayfa**

**Bilim Kodu: 91**

## ABSTRACT

MSc. Thesis

### INVESTIGATION OF THE USE OF GLASS POWDER IN GEOPOLYMER CONCRETE

Majed Ali Ibrahim ANNAKOA  
Kastamonu University  
Graduate School of Natural And Applied Sciences  
Department of Material Science and Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Selçuk MEMİŞ

**Abstract:** Geopolymer is an excellent alternative which transform industrial waste products like YFC and fly ash into binder for concrete. Geopolymer binders are used together with aggregates to produce Geopolymer concrete. They are ideal for building and repairing infrastructures and for pre-casting units, because they have very high early strength. The successful use of waste glass will aid in reducing the environmental and health problems related to the disposal of waste glass and the scarcity of land area needed for disposal. Due to the contradiction and variations in the available test results corresponding to the utilization of glass powder in geopolymer concrete, the aim of this study is to examine the influence of ground granulated blast-furnace slag (YFC), waste glass (GP), sodium hydroxide (SH), sodium silicate (SS), extra water and coarse aggregate and fine aggregate aggregates which are mixed in various proportions.

The results obtained in this study showed that although the compressive strength decreases depending on the GP ratio used, it is determined that strengths of approximately 50 MPa and above can be obtained in mixtures where the SS / SH ratio is 0.67. In addition, it was determined that GP increase rates in the mixtures caused a decrease in the water absorption rate compared to the control mixture. In the study, the fire resistance in GP containing Geopolimerconcrete decreased with increasing temperature and the highest strength was measured as 45.23 MPa at 300 ° C for the mixture of GP and 1.5 SS / SH. The results of ultrasonic sound velocity were obtained that all waste glass concrete mixtures were higher than 3.2 km / h, which is good and above values in ideal concretes. This behavior is attributed to the low specific gravity of the glass particles. In order to compare the effect of YFC and GP, the sedimentation flow tests on concrete were investigated experimentally, increasing the amount of GP used and reducing the viscosity of Geopolimerconcrete compared to slag.

**Key Words:** Geopolymer mortar, sodium silicate, sodium hydroxide, slag, glass powder, compressive strength.

**2019, 71 Pages**

**Science Code: 91**

## TEŞEKKÜR

Bana bu çalışmanın hazırlanmasında öncelikle çalışmalarım için verdiği desteklerden dolayı Libya Hükümetine, ayrıca bana bu imkanı tanıyan ve eğitimim konusunda sağladıkları destekler nedeniyle Kastamonu Üniversitesi'ne ve onun nezinde Türkiye Cumhuriyetine minnettarlığımı sunarım. Bu tezin tamamlanmasına kadar geçen sürede sağlık, şans, sabır ve anlayış veren Allahıma şükürler olsun ve onun tüm salat ve selamı Muhammed Mustafanın (SAV) üzerine olsun.

Tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ'e bana verdiği ilham, teşvik, dikkat çekici yardım ve sürekli destek için, derin şükran ve takdirle teşekkürlerimi sunuyorum. Bu süreçte onunla çalışmak benim için mükemmel bir öğrenme ve tecrübe kazanma şansı oldu. Aynı zamanda Prof. Dr. Hasbi YAPRAK ve Prof. Dr. İlhami DEMİR, Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN hocalarıma da araştırmalarımda yaptığı rehberlik, verdiği teknik destek ve önerileri için içten teşekkürlerimi iletmek istiyorum. Ayrıca laboratuvar çalışmasından sonraki analiz sürecinde tüm istatistiksel veri analizi, optimizasyon ve istatistiki çalışmada yardımlarını esirgemeyen Karabük Üniversitesi öğretim üyesi Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin ÇETİN'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Lütfü GÖKDERE, Uğur SARIKAYA yanı sıra KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ asistanlarına ve yakın arkadaşlarım Bashar Al-hity, Abdoslam Sarkaz, Haytham Alhanghari, Mohamed Zarrog, Mohamed Masoud, Abdulhadi Alammar ve deneysel çalışmamda bana yardım eden ve destek veren yapısal mekanik laboratuvarı kadromuza da özel teşekkürlerimi iletmek istiyorum.

Kariyerim boyunca sürekli duaları, yönlendirmeleri, teşvikleri ve destekleri için babım Ali, annem Fatema, abilerim Emad, Anes ve Atef ile erkek kardeşlerim Nader, Mohmed ve kız kardeşim Nahed'e desteklerinden dolayı teşekkür etmek istiyorum. Onlar bana güç, ilham ve güven kaynağı oldular. Son olarak, tezimi hazırlamamda bana yardımcı olan herkese içten şükranlarımı sunarım.

Majed Ali Ibrahim ANNAKOA  
Kastamonu, 2019

## İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI .....	ii
TAAHÜTNAME .....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
TABLolar DİZİNİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	5
2.1. Atık Cam.....	5
2.2. Geopolimer Teknolojisi .....	7
2.3. Geopolimerlerin Yapısı ve Karakteristikleri.....	7
2.4. Geopolimerlerin Üretiminde Kullanılan Bileşenler .....	8
2.5. Geopolimerlerin Avantajları .....	10
2.6. Geopolimerlerin Dezavantajları.....	10
2.7. Geopolimer Üretiminde Atık Cam Tozunun Kullanımı Üzerine İnceleme .....	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	18
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	18
3.1.1. Öğütülmüş Granül Yüksek Fırın Cürufu (YFC) .....	18
3.1.2. Agregalar.....	19
3.1.3. Atık Cam (GP) .....	20
3.1.4. Alkali Aktivatörler .....	21
3.1.5. Su .....	23
3.2. Numunelerin Üretimi ve Kürü .....	23
3.2.3. Numune Dökümü ve Kürü .....	24
3.3. Geopolimer Betonlar Üzerinde Yapılan Deneyler.....	26
3.3.1. Yayılma Tablası Deneyi.....	26
3.3.2. Yoğunluk Testi.....	27
3.3.3. Boşluk Oranı ve Su Emme Oranı Tayini .....	27
3.3.4. Basınç Dayanımı Testi .....	28
3.3.5. Eğilmede sDayanımı Testi .....	29
3.3.6. Ultrases Ses Geçiş Hızı (U.P.V) .....	30
3.3.7. Yüksek Sıcaklık Etkisi .....	31

4. TARTIŞMA VE BULGULAR .....	32
4.1. Yayılma Tablası Deney Sonuçları .....	32
4.2. Yoğunluk Test Sonuçları .....	35
4.3. Porozite Test Sonuçları .....	41
4.4. Su Emme Oranı Test Sonuçları .....	43
4.5. Basınç Dayanımı Test Sonuçları .....	47
4.6. Eğilme Dayanımı .....	52
4.7. Ultrases Geçiş Hızı (UPV) Sonuçları .....	56
4.8. Yangın Dayanım Testi Sonuçları .....	60
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	63
KAYNAKLAR .....	65
ÖZGEÇMİŞ .....	71





## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (YFC) .....	19
Şekil 3.2. Geopolimer üretiminde kullanılan agrega .....	19
Şekil 3.3. Toplanan atık cam malzemeler .....	20
Şekil 3.4. Camların öğütülmesinde kullanılan bilyalı değirmen .....	20
Şekil 3.5. Cam tozu parçacıkları (13 µm) .....	21
Şekil 3.6. Sodyum hidroksit peletleri .....	22
Şekil 3.7. Sodyum silikat çözeltisi .....	22
Şekil 3.8. Hobart karıştırıcı .....	25
Şekil 3.9. Çalışmanın karıştırma prosedürü .....	25
Şekil 3.10. Beton döküm ve buhar kürü .....	26
Şekil 3.11. Yayılma tablası deneyi.....	26
Şekil 3.12. Geopolimerlerin basınç dayanım testi .....	29
Şekil 3.13. Üç nokta eğilme dayanımı deneyi .....	29
Şekil 3.14. Eğilme dayanımı test cihazı .....	30
Şekil 3.15. Geopolimerlerde ultrases geçiş hızı ölçümü .....	30
Şekil 3.16. Yüksek sıcaklık etkisi deneyi .....	31
Şekil 4.1. Yayılma çapındaki değişimler .....	32
Şekil 4.2. Geopolimerlerin yayılma çapı ve GP oranı arasındaki ilişki .....	33
Şekil 4.3. Geopolimerlerin yayılma çapı ile SS/SH oranları arasındaki ilişki .....	34
Şekil 4.4. Geopolimerlerin yayılma çapı ile SS/SH oranları ile GP arasındaki ilişki .....	34
Şekil 4.5. Geopolimerlerin yoğunluk değişimleri .....	36
Şekil 4.6. Geopolimerlerin GP oranı ile kütle yoğunluğu arasındaki ilişki .....	36
Şekil 4.7. Geopolimerin GP oranı ile görünür yoğunluk arasındaki ilişki .....	36
Şekil 4.8. Geopolimerin görünür yoğunluğu ile SS/ SH oranı arasındaki ilişki .....	37
Şekil 4.9. Geopolimerlerin kütle yoğunluğu ile SS / SH oranı arasındaki ilişki .....	38
Şekil 4.10. SS / SH ve GP katkıların kütle yoğunluğuna etkisi .....	38
Şekil 4.11. SS / SH ve GP katkıların görünür yoğunluğa etkisi .....	39
Şekil 4.12. SS/SH ve GP oranının yoğunluğa etkisi .....	39
Şekil 4.13. SS/SH ve GP oranının görünür yoğunluğa etkisi .....	39
Şekil 4.14. Yoğunluklar arasındaki ilişki.....	40
Şekil 4.15. Kütle yoğunluğu ile yayılma çapı arasındaki ilişki.....	41
Şekil 4.16. Geopolimer betonlarda porozitedeki değişim.....	41
Şekil 4.17. Geopolimer betonlarda GP ile porozite arasındaki değişim .....	42
Şekil 4.18. Su emme oranlarındaki genel değişim.....	43
Şekil 4.19. GP ve su emme oranı arasındaki ilişki.....	44
Şekil 4.20. Su emme oranı ile SS/ SH oranı arasındaki ilişki .....	44
Şekil 4.21. SS / SH ve GP oranına bağlı su emme oranının belirlenmesi.....	45
Şekil 4.22. GP ve SS / SH oranındaki değişimin su emme oranına etkisi .....	45
Şekil 4.23. Su emme oranı ve slump arasındaki ilişki .....	46
Şekil 4.24. Geopolimerlerin kütle yoğunluğu ile su emme özelliği arasındaki ilişki .....	46
Şekil 4.25. Geopolimer beton basınç dayanımlarındaki değişim.....	48
Şekil 4.26. GP ve SS / SH ilavesinin basınç dayanımına etkisi .....	48
Şekil 4.27. Geopolimerlerde basınç dayanımlarındaki zamansal değişim oranı.....	49
Şekil 4.28. Geopolimerlerde GP ile basınç dayanımı arasındaki ilişki .....	49
Şekil 4.29. Geopolimerlerde SS /SH ile basınç dayanımı arasındaki ilişki .....	50
Şekil 4.30. Basınç dayanımı ve kütle yoğunluğu arasındaki ilişki .....	50

Şekil 4.31. Basınç dayanımı ve yayılma çapı arasındaki ilişki .....	51
Şekil 4.32. Basınç dayanımı ve su emme oranı arasındaki ilişki .....	51
Şekil 4.33 SS/ SH ve GP ilavesinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi .....	51
Şekil 4.34. Geopolimerlerin eğilme dayanımlarındaki değişim .....	52
Şekil 4.35. Geopolimerlerin eğilme dayanımlarındaki zamansal değişim oranı.....	53
Şekil 4.36. GP ve SS / SH ilavesinin eğilme dayanımına etkisi .....	53
Şekil 4.37. Eğilme dayanımı ve GP arasındaki ilişki.....	54
Şekil 4.38. Eğilme dayanımı ve SS / SH oranı arasındaki ilişki .....	54
Şekil 4.39 Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	55
Şekil 4.40. Eğilme dayanımı ve kütle yoğunluğu arasındaki ilişki.....	55
Şekil 4.41. SS / SH ve GP ilavesinin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi .....	56
Şekil 4.42. Geopolimerlerin UPV değişimleri .....	57
Şekil 4.43. GP ve SS / SH ilavesinin UPV'na etkisi.....	57
Şekil 4.44. UPV ve GP arasındaki ilişki .....	58
Şekil 4.45. UPV ve SS/SH arasındaki ilişki.....	58
Şekil 4.46. Basınç dayanımı ve UPV arasındaki ilişki.....	59
Şekil 4.47. Geopolimerlerde UPV ile kütle yoğunluğu arasındaki ilişki.....	59
Şekil 4.48. SS / SH ve GP ilavesinin UPV üzerindeki etkisi.....	60
Şekil 4.49. Betonun farklı sıcaklıklarda basınç dayanımı.....	61
Şekil 4.50. Yangına dayanıklılık ve sıcaklık arasındaki ilişki .....	62

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. YFC'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri .....	18
Tablo 3.2. Agregaların fiziksel özellikleri .....	19
Tablo 3.3. GP'nin kimyasal özellikleri .....	21
Tablo 3.4. Karışımlarda kullanılan SS/ SH çözültisi oranları .....	23
Tablo 3.5. Karışım tasarım parametreleri .....	24
Tablo 3.6. Karışım tasarım verileri (kg / m <sup>3</sup> ) .....	24
Tablo 4.1. Yayılma çapı sonuçları .....	32
Tablo 4.2. Geopolimerler betonların yoğunluğu (kg/dm <sup>3</sup> ) .....	35
Tablo 4.3. Geopolimerlerin porozite değerleri.....	42
Tablo 4.4. Su emme oranlarındaki % değişim değerleri.....	43
Tablo 4.5. Geopolimer betonların basınç dayanımları.....	47
Tablo 4.6. Geopolimer betonların eğilme dayanımları .....	52
Tablo 4.7. Geopolimer beton UPV sonuçları.....	56
Tablo 4.8. Beton kalitesinin UPV hızına bağlı sınıflandırılması .....	57
Tablo 4.9. Betonun farklı sıcaklıklardaki basınç dayanımları (MPa) .....	61

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Kısaltmalar

AA	Alkali aktivatör
AAB	Alkali- Aktivatör bağlayıcı
AAM	Alkali- activated material (alkali aktive edilmiş malzeme)
AAMs	Alkali Activated materials (alkali aktive edilmiş malzeme)
AAS	Alkali activated slag (Alkali aktivenli cüruf)
ASC	Alkali- activated slag concrete (alkali aktivenli cürufllu beton)
FA	Fly ash (uçucu kül)
YFC	Ground granulated blast-furnace slag (cüruf)
GP	Glass powder (cam tozu)
GPC	Geopolymer concrete (geopolimer beton)
OPC	Ordinary portland cement (portland çimentosu)
SH	Sodium hydroxide
SS	Sodium silicate
UPV	Ultrasonic pulse velocity (Ultras ses geçiş hızı)
w	Water (su)

## 1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliği alanında, yüksek performanslı malzemelerin geliştirilmesini sağlayan sürdürülebilir bir gelişim istenmektedir. Teze konu olan geopolimerler ise, bu amaca yol açabilecek yeni kullanım alanlarında bulunabilen bağlayıcı bir malzemedir. Son zamanlarda geopolimerler konusundaki araştırmalar artmış olmasına rağmen, geopolimerler üzerine yapılan önceki araştırmaların çoğu malzeme kimyası ile mikro-yapılar üzerinde yoğunlaşmıştır. Geopolimerlerin özellikleri ve dayanıklılığı hakkında bilgi azlığı ve geopolimer beton üretiminde atık malzemelerin kullanımı ile ilgili ise yetersiz bilgi ön plana çıkmaktadır.

Atık malzemeler arasında önemli bir yere sahip olana katı atıklar ise, atılması gereken çeşitli insan faaliyetlerinden kaynaklanan madde ve kütleler olup, bu malzemeleri genellikle endüstriyel atıklar, tıbbi atıklar ve evsel atıklar oluşturmaktadır. Bu katı atıklar içerisinde de önemli bir yere sahip olan inşaat atıkları ise; mevcut yapılar ve tesislerdeki inşaat ve yıkım, restorasyon, onarım gibi işlemler sonucu; kum, taş, çakıl, fayans, seramik, mermer, cam, alüminyum, ahşap, plastik, kağıt, boya, sıhhi tesisat boruları, elektrikli parçalar, asbest ve diğer malzemelerden oluşan atıklardır. Ayrıca inşaat sektöründe önemli bir kullanım alanıda bulunan cam ise, yüzyıllar boyunca ürünleri bir arada tutan evrensel bir saklama ve koruma malzemesi olarak hizmet veren ve günümüzde de soda şişesinden parfüme, bardaktan tabağa ve hatta yapılarda pencereden dış kaplama malzemelerine kadar bir çok kullanım alanına sahip bir malzemedir [1]. Zaman ilerledikçe cam ürünlerindeki artan kullanım sayesinde büyük miktarda atık camın oluşmasıyla sonuçlanan bir çevresel kirlilik kaynağına da dönüşmüştür. Dünya genelinde 2005 yılında yapılan bir araştırma ile tahmini 130 megaton cam kullanıldığı ve kullanılan camların yaklaşık 3'te biri düz camlardan oluştuğu belirlenmiştir. Bu toplam üretim içerisinde Avrupa Birliği yaklaşık 33 megaton cam üretirken, Çin ve ABD sırasıyla yaklaşık 32 ve 20 megaton üretmiştir [2]. Bu atıkların çevreye olan zararlarının azaltılmasında yeniden kullanım/geri dönüşüm ve atık azaltma, atık yönetimi çerçevesinde çok önemli unsurlardır. Bu unsurlar doğal kaynakları korunmasında, değerli alanların çöp depolama alanlarına dönüşmesini azaltmada, hava ve su kirliliğini engellemede, yeni ürünler için ham,

madde kullanımını kısıtlamada enerji tüketimini düşürmede ve yeni işler yaratmada rol oynamaktadırlar [3]. Bununla birlikte, kullanılan camların tümü kirlilik, maliyet veya karışık renkler nedeniyle yeni camlara geri dönüştürülememektedir [4]. Bu atıkların ekonomiye yeniden kazandırılmasında geri dönüştürmek ve hatta bu geri dönüşümlü atık camlardan yararlanmak için yeni seçenekler belirlemek gereklidir. Önemli seçeneklerden biri, atık camın inşaat malzemesi olarak kullanılmasıdır. Cam, esas olarak kum ( $\text{SiO}_2$ ) ve soda külü ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) içeren erimiş bir sıvı karışımının, süper hızlı soğutulmasıyla içinin kristalize olmaması ve iç yapısının muhafaza edilerek sertleşmesinin sağlandığı rijid bir forma getirilmesinin ürünüdür [5]. 1963 yılında, mimari olarak kullanılacak betonda bulunan agrega üretmek için cam parçaları kullanımını üzerine ilk çalışma yapılmıştır [3]. Beton, yıllık 10 milyar tondan fazla üretildiği göz önüne alındığında en önemli yapı malzemesi olduğu varsayılmaktadır [6]. Dünya nüfusunun 2050 yılında 9 milyar ve yüzyılın sonlarında 11 milyara çıkacağı ve bunun su, enerji, gıda talebinde önemli bir artışa yol açacağı tahmin edilmektedir [7]. Ayrıca, beton talebinin 2050 yılına kadar yılda yaklaşık 18 milyar tona yükselmesi beklenmektedir [8]. Sonuç olarak, beton endüstrisi, çimento ve beton üretmek için önemli miktarda doğal kaynak kullanacaktır. Bu atık malzemeler arasında geri dönüştürülemeyen atık cam, birçok Avrupa ülkesinde üretilen çoğu atıktan birini teşkil etmekte ve önemli bir çevre sorunu oluşturmaktadır. Her ne kadar cam, kimyasal ve fiziksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirmeden ambalaj akışına geri dönüştürülebilmesine rağmen, ambalaj camına yönelik katı kriterleri karşılamayan atık depolama alanına gönderilecek önemli bir oran vardır. Atık cam doğada kolayca bozulan bir malzeme değildir ve atık depolama camlarının hala büyük bir kısmı yeniden kullanıma hazır hale getirilmeyip çöp alanlarında biriktirilmektedir. Atık camların elden çıkarılmasından kaynaklanan çevresel sorunları azaltmak için daha iyi bir çözüm bulmak amacıyla, atık camı inşaat için geopolimere dönüştürmek için alkalın aktivasyon teknolojisinde kullanılabilir. Geopolimer üretiminde, atık camdaki yüksek amorf  $\text{SiO}_2$  nedeniyle bağlayıcı malzeme olarak kullanılma potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, şimdiye kadar geopolimerlerde öncü madde olarak atık cam üzerinde yalnızca sınırlı bir araştırma yapılmıştır. Şu anda, geopolimer sistemlerinde atık cam kullanmanın fizibilitesi hala büyük ölçüde bilinmemektedir. Bu nedenle, son yıllarda alternatif yapı malzemeleri üzerinde araştırmalar yapılmakta ve bu araştırmalar atıkların veya geri dönüştürülmüş

malzemelerin betonda potansiyel kullanımı ile ilgili önemli bir yer kaplamaktadır [9-11].

Meyer ve ark (2001); Shayan ve Xu (2003); Topçu ve Canbaz (2004); Topçu ve ark. (2007); İsmail ve El Hasimi (2007); Sacani ve Bignozzi (2010) çalışmalarında araştırdıkları konu gibi inşaat teknolojisinde atık camın yeniden kullanıldığını vurgulayan dünya çapında birçok çalışma da mevcuttur. Bu çalışmalarda temel nokta camın, agrega gibi bazı doğal kaynakların yerine geçerek beton karışımında kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır [12-17]. Camın agrega olarak kullanımının olası faydaları kısaca: çöp depolama alanlarından tasarruf etmek için daha az cam atılır, daha az doğal agrega kullanımı (beton bileşeni) doğal kaynaklarımızı korur ve camın mevcut olduğu uzak mesafelere ham maddeler taşınmayarak iş gücünden, kaynaklardan ve iş zamanından tasarruf edilmesini sağlar. Atık camla yapılan beton karışımlarının gelişimine artan bir ilgi duyulmasının yanı sıra, atık camın agrega olarak geri dönüşümü, çevrenin korunması ve ekonomik avantaj için etkilidir [18].

Beton, çok yönlülüğü, dayanıklılığı ve ekonomisi nedeniyle dünyada en çok kullanılan inşaat malzemelerinden biridir. Beton, kaba agrega, ince agrega, çimento ve suyun bir karışımıdır. Betonun önemli bir parçası olan Portland çimentosu üretimi atmosfere önemli miktarda CO<sub>2</sub> salınımına yol açmaktadır [19]. Çimento endüstrisi, dünyadaki atmosferik CO<sub>2</sub>'in %5-8'lik kısmını üretir. Bu CO<sub>2</sub>, küresel ısınmaya yol açan sera gazı etkisindeki artışlardan büyük ölçüde sorumludur [20]. Her ne kadar çimento için kullanılan ek malzemelerin değiştirilmesi ile çevreye olan etkisinde çok fazla azalma olsa da, betonun karbon ayak izi hala yüksek değerlerdedir [21].

Bağlayıcı içermeyen yeni bir çimento geliştirmenin en iyi alternatiflerinden biri, geopolimer beton olarak bilinen atık malzemeninde kullanılabileceği alkalilerle aktive edilmiş malzemelerdir (AAM) [22]. Bu nedenle, Kastamonu ilinde bulunan en yaygın atık cam malzemelerinin örnekleri geopolimer betonda ince ve kaba agregaların yerini alması için toplanmış ve kırılmış, atık cam içeren malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için deneyler yapılmıştır.

Atık camın başarılı bir şekilde kullanılması, atık camın ortadan kaldırılması ile ilgili çevresel ve sağlık sorunlarının giderilmesine ve atık bertarafı için gereken arazi alanının azaltılmasına yardımcı olacaktır. Geopolimer betonda cam tozunun kullanılmasına sonucu elde eden mevcut sonuçlarındaki çelişki ve farklılıklar nedeniyle hazırlanan bu çalışmanın amacı, öğütölmüş granöl yüksek fırın cürufu (YFC), atık cam (GP), sodyum hidroksit (SH), sodyum silikat (SS) ile çeşitli oranlarda karıştırılan kaba agrega ve ince agregaların etkilerinin araştırılmasıdır.





## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Atık Cam

Teorik olarak, cam tamamen herhangi bir kalite kaybı olmadan geri dönüştürülebilen bir malzemedir. Atık camların başarılı bir şekilde geri dönüşümü için pek çok örnek vardır: cam üretiminde bir kırıntı olarak, aşındırıcıların üretiminde hammadde olarak, kumlamada puzzolanik bir katkı olarak, yol yataklarında, kaldırımda ve park yerlerinde fiberglas üretmek için hammadde olarak, karayolları için kullanılan boyalarda yansıtıcı olarak ve silahlarda ateşleyici olarak kullanılması sayılabilir [10]. Orijinal formunda, cam, üç ana ham doğal malzemenin (kum, silika ve kireçtaşı) dengeli bir kombinasyonu olarak üretilir. Üretim sürecinde ek olarak geri dönüştürülmüş atık cam da ilave edilebilir. Cam geri dönüşüm işlemi, "son ürün" üretmek için çoğunlukla işlenmemiş cam malzemelerle karıştırılan "kırıntı" adı verilen kırılmış bir cam ürünü şeklindedir [11]. Cam malzemelerin sonsuza kadar geri dönüştürülebilmesine ve aynı camın çeşitli ürünler üretmek için birçok kez geri dönüştürülebilmesine rağmen, en iyi son ürünü üretmeye devam etmek için geri dönüştürülmüş malzemelerin yüksek kalitede olması gerekir. Bu nedenle, inşaat yıkıntılarında, evsel ve tıbbi atıklardan ve endüstriyel atık hurda malzemelerinden kaynaklanan sürekli atık cam miktarları birikmektedir ve malzemelerin atık sahasında depolanması ya da kaba agregalar ve/veya ince agregalar için kısmi bir ikame olarak beton karışımlarında kullanılması alternatif bir çözüm olabilmektedir [12].

Teknik olarak camlar genellikle tüpler, çubuklar, çukur kaplar gibi çeşitli özel şekillerin yanı sıra, çoğunlukla kimya, laboratuvar teknolojisi, eczacılık, opto-elektronik, çeşitli ev içi uygulamalar ve ev aletlerinde kullanım için düz cam ve granül formunda üretilir. Sınıflandırma amacıyla, çok sayıda teknik cam, kabaca, oksit bileşimlerine göre (ağırlıkça yüzde) dört ana grupta düzenlenebilir. Bu gruplar sırasıyla borosilikat camları, alkalin toprak alüminosilikat camları, alkali kurşun silikat camları ve toprak alkali silikat camlarıdır.

Borosilikat camları, cam ağ oluşturucuları olarak kayda değer miktarda silika ( $\text{SiO}_2$ ) ve borik oksit ( $\text{B}_2\text{O}_3 > \% 8$ ) bulunan ilk ana kategoridir. Borik oksit miktarı cam

özelliklerini belirgin bir şekilde etkiler. Yüksek dirençli çeşitlerin yanı sıra ( $B_2O_3 \leq \% 13$ ), borik oksidin yapısal ağa katıldığı farklı yollardan dolayı - sadece düşük kimyasal dirence sahip ( $B_2O_3 > \% 15$ ) çeşitleri de vardır. İkinci tür olarak, alkalın toprak alüminosilikat camları ise alkali oksit içermez ve  $\% 15 - 25 Al_2O_3$ ,  $\% 52 - 60 SiO_2$  ve yaklaşık  $\% 15$  alkalın toprak içerir. Çok yüksek dönüşüm sıcaklıkları ve yumuşama noktaları bu türün tipik özellikleridir. Ana uygulama alanları, halojen lambalar, vitrinler, yüksek sıcaklık termometreleri, termal ve elektriksel olarak yüksek oranda yüklenebilen film dirençleri ve yanma tüpleri için cam ampullerdir. Alkali kurşun silikat camları üçüncü ana kategoridir ve bu camlar tipik olarak  $\% 10$ 'dan fazla kurşun oksit (PbO) içerir.  $\% 20-30 PbO$ ,  $\% 54-58 SiO_2$  ve yaklaşık  $\% 14$  alkali içeren kurşun camlar oldukça yalıtıcıdır ve bu nedenle elektrik mühendisliği için büyük öneme sahiptir. Lamba gövdelerinde kullanılırlar ve kurşun oksit de bir X-ışını koruyucu bileşen (radyasyon koruyucu cam ve katod ışını tüpü bileşenleri) olarak büyük öneme sahiptir. Son kategori en eski cam türüdür ve nominal olarak alkali toprak alkali silikat (sodalı camlar) camlarıdır. Büyük gruplar halinde üretilen düz camlardan (pencere camı) ve saklayıcı camlardan oluşur. Bu camlar yaklaşık  $\% 15$  alkali (genellikle  $Na_2O$ ),  $\% 13 - 16$  alkalın toprak ( $CaO + MgO$ ),  $\% 0-2 Al_2O_3$  ve yaklaşık  $\% 71 SiO_2$  içerir. Bazı içerikli varyantları ayrıca önemli miktarda alkali ve alkali toprak içeriği azaltılmış BaO da içerebilir [13].

Dünyada her yıl ortaya çıkan devasa atık cam miktarı ile başa çıkmak büyük bir zorluktur. Çevresel ve kaynak yönetimi sorunları nedeniyle katı atık akışındaki bu atık miktarını azaltmak için sürdürülebilir çabalar gerekmektedir. Türüne ve kalitesine bağlı olarak, atık cam geri dönüştürülebilir ya da çöp depolama alanlarına atılabilir. Tüm atık camların geri dönüştürülebilir olduğu ve cam fabrikalarında tekrar kullanılabilmesinin yanında asıl sorun, toplanan camın kalitesi ve rengi arasındaki farktır. Farklı renk ve kökenlerden oluşan karışık camlar, kontrol edilemeyen bir renk ve yeni camdaki özelliklerle sonuçlanır ve geri dönüştürülemez, bu da çöp alanlarına atılması anlamına gelir [23]. Örneğin Hindistanda yapılan bir araştırmada belediye atıklarına yılda 740 bin ton cam atığının atıldığı, ancak  $\%5$ 'inin geri dönüştürüldüğü kaydı bulunmaktadır [24]. Hindistan örneği gibi artan çöp alanlarının ekonomik ve çevresel sonuçlarından dolayı, dünya çapında atık camın geri dönüşümüne gösterilen

ilgi artmaktadır. Beton endüstrisi, atık camın betonda agrega olarak veya çimentolu ikame malzemesi olarak yeniden kullanılması için en uygun seçeneklerden biridir [25].

## **2.2. Geopolimer Teknolojisi**

Geopolimer bağlayıcılar, bir alüminosilikat malzemenin konsantre bir alkali hidroksit ve / veya alkali-silikat çözeltisi ile reaksiyona girmesiyle sentezlenen, şekilsiz bir üç boyutlu yapıya sahip olan bir inorganik polimer sınıfıdır. Ancak Geopolimer bağlayıcı üretiminde atık malzemelerin kullanılması, atık yönetimi problemlerinin çözümü için son zamanlarda başarılı bir şekilde ortaya konan potansiyel bir çözümdür [26-30]. Dayanım sağlama süreci olarak da ifade edilen geopolimerizasyon işleminde, alüminosilikat jelinin yapısı ve kimyasal bileşimi mekanik performansın belirlenmesinde önemli rol oynar. Genel olarak, geopolimer bağlayıcılarda arzu edilen bir mukavemet gelişimini karşılamak için, bağlayıcı malzemelerinde optimum oranda reaktif silika ( $\text{SiO}_2$ ) ve alümin ( $\text{AlO}_3$ ) içeriği bulunmalıdır [30-31]. Bu  $\text{SiO}_2$  içeriğinin sağlanmasında kullanılabilir olan atık camın geri dönüşümü için geopolimer teknolojisinin ekolojik veya çevresel faydaları; (1) faydalı uygulamalar için atık malzemelerin atık depolama alanlarındaki atması, (2) Portland çimentosu üretimine atfedilen enerji ve  $\text{CO}_2$  emisyonlarının kullanımındaki azalma, (3) doğal kaynakların korunması şeklinde sıralanabilir [30].

## **2.3. Geopolimerlerin Yapısı ve Karakteristikleri**

Geopolimer, yüksek konsantrasyonda sıvı hidroksit veya silikat çözeltisi gibi bir alkali sıvının, jeolojik kökenli bir malzeme yada uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve pirinç kabuğu külü gibi yan ürün olan malzemelerdeki silisyum (Si) ve alüminyum (Al) ile reaksiyona girmesi için kullanılan bir beton türüdür [30]. Bu beton türünün sıradan Portland çimentosundan farklı olarak, geopolimer matris oluşumu ve mukavemeti için kalsiyum silikat ile hidratlar oluşmaz, ancak mukavemet elde etmek için silika ( $\text{SiO}_2$ ) ve alümina ( $\text{AlO}_3$ ) ile çoklu yoğunlaşma yapar. Geopolimerin iki ana bileşeni alümina silikat esaslı malzemeler ve alkali çözeltileridir [30, 31]. Bağlayıcı olarak alüminosilikat esaslı ve hem silika hem de alümina açısından zengin olan malzemeler kullanılmalıdır. Geopolimer betonunda, uçucu kül, silis dumanı, pirinç kabuğu külü,

öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) ve metakaolin gibi PÇ yerine alternatif olarak kullanılır. Bu çalışmada, uçucu kül ve YFC alternatif bağlayıcı olarak kullanılmıştır.

Geopolimer, YFC ve uçucu kül gibi endüstriyel atık ürünlerini beton için bağlayıcıya dönüştüren mükemmel bir alternatiftir. Geopolimer bağlayıcıları, Geopolimer beton üretmek için agregalarla birlikte kullanılır. Erken dayanımları çok yüksek olduğundan altyapıları inşa etmek, onarmak ve ön döküm birimleri için ideal bir malzemedir. Priz süreleri kontrol edilebilir ve çok uzun süre bozulmadan kalabilirler. Bol hammadde tedarik imkanı, az CO<sub>2</sub> emisyonu, daha az enerji tüketimi, düşük üretim maliyeti, yüksek ön dayanım ve hızlı ayar gibi özelliklere sahiptirler.

Geopolimer beton, geleneksel betonun yerini alarak çevresel olarak sürdürülebilir bir ürünün önemli bir unsurunu oluşturma potansiyeli olan inorganik polimer kompozitlerdir. Geopolimerin en büyük yararı polimerin endüstriyel ürünlerden faydalanmasıdır. Bu sayede CO<sub>2</sub> emisyonunda % 80 ila 90 oranında azalma, sağlanması ancak sıradan Portland çimentosu (OPC) kullanılmadan geopolimer beton üretimi ile sağlanabilir [22].

Geopolimer esasında saf inorganik madde olarak tanımlanabilen, ancak organik içerikli geomateryalleri içerecek şekilde genişletilebilen bir malzemedir. Bu nedenle, geopolimerizasyon sırasında inorganik ve organik türler arasındaki çapraz bağı göz önünde bulundurmamak önemlidir. Düşük karbon ayak izine sahip olan yeşil beton ve inşaat malzemesi üretimi için iyi bir potansiyele sahiptir. Geopolimer teknolojisi; otomobil, havacılık, metalurji, inşaat mühendisliği ve plastik sanayi gibi endüstrilerde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu geniş kullanım alanı içerisinde inşaat sektöründe ise fiber kompozitlerde, atık izolasyonu ve beton için kullanılacak çimentolarda kaplama ve yapıştırıcı olarak kullanım alanlarını her geçen gün arttıran bir malzeme olmuştur [31,35].

#### **2.4. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Bileşenler**

Geopolimer beton üretmek için çeşitli endüstriyel yan ürünler ve doğal olarak temin edilebilen malzemeler kullanılabilir. Yaygın olarak kullanılan çimento esaslı bağlayıcı

maddeler uçucu kül, silis dumanı, pirinç kabuğu külü vb. şeklindeki malzemeler, alkali aktivatörler ve agrega sayılabilir [33].

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) ilk olarak 1853 yılında Almanya'da kullanılmış ve kullanımı geliştirilmiştir. YFC, 1900'lerin başından beri betonda çimentolu ikame malzemesi olarak kullanılmıştır. Kuzey Amerika'da genel amaçlı kullanılan betonda, genel olarak karışımlardaki bağlayıcı malzemenin %30 ila %45'ini oluşturmaktadır. YFC, aynı zamanda cüruf çimentosu olarak da adlandırılır ve yüksek demir fırını cürufundan elde edilir. Bu çimentonun özelliği, erimiş bir durumda yüksek sıcaklıkta demirle eş zamanlı olarak eriyik halde geliştirilen kalsiyum alüminosilikatlardan oluşan esas olarak silikat ve alüminosilikatlardan oluşan metalik olmayan bir hidrolik çimento olmasıdır. YFC'yi 45 mikrondan daha az öğütülmüş olan granül malzemenin, yaklaşık 400 ile 600 m<sup>2</sup>/kg Blaine özgül yüzey alanına sahip hali olarak açıklamak mümkündür. YFC için bağıl yoğunluk (özgül ağırlık) 2,85 ile 2,95 arasındadır. Genel yoğunluk 1050 ile 1375 kg/m<sup>3</sup> (66 ila 86 lb/ft<sup>3</sup>) arasında değişmektedir.

Alkali aktivatör ise, geopolimerizasyona maruz kaldıklarında bağlayıcıda bulunan Al ve Si'yi aktive ederek bağlanma özelliği vermelerinden dolayı geopolimer karışımının çok önemli bileşenleridirler. Esas olarak, sodyum hidroksit (NaOH) veya potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) veya potasyum silikat (K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) kombinasyonu gibi yüksek pH aktifleştiricilerini kullanılır [33].

Agrega herhangi bir parçacık materyali için kullanılan bir terimdir. Çakıl, kırma taş, kum, cüruf, geri dönüştürülmüş beton ve geosentetik agregaları içerir. Agregalar doğal, imal edilmiş veya geri dönüştürülmüş olabilir. Agregalar beton karışımının % 60-80'ini oluşturan ve betona basınç dayanımını etkileyen bir malzemedir. Betonun herhangi bir özel karışımındaki agregalar dayanımları, dayanıklılıkları, işlenebilirlikleri için seçilirler. İyi bir beton karışımı için agregaların temiz, sert, betonun bozulmasına neden olabilecek kimyasal veya kil parçacıkların emilmemiş olması gerekir. Agregalar "kaba" veya "ince" olarak iki kategoriye ayrılır.

- Kaba agregalar, 4.75 mm'den daha büyük parçacıklardır. Kullanılan normal aralık 9.5 mm ile 37.5 mm arasındadır.

- İnce agregalar genellikle çapı 4.75 mm'den az olan kum veya kırılmış taşlardır.

Tipik olarak, inşaatta kullanılan en yaygın agrega boyutu 20 mm'dir. Daha büyük bir boy olan 40 mm, kütle betonunda daha yaygındır. Daha büyük agrega çapları ihtiyaç duyulan çimento ve su miktarını azaltır. Uluslararası standartlara göre seçilip test edilecek agregalar geopolimer beton üretmek için de kullanılabilir [35].

## 2.5. Geopolimerlerin Avantajları

Geopolimerler, geleneksel sıradan polimer betona göre bir takım avantajlar sunmaktadır [31]:

1. Belirgin derecede daha düşük CO<sub>2</sub> emisyon değerine sahiptir.
2. Daha iyi ısı yalıtımı özelliği sağlar.
3. Yüksek sıcaklık / yangın dayanımına sahiptir.
4. Genellikle atık alanlardaki malzemeler için uygun bir kullanım alanı sağlar.
5. Daha iyi basınç dayanımı sağlar.

## 2.6. Geopolimerlerin Dezavantajları

Geopolimerler, geleneksel PÇ betonun yerini alan süper beton gibi görünmekle birlikte, bazı dezavantajları sahip bir malzemedir [31]. Bu dezavantajlar sırasıyla:

1. Üretimi zordur: geopolimer beton, üretiminde ihtiyaç duyulan malzemelerde özel işlemsel gereksinimleri vardır ve oluşturulması son derece zordur. İnsanlara zararlı olabilecek, sodyum hidroksit gibi kimyasalların da kullanılmasını diğer bir zor yanını oluşturmaktadır.
2. Yalnızca ön karışım: geopolimer beton, tehlike yaratması nedeniyle sadece prekast malzemelerde veya ön karışım malzemeleri olarak satılır.
3. Hassas geopolimerizasyon süreci: Üretilmesinde gereken hassasiyet normal betona göre fazladır ve gereken hassasiyet gösterilmediğinde aynı karışımlarda dahi son derece değişken sonuçlar elde edilebilmesi nedeniyle bilinen bir üretim formatına sahip değildir.

4. En yeni ve fikren de olumlu görünen bir beton olan geopolimer beton, karıştırılması ve uygulanması sürecinde büyük değişikliklere neden olabilecek çok fazla unsura sahip olup, standart numune üretim sorunu vardır.

## 2.7. Geopolimer Üretiminde Atık Cam Tozunun Kullanımı Üzerine İnceleme

Atık cam tozunun bilinen ilk çalışmalarında geopolimerizasyon konusunda çok sınırlı çalışmalar olduğu bildirilmiştir [33-36]. Bununla birlikte, elde edilen en yüksek basınç dayanımları, kullanılan cam materyallerin nispeten düşük reaktivitesi nedeniyle yeterli olmayan betonlardı. Redden ve Neithalath (2014), hammadde olarak cam tozu ve uçucu kül karışımlarını kullanarak geopolimer beton üretmiştir. % 50 uçucu kül ve % 50 cam tozu içeren geopolimer betonun 8 molarite (M) NaOH çözeltisi ile sentezlendiği ve hidrotermal olarak 75 ° C'de 48 saat süre ile sertleştiği, 35 MPa'nın en yüksek basınç dayanımını gösterdiği sonucuna varmışlardır [49]. Cam tozu ve metakaolin karışımlarının geopolimerizasyonunu inceleyen Pascual ve diğerleri, (2014) ağırlıkça % 8 metakaolin içeren geopolimer harcı için 28 gün en yüksek 30 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmışlardır [36].

Ayrıca atık cam kullanılarak üretilmiş betonların, bu atıkların etkilerinin incelendiği diğer çalışmalar ise kısaca aşağıda özetlenmiştir.

Hong vd. (2007) çalışmalarında camın geri dönüşümü ile ilgili farkındalığın artmasının, farklı alanlarda atık formların farklı alanlarda kullanımına yönelik incelemeleri üzerine bir araştırmalarında, atık camın katma değerli beton üretimi için yeniden kullanıldığı inşaat alanı olduğu ve literatür taramasında, atık camın betonda agrega olarak kullanılmasının yaklaşık 50 yıllık bir geçmişe sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca betonda cam kullanılmasıyla oluşan alkali silika reaksiyonu ve elde edilecek betonun estetik özellikleri araştırılmıştır. Ancak, alkali silika reaksiyonun günümüze kadar bir çözüm tam anlamıyla bulunamaması ve camın mimari betonda uygulanmasının hala iyileştirilmesi gerekliliği konusunu üzerine bu araştırmalarında ifade etmişlerdir. Hem alkali silika reaksiyonunun hafifletilmesinde hem de betonda dekoratif amaç için atık camın kaba ve ince agrega olarak kullanımını daha da araştırmak için laboratuvar deneyleri yapmışlar, betonun hem taze hem de

sertleştirilmiş özelliklerinin test etmişlerdir. Sonuçlar, atık camın agrega olarak kullanılmasının, yüksek performanslarının yanı sıra, sanayide artan pazarın yanı sıra betonun yüksek bir mimari seviyeye doğru gelişmesini kolaylaştırdığını göstermiştir [38].

Meyer vd. (2001), camı toplamak, diğer malzemelerden ayırmak, temizlemek ve betonda agrega olarak belirli uygulamalar için gereksinimleri karşılamak üzere uygun gradasyonu elde etmek için uygun karışımlarda geri dönüşüm camlarında atılması gereken çeşitli adımları tartışmışlardır [52].

Zainab ve Enas (2009), atık cam içeren betonlarda ince agrega olarak kullanılmasındaki betonun özelliklerini araştırmışlardır. Mukavemet özellikleri ve alkali silika reaksiyonu (ASR) genişmesi, atık cam içeriği açısından analiz edilmiştir. Toplam 80 kg'lık kırılmış atık cam miktarı, kısmen 900 kg'lık bir beton karışımı içerisinde % 10, % 15 ve % 20 oranlarında olmak üzere ince agrega yerine kullanılmıştır. Sonuçlar, 28 gün sonra atık camın verdiği % 80 puzolanik dayanım aktivitesini kanıtlamıştır. % 20 atık cam içeriğine sahip numunelerin eğilme dayanımı ve basınç dayanımı sırasıyla 28 gündeki normal kontrol numunesi sonuçlarından % 10,99 ve % 4,23 artışa neden olmuştur. Harç çubuğu testleri, ince kırılmış atık camın normal kontrol karışımına kıyasla betonun genişmesini % 66 oranında azaltmaya yardımcı olduğunu göstermiştir [53].

Topçu ve Canbaz (2004), atık camı beton karışımında kaba agregalar olarak değerlendirmiştir. Atık camın taze ve sertleşmiş beton testleri ile işlenebilirliği ve betonun dayanımı üzerine etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, atık camın betonun işlenebilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı ve az bir miktar mukavemetin azalmasını sağladığı belirlenmiştir. Atık cam, özelliklerini dikkate almadan agrega olarak kullanılamaz. Maliyet analizine gelince, beton üretim maliyetlerini düşürdüğü tespit edilmiştir. Bu çalışma, atık camın betonda kaba agrega olarak kullanılabileceği ve yüksek maliyet ya da titiz bir enerjiye ihtiyaç duyulmayacağı gerçeğini göz önüne almıştır [54].



Topçu vd. (2007) çalışmalarında, beton agregası olarak atık cam veya cam kırıntı (GC) kullanımının, kaynak verimliliğindeki artış nedeniyle her geçen gün daha da yaygınlaştığını belirtmişlerdir. Atıkların geri dönüşümü sürdürülebilir kalkınma için çok önemlidir. Cam beton veya harçta agrega olarak kullanıldığında, alkali silika reaksiyonuna bağlı olarak genleşmeler ve iç gerilmeler meydana gelir. Ayrıca, dayanıklılıkta hızlı bir kayıp, genellikle aşırı çatlak oluşumu ve geçirgenlikte bir artış gözlenir. Çatlak oluşumunu azaltmak için bir tür kimyasal veya mineral katkı kullanmak gereklidir. Çalışmalarında, harç çubuklar ağırlık olarak ince agrega olarak dört farklı miktarlarda üç farklı cam rengi kullanılarak üretilmiş ve bu cam agregaların alkali silika reaksiyonu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ek olarak, harçların genleşmesini azaltmak için, mineral katkı maddesi olarak % 10 ve % 20 uçucu kül (UK) ve kimyasal katkı maddesi olarak % 1 ve % 2  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  çimentoya ağırlık olarak dahil edilmiş ve genleşme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Beyaz (WG), yeşil (GG) ve kahverengi cam (BG) agregaları arasında, WG agregasının en büyük genişlemeye neden olduğu görülmüştür. Ayrıca, beton karışımındaki genleşmenin, cam miktarındaki artışla arttığı kaydedilmiştir. Test sonuçlarına göre, alkali silika reaksiyonuna maruz kaldığında % 0.2 kritik değerin altında genleşme değerleri olan harçlar üretmek için % 20'den fazla UK ve % 2  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  değiştirmelerinin gerekli olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, bu katkı maddelerinin kullanımı, ASR nedeniyle meydana gelen genişlemeleri azaltmıştır [55].

Kou ve Poon (2009), geri dönüşümlü cam parçacıklarının kendiliğinden yerleşen betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Kendiliğinden yerleşen beton karışımlarının yapımında nehir kumu (% 10, % 20 ve % 30 oranlarında) ve 10 mm granitin (% 5, % 10 ve % 15) yerine geri dönüşümlü cam kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, geri dönüşümlü camın kendiliğinden yerleşen beton karışımlarının yayılma çapının, blokaj oranının, hava içeriğinin artan geri dönüşümlü cam içeriği ile arttığını göstermiştir. Sonuçlar, geri dönüştürülmüş cam kendiliğinden yerleşen beton karışımlarının basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve statik elastikiyet modülünün geri dönüştürülmüş cam agrega içeriğindeki artışla azaldığını ortaya koydu. Ayrıca, geri dönüştürülmüş camın kendiliğinden yerleşen beton karışımlarının kuruma büzülmesi, geri dönüştürülmüş cam içeriği arttığında azalmıştır [56].

Saccani ve Bignozzi (2010), farklı kimyasal kompozisyonlara sahip menfezlerden elde edilen farklı cam türlerinin alkali silika reaksiyonu genişletme davranışını incelemişlerdir. Cam reaktivitesi, beton ortamını simüle etmek için sodyum ve / veya kalsiyum hidroksit bazında farklı alkalin çözeltilerinde belirlenmiştir. İnce agrega olarak incelenen camın farklı miktarlarını içeren harcın genleşmesi, farklı koşullarda gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel araştırma çalışmalarından elde edilen ana sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir i) cam kimyasal bileşimi toprak olarak kırıntı içeren harç numunelerinin genleşme davranışını güçlü bir şekilde etkiler. Cam geri dönüşüm genişlemesi göz önüne alındığında, genişleyen bileşimler belirlenmeli ve tüketici sonrası camın işlenmesi için seçici prosedürler getirilmelidir; ii) araştırılan deneysel koşullar kurşun silikat camın her zaman ilgili harç numuneleri için kritik genişleme koşullarına yol açtığını vurgulamaktadır; iii) cam çözünürlüğü ve harç genleşmesi arasında doğrudan bir korelasyonun altı çizildi ve  $Ca^{2+}$  'nın cam çözünürlüğüne doğru tamponlama etkisi doğrulanmıştır. Çözünürlük işlemi, kurşun silikat camında homojen ağ erimesini içerir, oysa ayırıcı tabakalar diğer tüm cam tiplerinde oluşturulur. Boro silikat camın çözünürlüğü, Fe, Ba ve Ti oksitlerin varlığından güçlü bir şekilde etkilenir; iv) Enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile belirlenen alkali silika reaksiyonu jel bileşimleri, agrega olarak kullanılan orijinal camın kimyasal bileşimine bağlı olduğunu, jeldeki iyonların elektrik yükü ve boyutu, şişme kapasitesi gibi özelliklerini belirlemede önemli parametre olduğunu ortaya koymuşlardır [57].

Federico ve Chidiac (2009), atık şişe camının beton karışımlarına ek bir çimento ikame malzemesi olarak dahil edilmesini araştırmış ve atık camın alkali silika reaksiyonu olarak puzolanik özelliklerinin tane büyüklüğü ve yüzde ilavesi ile ilişkili olduğu sonucuna varmıştır. Ek olarak, lityum katkı maddeleri alkali silika reaksiyonu genleşmesini kontrol eder; ancak, bu kontrolün mekanizması henüz tanımlanmamıştır [58].

Idir vd. (2010), geri dönüşümlü cam talebinin son yıllarda, özellikle karışık cam için önemli ölçüde azaldığını belirttikleri çalışmalarında, camın üretiminin geri dönüşümden daha ucuz olduğunu, zira koşullandırıcılar geri dönüşüm süreci için masraf gerektiren bir çalışmaya gerek olduğunu ifade etmişlerdir. Bu çalışmalarında

cam depolamaya sürdürülebilir bir çözüm sağlamak için, bu tür bir camı beton içerisinde yeniden kullanmak potansiyel ve teşvik edici bir yol olacak bir önerileri olmuştur [59].

Bir diğer çalışmada ise Caijun ve Keren (2007), betonda kullanılan cam partiküllerin boyutuna bağlı olarak, iki farklı davranış gözlemlenebilir: negatif etkiler içeren alkali-silika reaksiyonu ve betonun özelliklerini artıran puzolanik reaksiyon. Çalışmaları, harçlarda ayrı ayrı veya birleştirilmiş ince cam ve cam agrega parçacıklarının kullanımıyla ilgilenmiştir [60].

Wang (2008), normal nehir kumunun bir kısmını atılan LCD camından hazırlanan kum ile değiştirirken, atılan sıvı kristal ekran (LCD) camının betona geri dönüşümünü incelenmiştir. Üç farklı karışım tasarımı ACI yöntemiyle düzenlenmiş ve incelenen % 0, % 20, % 40, % 60 ve % 80 LCD cam agregası ile ( $f_{c28} = 21, 28$  ve  $35$  MPa) olarak sınıflandırılmıştır. Test sonuçları, 15 cm'lik tasarım çöküşü ile karşılaştırıldığında, üç farklı karışım tasarımında % 20 cam agregası betonun iyi çökme ve yayılma çapını koruduğunu göstermiştir. Buna ek olarak, örnekler için 7 ila 11 cm arasında bir çökme kaybı gözlenmiştir. 28 ve 35 MPa tasarım güçleri için % 60 ve % 80 cam kumu değişimi ile betonun cam agregası değişimi ile basınç dayanımı, tasarım dayanımlarından daha yüksek değerlere ulaştığını bildirmişlerdir. Ayrıca, betonun % 20 cam agregası değişimi ile dayanıklılığı kontrol grubundan daha iyi olmuştur [61].

Palmquist (2003), camı agrega yerine geri dönüştürülmüş malzeme türü olarak, kırılmış veya kırıştırılmış biçimde kullanılmıştır. Bu geri dönüştürülmüş malzeme, beton duvar bloklarında incelenmiş, işlenebilir, geçirgenlik ve kesme dayanımı dahil olmak üzere cam agrega ile beton üzerine, malzemenin yapıdaki uygunluğunu belirlemek için testler yapılmıştır. Cam agregalar, doğal agregalara kıyasla yüksek elastisite modülleri ile katıdır, ancak kırılmış camın pürüzsüz yassı yüzeyleri, cam ve çimento pastası arasındaki bağın zayıf olmasına neden oldukları, sonuç olarak, betonun cam agrega ile basınç dayanımı, doğal agrega betondan daha düşük olduğunu aktarmışlardır [62].

Basınç mukavemetini düşüren ve aşırı yanal genişmeye neden olan bir başka faktör, alkali ile camdaki reaktif silika arasındaki güçlü reaksiyondur. Ancak, cam agregalı beton elastisite modülü, doğal agregalı beton elastikiyet modülüne kıyasla, cam agreganın yüksek elastisite modülü nedeniyle daha yüksektir. Davorin (2009) bu deneysel çalışmasında genleştirilmiş cam içeren agregalarla hafif betonun (LWC) yapılması ve geri dönüştürülmesi konusuna dikkat çekilmiştir. Yoğunluk, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik gibi geri dönüşüm LWC'nin özellikleri araştırılmış ve hafif agregalardan mevcut normal beton ile karşılaştırılmıştır [63].

Lee vd. (2008), atık cam ve taş parçaları, vakumlu bir ortamda titreşimli sıkıştırma kullanarak yapay taş levhaların yapılması için hammadde olarak geri dönüştürülmüş, atık cam tozu (% 40) ve ince granit agregaları (% 60), bağlayıcı olarak doymamış polimer reçinelerle (% 8) karıştırılarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarında 14.7 MPa'lık sıkıştırma basıncı altında, 33.3 Hz'lik titreşim frekansı ve 50 mm Hg'de vakum koşulu, 148.8 MPa'lık yüksek sıkıştırma kuvvetine sahip yapay taş levhalar elde edilmiştir. Ayrıca % 0.02'nin altında su emme, 2.445'lik yoğunluk ve 51.1 MPa'lık eğilme dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. Bu çalışmada üretilen yapay taş levhalar, dayanıklılık ve su emme açısından doğal inşaat levhalarından daha üstündür [64].

Park vd. (2004), sanayileşme ve yaşam standardındaki hızlı iyileşme nedeniyle atık cam miktarlarının son yıllarda artış gösterdiğini bildirmiştir. Maalesef, atık camın çoğunluğu geri dönüştürülmek yerine, terk edilmekte ve bu nedenle doğal kaynakların israfı ve çevre kirliliği gibi bazı ciddi sorunların nedenidir.

Bu nedenlerden dolayı, bu çalışma, atık camların (kehribar, kehribar rengi, zümrüt yeşili, çakmaktaşı ve karışık cam gibi Kore'den kırılmış atık camlar) beton için ince agregalar olarak geri dönüşüm olasılıklarını analiz etmek için temel deneysel araştırmalarla yapılmıştır. Taze betonun test sonuçları, hem çökme hem de sıkıştırma faktörlerinin açılma şekli nedeniyle azaldığını ve atık bardaklarda bulunan çok sayıda küçük boyutlu parçacıkların katılımı nedeniyle hava içeriğinin arttığını göstermektedir.

Ek olarak, betonun basınç ve eğilme dayanımlarının, atık cam içeriği arttıkça azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, bu çalışmanın sonuçları, beton karışımında % 30'un altında kullanıldığında zümrüt yeşili atık camın% 10 SBR lateks kullanımı ile birlikte pratik olduğunu göstermektedir. Ek olarak,% 30'un altındaki atık camların içeriği, işlenebilirlik ve hava içeriği elde etmek için gerekli olan uygun bir karışımın hazırlanabileceğini ifade etmişlerdir [65].



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Bu bölümde, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (YFC), atık cam (GP), sodyum hidroksit (SH), sodyum silikat (SS), su ve deneysel çalışmada kullanılan kaba agrega ve ince agregalar gibi malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri açıklanmıştır.

##### 3.1.1. Öğütülmüş Granül Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

YFC, Türkiye'deki Ereğli Demir Çelik (Erdmir-Oyak Çimento) Fabrikasından sağlanmıştır. YFC'nin özgül ağırlığı 2,95 ve yaklaşık yüzey alanı 4989 cm<sup>2</sup>/g'dır. Fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.1'de sunulmuştur. Kullanılan öğütülmüş garüle yüksek fırın cürufunun (YFC), görünüşü Şekil 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. YFC'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal gereksinimi	Elde edilen sonuçlar (%)	EN 197-1 Standart limit değerleri	Test metodu
MgO	5,75	Max, 18	TS EN 196-2
S (sülfür)	0,54	Max, 2,0	TS EN 196-2
SO <sub>3</sub>	0,19	Max, 2,5	TS EN 196-2
Ateşleme kaybı	0,09	Max, 3,0	TS EN 196-2
CL	0,0185	Max, 0,1	TS EN 196-2
Nem	0,06	Max, 1,0	TS EN 15167-1 EK A
Na <sub>2</sub> O	0,056	-	TS EN 196-2
K <sub>2</sub> O	0,28	-	TS EN 196-2
Na <sub>2</sub> O Eşdeğeri	0,74	-	TS EN 196-2
Fiziksel gereksinimi			
Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2,95	-	TS EN 196-6
Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	4989	Min, 2750	TS EN 196-6
Mineralojik özellikleri (%)			
Cam içeriği	100,00	-	TS EN 196-2
LOI	0,09	Max, 3,0	TS EN 196-2



Şekil 3.1. Öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (YFC)

### 3.1.2. Agregalar

Geopolimer kompozitlerin üretilmesinde iki tip agrega kullanılmıştır. Bu agregalar;

- Kaba agrega: 5 mm elektüstü parçacıkları içeren agrega
- İnce agrega: 5 mm'lik eleklerden geçen agrega
- 0.075 mm'lik elek üzerinde kalan ince agrega .

Elek analizi ve agregaların (Şekil 3.2) fiziksel özellikleri ile elde edilen partikül büyüklüğü dağılımı Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Agregaların fiziksel özellikleri

Özellikler	İnce agrega
Özgül ağırlık	2,7-2,8
Su Emme oranı (%)	0,3-2,5%.
İncelik modülü	2 - 4



Şekil 3.2. Geopolimer üretiminde kullanılan agrega

### 3.1.3. Atık Cam (GP)

Bu çalışma kapsamında ihtiyaç duyulan atık cam (GP) sanayide işleme aşamasında kırılan veya kesimlerden arta kalan, kalınlıkları 5mm yi geçmeyen (Şekil 3.3) sadece pencere camları toplanmış ve mekanik kırma işlemiyle istenilen boyuta getirilerek kullanılmıştır. Camlar kullanılmadan önce geopolimer betonlardaki hassasiyet dikkate alınarak varsa yağ, toz gibi kirlerinden suyla yıkanarak temizlenmiş ve daha sonra 600 devir/sa dönme hızına sahip değirmende (Şekil 3.4) 120 dk. öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem sonucunda elde edilen camların kimyasal bileşimi Tablo 3.3 verilmiştir.



Şekil 3.3. Toplanan atık cam malzemeler



Şekil 3.4. Camların öğütülmesinde kullanılan bilyalı değirmen



Tablo 3.3. GP'nin kimyasal özellikleri

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

Tane büyüklüğünün ortalama çapı, yaklaşık 13 µm'dir ve Blaine özgül yüzey alanı 5320 cm<sup>2</sup>/g ve özgül ağırlığı 2.56 g/cm<sup>3</sup>'tür. Şekil 3.5'de bu deneysel çalışma boyunca kullanılan cam tozu parçacıklarını gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Cam tozu parçacıkları (13 µm)

#### 3.1.4. Alkali Aktivatörler

Kimyasal gösterimi NaOH olan ve sodyum hidroksit olarak bilinen bu bileşik, genellikle topaklar, granüller veya pullar şeklinde bulunan beyaz bir malzemedir [29]. NaOH, suda ve alkaliler ile yüksek çözünürlük seviyelerinden dolayı oldukça hızlı çözünen ve geopolimer karışımlarında sıklıkla kullanılan bir malzemedir. NaOH çözeltisinin hazırlanmasında NaOH topakları, hacimsel bir şişede su içinde çözülmüş ve kullanılan NaOH konsantrasyonu ile Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışımlarının kombinasyonu ile alkali aktivatör, diğer bileşiklerle karıştırılmadan 24 saat önce hazırlanmıştır [6]. NaOH çözeltisi topakların (Şekil 3.6) (küçük, yuvarlak, bir NaOH (SH) maddesinin sıkıştırılmış kütlesi) belirli hacimdeki su içinde çözülmesiyle hazırlanmıştır. Bu amaçla 640 gr NaOH 1 litre su içerisinde çözülmüş ve NaOH ilavesi,

geopolimerizasyon sürecini arttıran bir malzeme olduğu için 24 saat bekletilen çözelti karışımlarda kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Sodyum hidroksit peletleri

Bu çalışmada, bir alkalın aktivatörü olarak sodyum hidroksit (NaOH) ile karıştırılmış sodyum silikat (SS) ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) (Şekil 3.7) kullanılmıştır.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ; % 97 saflıkta toprak halinde NaOH ve  $\text{Na}_2\text{O}$ 'dan oluşan bir bileşik olup % 13  $\text{SiO}_2$  ve % 30  $\text{H}_2\text{O}$  içermektedir.



Şekil 3.7. Sodyum silikat çözeltisi

Molalite (m) eşitlik (3.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$m = n / v \quad (3.1)$$

Burada m, hesaplanacak olan çözeltinin molalitesidir, n, çözünen maddenin mol sayısıdır ve V litre cinsinden verilen çözeltinin hacmidir. Örneğin, karışım: suya 180 gram NaOH kabarcıklandırarak bir çözelti hazırlanır. Burada, çözeltinin hacmi 1 litredir. Çözeltinin molalitesi:

- Verilen, çözeltide 640 g kütle = 640 g

- NaOH'nin moleküler ağırlığı (1 mol): 40 g
- Mol sayısı = gram cinsinden kütle / molekül ağırlığı = 640/40 = 16 mol
- Hacim = 1 litre
- $m = n / v$  (1 kg çözücü) = 16 / 1 = 16 mol / litre = 16 molalite (m)

SS / SH'nin kütle oranları, Tablo 3.4'te aşağıdaki gibi sunulmaktadır:

Tablo 3.4. Karışımlarda kullanılan SS / SH çözeltisi oranları

Karışım no	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g)	NaOH (g)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH
1	120	180	0,67
2	150	150	1,0
3	180	120	1,5
4	120	180	0,67
5	150	150	1,0
6	180	120	1,5
7	120	180	0,67
8	150	150	1,0
9	180	120	1,5
10	120	180	0,67
11	150	150	1,0
12	180	120	1,5

### 3.1.5. Su

TS-EN 1008, (2003) standardına göre, bu çalışmada Kastmonu Üniversitesi kampüs sınırlarındaki şehir şebeke suyu karışımlar için kullanılmıştır.

### 3.2. Numunelerin Üretimi ve Kürü

Bu çalışma, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (YFC) ve cam tozu (GP) kombinasyonu ile hazırlanan GPM karışımlarının etkileri üzerine kapsamlı bir deneysel araştırma sunmaktadır. Bu amaçla GP/YFC oranı olarak 4 grup ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH (SS/SH) oranı olarak da 3 grup olmak üzere (Tablo 3.5) 12 adet beton karışımı (Tablo 3.6) tasarlanmıştır. Karışımlar için ince agrega, su, GP ve YFC kullanılmıştır.

Tablo 3.5. *Karışım tasarım parametreleri*

Değişken	Oran (%)
GP/ YFC	0 - 10 - 20 - 30
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH	0,67 - 1,0 - 1,5

### 3.2.1. Numune Üretim Süreci

TS-EN 196-1 ile uyumlu olarak ince agrega, kaba agrega, su, cam tozu (GP), öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC), Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve NaOH kullanılmıştır. Her bir karışım için su miktarı sabit tutulmuş olup, tasarım verileri Tablo 3.6'de verilmiştir.

Tablo 3.6. *Karışım tasarım verileri (kg / m<sup>3</sup>)*

Karışım no	GP / YFC	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> / NaOH	Na <sub>2</sub> S O <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	NaOH (kg/m <sup>3</sup> )	YFC (kg/m <sup>3</sup> )	FA (kg/m <sup>3</sup> )	Agrega (kg/m <sup>3</sup> )	GP (kg/m <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> O (kg/m <sup>3</sup> )
1		0.67	93,8	140,6					156,3
2	0	1.0	117,2	117,2	625,0			0,0	156,3
3		1.5	140,6	93,8					156,3
4		0.67	93,8	140,6					156,3
5	10	1.0	117,2	117,2	562,5			62,5	156,3
6		1.5	140,6	93,8					156,3
7		0.67	93,8	140,6		625,0	546,9		156,3
8	20	1.0	117,2	117,2	500,0			125,0	156,3
9		1.5	140,6	93,8					156,3
10		0.67	93,8	140,6					156,3
11	30	1.0	117,2	117,2	437,5			187,5	156,3
12		1.5	140,6	93,8					156,3

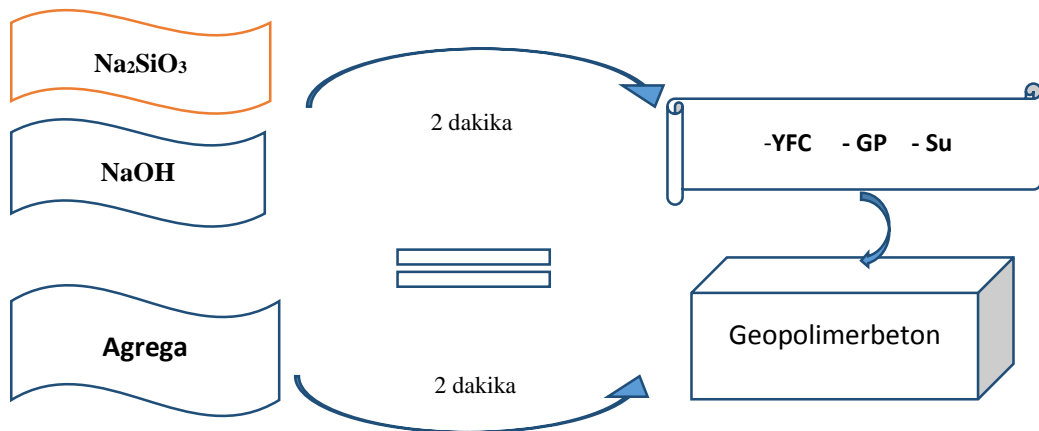
### 3.2.3. Numune Dökümü ve Kürü

Karışımlar, Tablo 3.5 ve Tablo 3.6'da verilen oranlarda göre hazırlanmıştır. Karışımların hazırlanmasında hassas terazide gerekli miktarlar tartılmış ve Şekil 3.8'de gösterilen Hobart karıştırıcısına önce kuru malzemelerin karıştırılması sonra alkilerin karışıma ilave edilerek toplam 6 dakika olmak üzere tüm gruplarda standart bir karıştırma süresi uygulanarak hazırlanmıştır.



Şekil 3.8. Hobart karıştırıcı

Geopolimer üretiminde, karışım sırası ve süresi (Şekil 3.9), tüm karışımlarda aynı homojenliği ve aynı yapıyı sağlamak için çok önemlidir. Bu hazırlık süresini sırasıyla kuru harmanlama karışımı, ince ve kaba agregaların iki dakika boyunca homojenleştirilmesinden ibarettir. İkinci olarak, homojen bir karışım elde etmek için YFC ile GP iki dakika sonra karışıma ilave edilmiştir. Üçüncü adımda, alkali aktivatörleri (SH, SS) hazırlanan bu karışıma ilave edilerek ve iki dakikalık ikinci karıştırma süreci gerçekleştirilmiştir. Son aşamada karışıma ek su ilavesi yapılarak karışım toplam 6 dakikaya tamamlanmıştır. Hazırlanan karışımların yayılma çapı değerleri belirlenerek, TS EN 196-1'e uygun 40mm x 40mm x 160mm boyutlarındaki kalıplara (Şekil 3.9, Şekil 3.10) doldurulmuştur. Son olarak, numuneler kalıptan 24 saat sonra çıkartılmış ve bu sürede kalıplar üzerleri cam plakalar ile kapatılmıştır. Kalıplardan çıkarılan numuneler ideal kür şartları ön denemeler ile belirlenen 24 saat 70 ° C'de etüvde ve sonra örnekler 30 ± 3 ° C'de % 70 nem koşullarına sahip kür odasında test tarihlerine kadar bekletilmişlerdir.



Şekil 3.9. Çalışmanın karıştırma prosedürü



Şekil 3.10. Beton döküm ve buhar küri

### 3.3. Geopolimer Kompozitler Üzerinde Yapılan Deneyler

#### 3.3.1. Yayılma Tablası Deneyi

Yayılma tablası deneyi, engellerin olmadığı durumlarda betonun yatay serbest akışını değerlendirmek için kullanılır. Test yöntemi, çöküşün belirlenmesi için yapılan test yöntemine dayanmaktadır ve bu deneyde beton dairenin çapı betonun dolum kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Bu deneyde kullanılan aparat (Şekil 3.11) aşağıdaki şekilde gösterilmiştir:



Şekil 3.11. Yayılma tablası deneyi

- Tabanda 200 mm, tepesinde 100 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde iç ölçülere sahip kesik bir koni şeklinde kalıp.
- Çökmeyen koninin merkezi konumunu belirleyen bir daire ile işaretlenmiş en az 700 mm kare sert emici olmayan taban plakası ve 500 mm çapında bir başka eşmerkezli daire.
- Mala
- Kürek
- Cetvel

- Kronometre (isteğe bağlı)

Harcın müteakip çapı iki dikey boyutta ölçülür ve ortalama son çap olarak rapor edilir. Son olarak, göreceli çökme aşağıdaki prosedürle hesaplanır;

- Çemberin yayılma çapının belirlenmesi
- Betonun iki dik yönde son çapları ölçülmesi
- Ölçülen iki çap ortalamasının alınması şeklindedir.

### 3.3.2. Yoğunluk Testi

Beton numunelerin yoğunluğu ASTM C642-97 'ye göre belirlenmiştir [63]. Yoğunluk, en az 24 saat etüvde  $105\pm5$  °C'de değişmez ağırlığa ulaştığı tespit edilen numunelerin ilk ve son ağırlıklarının ölçülmesi ile eşitlik (3.2), (3.3) ve (3.4) kullanılarak belirlenmiştir.

$$\text{Görünür yoğunluk (g /cm}^3\text{)} = (A / (A-D)) P \quad (3.2)$$

$$\text{Daldırma işleminden sonra kütle yoğunluğu} = (B / (C-D)) P \quad (3.3)$$

$$\text{Kütle yoğunluğu, kuru (g /cm}^3\text{)} = (A / (C-D)) P \quad (3.4)$$

Eşitlikte;

A = Etüv kuru ağırlığı, g

B = Doygun yüzey numune ağırlığı, g

C = Kaynatılan numune ağırlığı, g

D = Su içindeki numune ağırlığı, g

P = su yoğunluğu =  $1 \text{ Mg / m}^3 = 1 \text{ g / cm}^3$ .

### 3.3.3. Boşluk Oranı ve Su Emme Oranı Tayini

Betonun boşluk oranı su, hava, asit ve bazın içinden geçebileceği küçük deliklerle dolu bir yapı anlamına gelir. Boşluk oranı, bir malzemedeki tüm gözeneklerin hacminin dökme malzemenin hacmine oranı olarak tanımlanabilir. Betonda bulunan gözenekler, karışımların kalıba yerleştirilmeleri sırasında yetersiz sıkıştırma sonucu meydana gelir. En önemli özellik olan betonun dayanımı da bu boşluklardan etkilenebilir. Kür

süresini tamamlayan numunelerin boşluk oranları ve su emme miktarları deneyleri ASTM C642/97 ve TS EN 12390-7'ye göre belirlenmiştir. Numuneler, etüvde 100±5 ° C'de 24 saat boyunca kuru ağırlığı belirlenmekte, daha sonra numuneler içi su dolu kaptaki 24 saat bekletilerek doygun hale gelmesi sağlanmıştır. Ayrıca numuneler su içerisinde kaynatılarak soğuması beklenilmiş ve arşimet yöntemiyle su içerisindeki ağırlıkları belirlenmiştir. Numunelerin boşluk oranları ve su emme oranlarının ölçülmesinde ise eşitlik (3.5) ve (3.6) kullanılmıştır:

$$\text{Ağırlıkça su emme oranı} = ((B-A) / A) * 100 \% \quad (3.5)$$

$$\text{Görünür boşluk oranı} = ((C-A) / (C- D)) * 100 \% \quad (3.6)$$

Eşitlikte;

A = Etüv kurusu ağırlığı, g

B = Doygun yüzey numune ağırlığı, g

C = Kaynatılan numune ağırlığı, g

D = Su içindeki numune ağırlığı, g

### 3.3.4. Basınç Dayanımı Testi

Beton küp testinin basınç dayanımı, betonun tüm özellikleri hakkında fikir verir. Bu tek testte, bir betonlamanın uygun şekilde yapılıp yapılmadığına karar verilir. Taşıyıcı betonun basınç dayanımı, ticari ve endüstriyel yapılarda 15 MPa (2200 psi) ile 30 MPa (4400 psi) arasında değişmektedir. Amerikan Test Malzemeleri Birliği ASTM C39 / C39M, beton örneklerinin basınç dayanımı için standart test yöntemi sunmaktadır. Geopolimer betonlarda basınç dayanımını belirlemek için hazırlanan örnekler 3, 7 ve 28 günlük kürelerini tamamlamasından sonra, Şekil 3.12'te gösterildiği gibi basınç dayanımı test cihazı ile deney gerçekleştirilmiştir. Örnekler taşıma gücünü kaybedesiye kadar yavaş yavaş yükleme yapılmalıdır. Kırılma anındaki yük belirlenerek TS EN 1015-11 nolu standarta uygun olarak geopolimer betonlardaki basınç dayanımı eşitlik (3.7) kullanılarak belirlenmiştir

$$\sigma = P/A \quad (3.7)$$



Eşitlikte;

P: Uygulanan kuvvet (kN)

A: Kesit alanı (mm<sup>2</sup>)

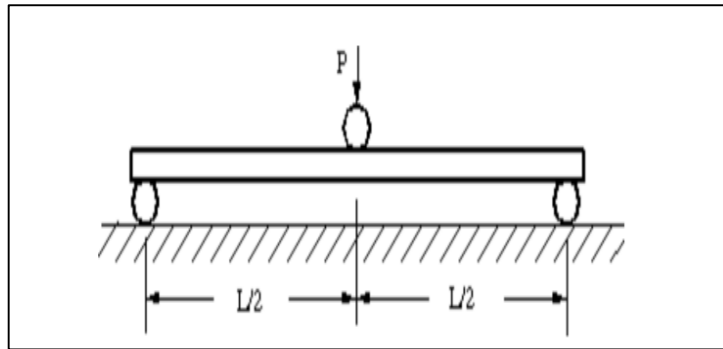
$\sigma$ : Basınç dayanımı



Şekil 3.12. Geopolimer beton basınç dayanım testi

### 3.3.5. Eğilmede Dayanımı Testi

İki metal kenarı arasında yükleme yapıldığında geopolimerin hangi yükü vereceğini belirlemek için üç nokta eğilme dayanımı testi (Şekil 3.13; Şekil 3.14) kullanılmıştır. Eğilme dayanımı sonuçları, eğilme yüküne maruz kalan film ve tabaka ürünlerinin tasarımcıları için veya uygulanan kırma yüklerinin riskli olduğu uygulamalarda önemlidir. Eğilme dayanımlarının belirlenmesinde TS EN 1015-11 nolu standarta uygun olarak 3, 7 ve 28 günlük kürlerini tamamlayan 40mm x 40mm x 160mm boyutlarındaki numuneler üzerinde aşağıdaki eşitlik (3.8) yardımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 3.13. Üç nokta eğilme dayanımı deneyi



Şekil 3.14. Eğilme dayanımı test cihazı

$$\sigma = 1.5 PL/bd^2 \quad (3.8)$$

Eşitlikte;

P: Uygulanan kuvvet (kN)

L: Destek silindirleri arası mesafe (100mm)

b: Numune kesitinin dar kenar uzunluğu (40mm)

d: Numune kesitinin yüksekliği (40mm)

$\sigma$ : Eğilme dayanımı (MPa)

### 3.3.6. Ultrases Ses Geçiş Hızı (U.P.V)

Ultrases geçiş hızları (UPV) (Şekil 3.15) boyu bilinen numunlerden gönderien ses dalgasının numuneden geçiş hızını ölçen ve yol/zaman formülü ile belirlenen bir deneydir.



Şekil 3.15. Geopolimerlerde ultrases geçiş hızı ölçümü

### 3.3.7. Yüksek Sıcaklık Etkisi

Betonun yangın anında kalacağı yüksek sıcaklıklardaki davranışsal performansı, betonun yapısal bütünlüğünü koruyacak, yangına dayanıklılıktan ödün vermeyecek ve ısı saldırısından kusursuz koruma sağlayacak şekilde olması gerekir. Bu betonu yangına karşı güvenilir bir malzeme yapar. Yapısal malzemelerin ve montajların yangın derecesi, genel olarak testler ve temel birimler olarak ölçüm değerlerini belirlemektedir. Amerika Birleşik Devletleri, bu tür testlerin sık sık ASTM E2748-12a (2017)'ye uygun olarak yapıldığını, “Yangına Karşı Standart Test Yöntemleri” ve “Yangına dayanıklılık testleri” gibi yapı elemanlarının yangın nedeniyle ayrışma özelliklerine yönelik performansını değerlendirmeyi amaçlamakta ve binalar için düzenlenmiş kullanımları da genellikle yangın dayanımı olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışma kapsamında bir ev yangının çıkabileceği en yüksek sıcaklık değeri (850 °C) dikkate alınarak maksimum 1200 °C olacak şekilde 4 farklı sıcaklığa (300 °C, 600°C, 900°C ve 1200°C) numuneler 1 saat süreyle maruz bırakılmışlar ve ani dayanım kayıplarına mani olmak için oda sıcaklığında yavaş bir soğumaya bırakılmışlardır. Bu süreç sonunda numunelerin basınç dayanımları belirlenmiş ve 28 günlük numune değerleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.16. Yüksek sıcaklık etkisi deneyi

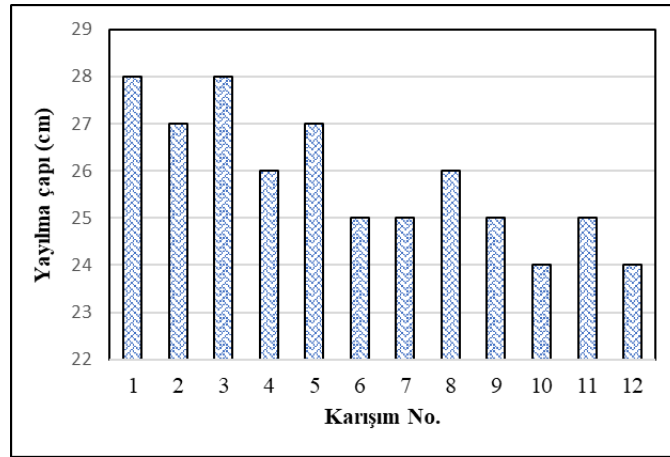
## 4. TARTIŞMA VE BULGULAR

### 4.1. Yayılma Tablası Deney Sonuçları

Geopolimer betonun özelliklerini ölçmek için çeşitli test prosedürleri başarıyla uygulanmıştır. Geleneksel olarak kullanan yayılma tablası deneyi, en yaygın olan testtir. Geopolimerbeton harcı kalıba tamamen doldurulur, koni kaldırılır ve 25 düşüşten sonraki betonun yayılma çapı ölçülür. Bu deney sonucunda numulerdeki yayılma çapı 24 ila 28 cm arasında değiştiği görülmüştür. YFC ve GP ilavesiyle yayılma çapının azaldığı belirlenmiştir (Tablo 4.1; Şekil 4.1).

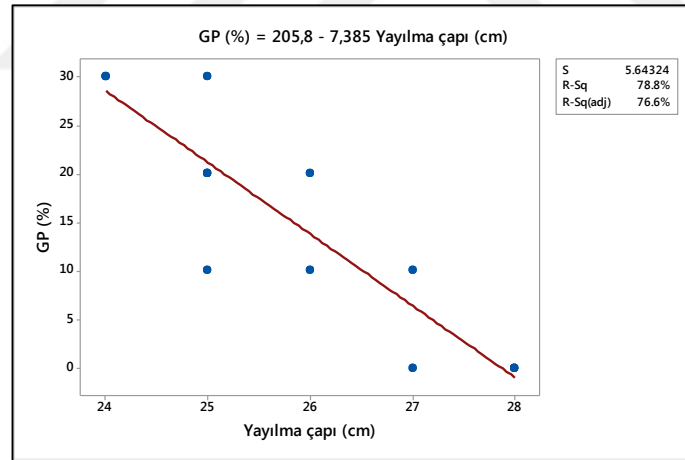
Tablo 4.1. *Yayılma çapı sonuçları*

Karışım No	Yayılma Çapı (cm)
1	28
2	27
3	28
4	26
5	27
6	25
7	25
8	26
9	25
10	24
11	25
12	24



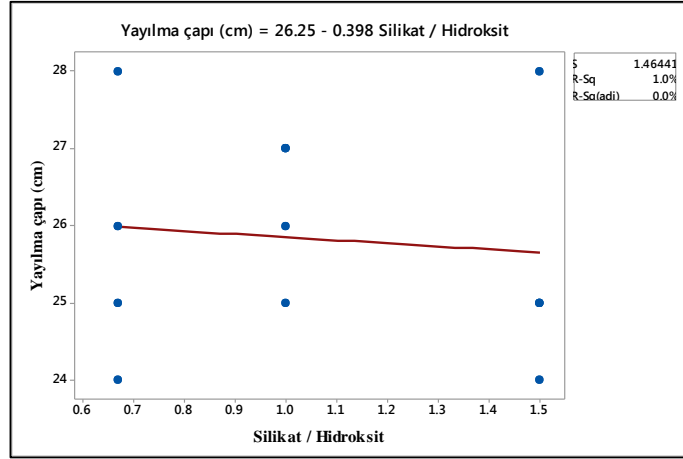
Şekil 4.1. Yayılma çapındaki değişimler

Bu çalışmada, GP oranının değiştirilmesi nedeniyle yayılma çapının azaldığı, en küçük yayılma çapı değerinin 10 numaralı karışıma ait olup %30 GP'unda 0,67 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranında elde edilmiştir. Yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, GP kullanılmasının betonun işlenebilirliği üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını, ancak yayılma çapı, hava içeriği ve taze birim hacim ağırlık değerlerini yüksek oranda kullanımına rağmen düşürdüğü görülmüştür [66-67]. Shayan vd. (2004), işlenebilirliğin kullanılan orandaki değişimdeki bir artışla yayılma çapını azaldığını ifade etmişlerdir. [68], Bu, GP'nin yüzey alanındaki ve cam parçacıkların açılmal şeklindeki artıştan kaynaklanabileceği de bir başka çalışmada ifade edilmiştir [69]. Khatib vd. (2012) GP'nin karışımının işlenebilirliği üzerindeki etkisini incelemiş ve sonuçlar, karışımdaki cam tozu içeriği arttıkça çökmede sistematik bir azalış olduğunu ortaya koymuştur [70]. Bu sonuçlardaki ifade edilen duruma benzerlik gösteren geopolimer beton numunelerine ait sonuçlar Tablo 4.1 ve Şekil 4.1'de de değişimi verilmiştir. GP eklenmeden maksimum yayılma çapı değeri 28 cm olarak ölçülürken, eklenmeden en küçük değer 24 cm olarak belirlenmiştir.



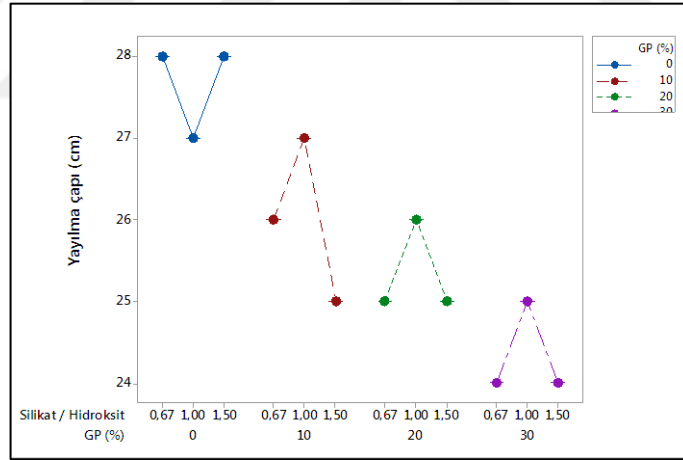
Şekil 4.2. Geopolimerlerin yayılma çapı ve GP oranı arasındaki ilişki

Geopolimerlerin yayılma çapı ve GP yüzdesi arasındaki ilişki incelendiğinde (Şekil 4.2), kullanılan GP miktarındaki azalmanın, yayılma çapındaki artış olduğu, diğer bir ifade ile beton akışını arttırdığı görülmüştür. Düşük yayılma çapı değeri % 30 GP kullanımlarında gerçekleşmiştir. Cam tozu (GP) ile yayılma çapı (YÇ) arasında  $GP = 205,8 - 7,385 YÇ$  olan ve  $R^2 = \% 78,8$ 'lik ilişki olması sonucunda GP'nun yayılma çapı üzerinde olumsuz etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.3. Geopolimerlerin yayılma çapı ile SS/SH oranları arasındaki ilişki

Geopolimerlerin yayılma çapı ile SS/SH oranları arasındaki ilişki değerlendirilmiş ve değişim Şekil 4.3'de verilmiştir. SS/SH oranları arttığında, istatistiksel açıdan yayılma çapına ait elde edilen ortalama değerlerinin genel olarak küçük bir oranda azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 4.4. Geopolimerlerin yayılma çapı ile SS/SH oranları ile GP arasındaki ilişki

Yayılma çapının GP oranına bağlı azalma eğiliminde olduğu ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  (SS/SH) 0.67 olduğunda ise, çapın 26 cm 1.5 olduğu zaman, yayılma çapının 25.8 cm değerlerine ulaştığı görülmüştür. Ancak artan alkali oranına rağmen eşit oranda  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (SS) ve NaOH (SH) kullanıldığında yayılma çapında ki gruplar arası değişimin diğer gruplardaki değişime göre daha az olan bir yayılmaya neden olduğu belirlenmiştir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  (SS/SH) ile yayılma çapı (YÇ) arasında  $YÇ = 26,25 -$

0,398 SS/SH olan ve  $R^2 = 0,1$  'lik düşük bir ilişkisi olması SS/SH'nin yayılma çapı üzerinde çok az bir etkisinin olduğunu da istatistiksel açıdan göstermiştir.

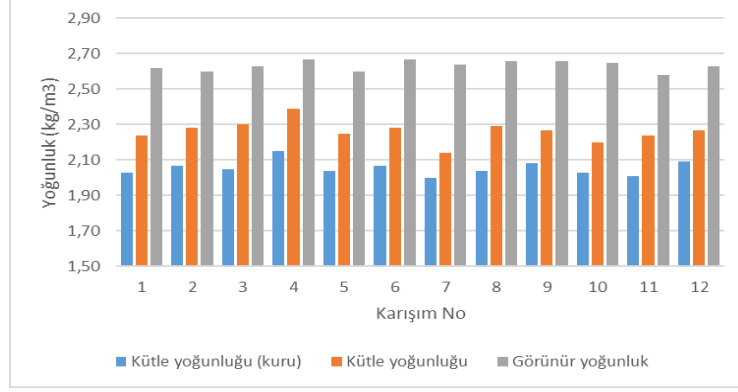
Şekil 4.4 incelendiğinde ise, en yüksek yayılma çapı değerlerinin % 0 GP kullanılan ve 0.67 ile 1.5 SS/SH oranlarına sahip gruplarda yaklaşık 28 cm olduğu, ancak bu SS/SH oranının 1.0 olmasında ise yayılma çapının yaklaşık 27 cm düştüğü belirlenmiştir. Ayrıca %10, %20 ve %30 cam tozu (GP) kullanılmasında ki durumlar incelendiğinde SS/SH oranının 1,0 olması durumunda %0 cam tozundan farklı olarak, gruplar içi en yüksek değerlerin elde edildiği görülmüştür. Bu durum SS/SH oranlarının etkisi ile artan GP'da yayılma çapları arasında bir ilişkinin olduğunu göstermiştir.

#### 4.2. Yoğunluk Test Sonuçları

Beton numunelerin yoğunluğu ASTM C642-97'ye göre belirlenmiş [63] ve sonuçlar Tablo 4.2'de ve değişimler Şekil 4.5'te verilmiştir.

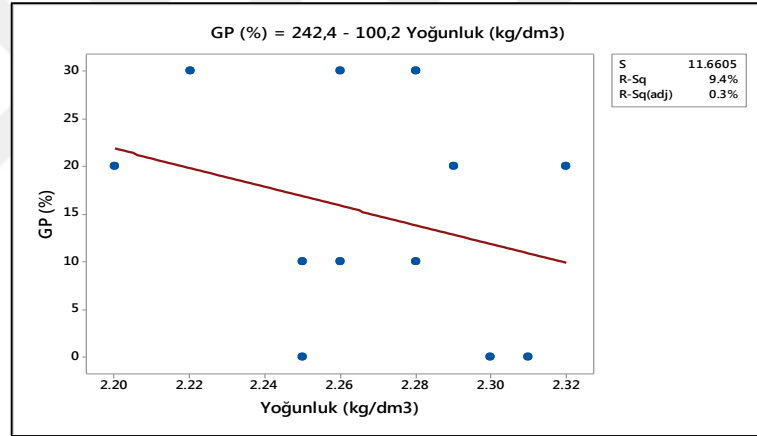
Tablo 4.2. Geopolimer betonların yoğunluğu ( $kg/dm^3$ )

Karışım	Görünür yoğunluk	Kütle yoğunluğu (kuru)	Kütle yoğunluğu
1	2,62	2,03	2,24
2	2,60	2,07	2,28
3	2,63	2,05	2,30
4	2,67	2,15	2,39
5	2,60	2,04	2,25
6	2,67	2,07	2,28
7	2,64	2,00	2,14
8	2,66	2,04	2,29
9	2,66	2,08	2,27
10	2,65	2,03	2,20
11	2,58	2,01	2,24
12	2,63	2,09	2,27

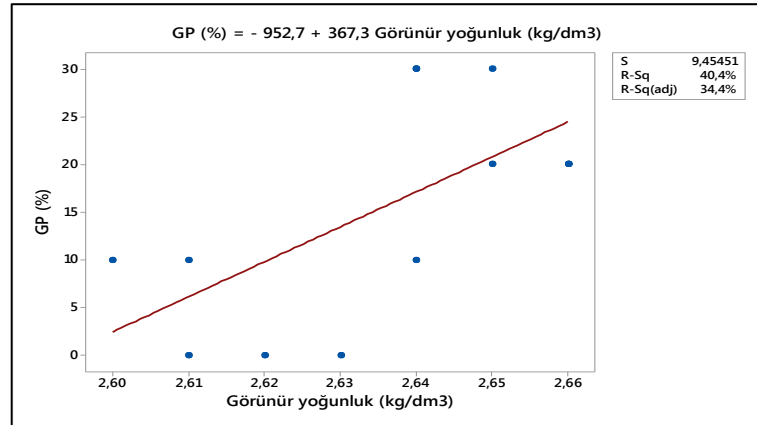


Şekil 4.5. Geopolimerin yoğunluk değişimleri

Bu çalışmadaki sonuçlara göre, görünür yoğunluk, kuru kütle yoğunluk ve kütle yoğunluğun farklı GP değerleri eklenmesinde değişken olmasına rağmen yoğunluklarda artışa neden olduğu söylenebilir.



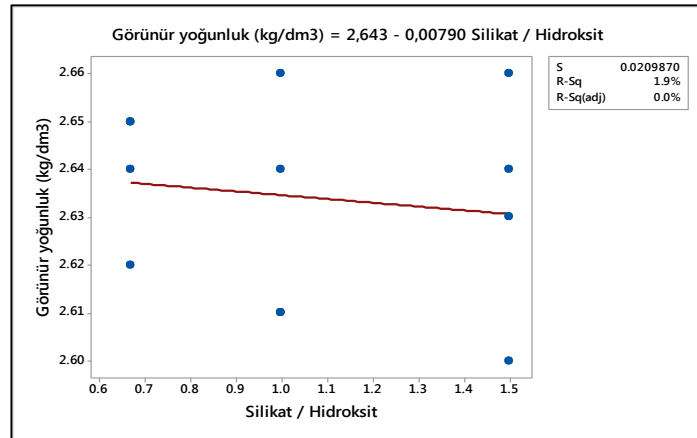
Şekil 4.6. Geopolimerlerin GP oranı ile kütle yoğunluğu arasındaki ilişki



Şekil 4.7. Geopolimerin GP oranı ile görünür yoğunluk arasındaki ilişki 23

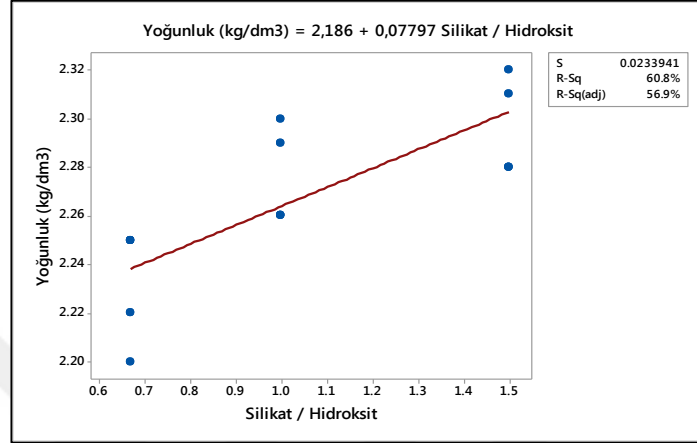


Bu çalışma kapsamında hazırlanan geopolimer betonların yoğunluklarında (Şekil 4.6, Şekil 4.7) artan GP oranına paralel olarak kütle yoğunluğunda değişim oranı fazla olsada istatistiksel açıdan düşük bir ilişkiye sahip olduğu ve genel anlamda kütle yoğunluğunda azalmaya neden olduğu görülmüştür. Görünür kütle yoğunluğu (GKY) ile GP arasında ise bu değişim  $GP = -952,7 + 367,3GKY$  olan  $R^2 = \% 40,4$  ile daha yüksek ilişkili olduğu hesaplanmıştır. Görünür yoğunluğun en iyi değeri GP'nin % 10 olarak kullanılması durumunda  $2.66 \text{ kg / m}^3$  olarak ölçülmüştür. Cam tozunun (GP) özellikleri nedeniyle görünür yoğunluğu üzerinde bir etkisi olduğu söylenebilir. Bu durum YFC nin azaltılarak GP ilavesinde özgül ağırlıkları arasındaki farktan ve oluşturduğu gözenek yapısı ile açıklanabileceği sonucuna varılmıştır. Geopolimerlerde kullanılan GP ile diğer çalışmalar karşılaştırıldığında geopolimerler ile ilgili net bir ifade olmaması nedeniyle, öğütülmüş atık camlı ve camsız sertleştirilmiş betonlar için yapılan bir çalışmada kütle yoğunluğu (kuru), yoğunluk testleri karşılaştırılmıştır. Öğütülmüş atık cam ile kısmi çimento değişiminin, kütle yoğunluğunda (kuru) ve dolayısıyla betonun kütle yoğunluğunda bir artış sağladığı aktarılmıştır. Bu, betonda öğütülmüş GP oranının puzolanik reaksiyonu ile C-S-H oluşumunda C-S-H'ye dönüşümüne bağlı olarak ortaya çıkabileceği, sonuçta ortaya çıkan C-S-H'nin görünür yoğunluğunun, C-H'ninkinden biraz daha yüksek olması ile açıklanabileceği bildirilmiştir [71]. Bu sonuçlar ile geopolimer betonlardaki benzer yapı oluşumu nedeniyle elde edilen değişim benzer değişimde olduğu düşünülmektedir.



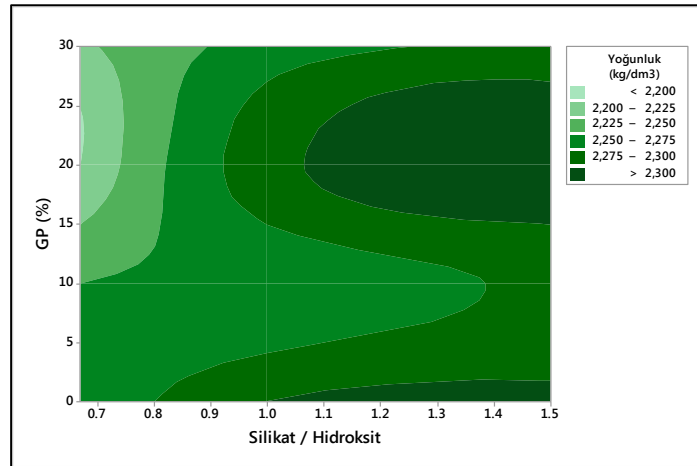
Şekil 4.8. Geopolimerin görünür yoğunluğu ile SS/ SH oranı arasındaki ilişki

Geopolimerlerin görünür yoğunluğu ile SS/SH arasındaki ilişki incelendiğinde (Şekil 4.8) SS/SH oranı arttığında, yoğunlukta bir azalışa neden olduğu belirlenmiştir. Görünür yoğunluk (GY) ile SS/SH oranı arasında  $GY=2,643+0,00790.(SS/SH)$  olan  $R^2=\% 1,9$  değeri ile düşük bir regresyon ilişkisi olduğu da hesaplanmıştır.

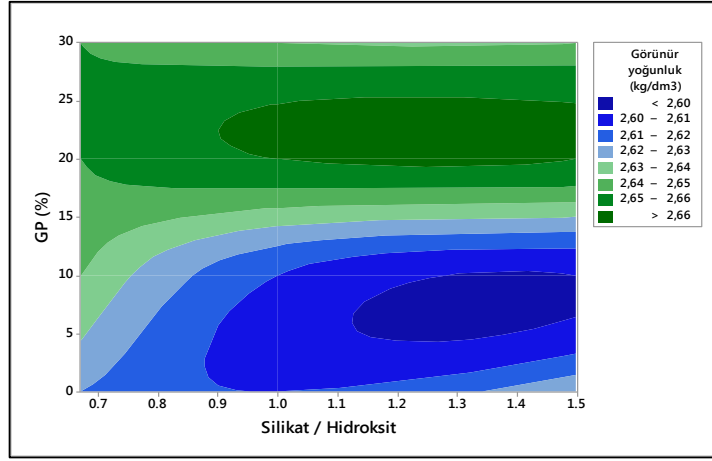


Şekil 4.9. Geopolimerlerin kütle yoğunluğu ile SS/SH oranı arasındaki ilişki

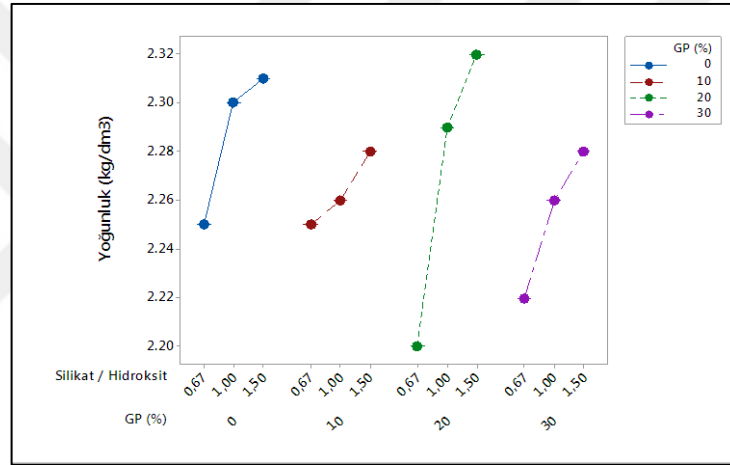
Şekil 4.9 incelendiğinde, GP'nin özellikleri nedeniyle kütle yoğunluğu üzerinde olumlu bir etkisi olduğu söylenebilir. Bu durumda ise kütle yoğunluğu (KY) ile SS/SH arasında  $KY=2,186 + 0,047797.(SS/SH)$  olan  $R^2=\% 60.8$  ile istatistiksel açıdan yeterli bir regresyon ilişkisi olduğu da hesaplanmıştır.



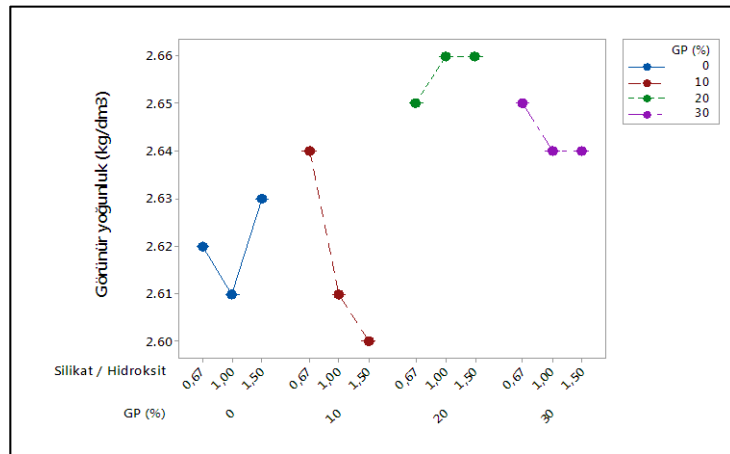
Şekil 4.10. SS / SH ve GP katkıların kütle yoğunluğuna etkisi



Şekil 4.11. SS / SH ve GP katkıların görünür yoğunluğa etkisi



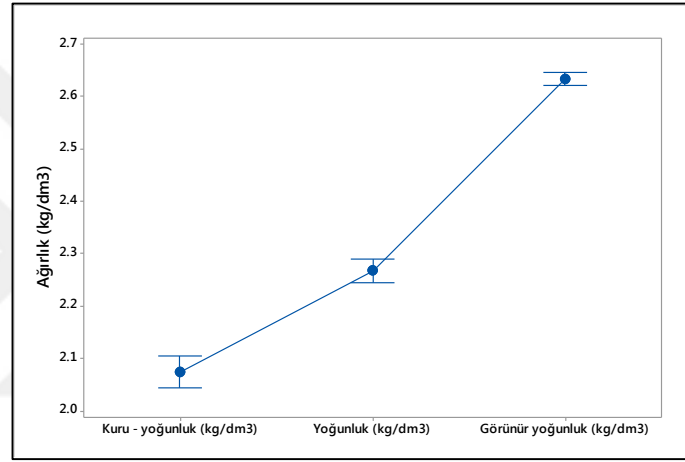
Şekil 4.12. SS/SH ve GP oranının yoğunluğa etkisi



Şekil 4.13. SS/SH ve GP oranının görünür yoğunluğa etkisi

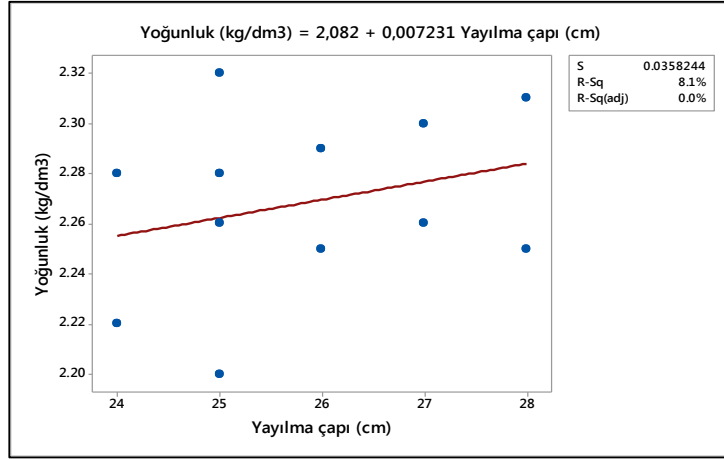
Geopolimerlerin kütle yoğunluğu (Şekil 4.10; Şekil.12) ve görünür yoğunlukların (Şekil 4.11; Şekil 4.13) genel değişimlerinin tahmin edilmesi aşamasında yardımcı

olacak kontuar grafikler incelendiğinde; kütle yoğunluğu için 0,67 SS/SH oranı ve % 20-25 arasındaki GP kullanımı sonucu gerçekleştirilebileceği, en yüksek kütle yoğunluğu için 1,5 SS/SH oranı kullanılmasında değişen oranlarda GP kullanılmasında durumunda elde edilebileceği belirlenmiştir. Görünür yoğunluğun değişiminde ise bu durum değişen oranlarda kullanılacak SS/SH için GP kullanımının etkili olacağı ve %15-25 arasında kullanılmasında bu değerlere ulaşılmasının mümkün olduğu görülmüştür. Ancak yoğunluklar arasındaki değişimin az olması, muhtemel malzeme yapısı veya geopolimer üretimindeki değişimleri de etkileyebilmesi nedeniyle görünür yoğunluklar açısından net bir değişim açıklanamamıştır.



Şekil 4.14. Yoğunluklar arasındaki ilişki

Şekil 4.14 incelendiğinde istatistiksel ortalamalar açısından kuru kütle yoğunluğunun 2,0 – 2,1 kg/dm<sup>3</sup> değerler arasında elde edildiği, sırasıyla kütle yoğunluğu ve görünür yoğunluk değerlerinin de 2,2-2,3 kg/dm<sup>3</sup> ve 2,6-2,7 kg/dm<sup>3</sup> arasında olmak üzere kuru yoğunluktan yaklaşık % 30 oranında daha yüksek görünür yoğunluk değerleri elde edildiği belirlenmiştir.

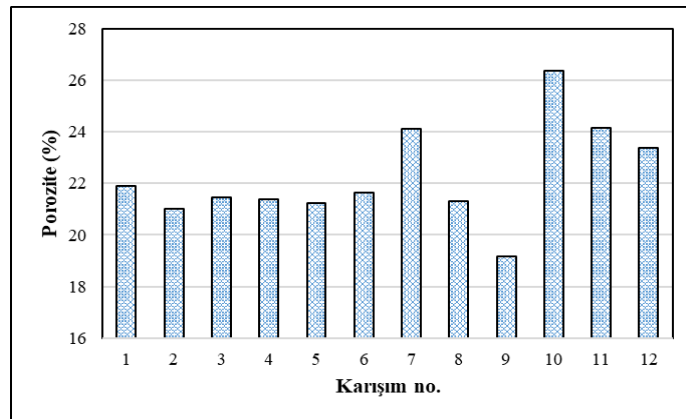


Şekil 4.15. Kütle yoğunluğu ile yayılma çapı arasındaki ilişki

Kütle yoğunluğu değerleri ile yayılma çapları arasındaki ilişki incelendiğinde (Şekil 4.15) kütle yoğunluğundaki yaklaşık %5,5 lik değişime karşılık yayılma çapına %15 lik bir değişim gerçekleşmiştir ve bu ilişki arasında yüksek bir ilişki olmadığı görülmüştür. Ancak kütle yoğunluğu (KY) ile su emme oranı (SE) arasında  $KY=2,082 + 0,007231SE$  olan  $R^2=\% 8,1$  ile düşük bir ilişkisi olduğu hesaplanmıştır.

### 4.3. Porozite Test Sonuçları

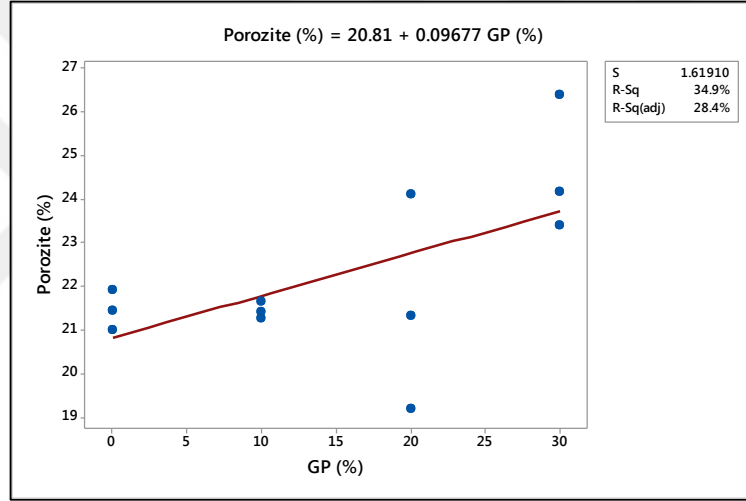
Porozite, gözeneklerle dolu ve genellikle yüzde olarak ifade edilen betonun toplam hacminin oranını tanımlamak için kullanılır. Geçirgen olduğunu bilinen bir betonda porozite önemli bir faktördür. Geopolimer betonun 12 karışımı için porozite sonuçları Şekil 4.16 ve Tablo 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.16. Geopolimer betonlarda porozitedeki değişim

Tablo 4.3. Geopolimerlerin porozite değerleri

Karışım no.	Porozite (%)
1	21.91
2	21,00
3	21.44
4	21.39
5	21.24
6	21.64
7	24.11
8	21.31
9	19.17
10	26.38
11	24.15
12	23.39



Şekil 4.17. Geopolimer betonlarda GP ile porozite arasındaki değişim

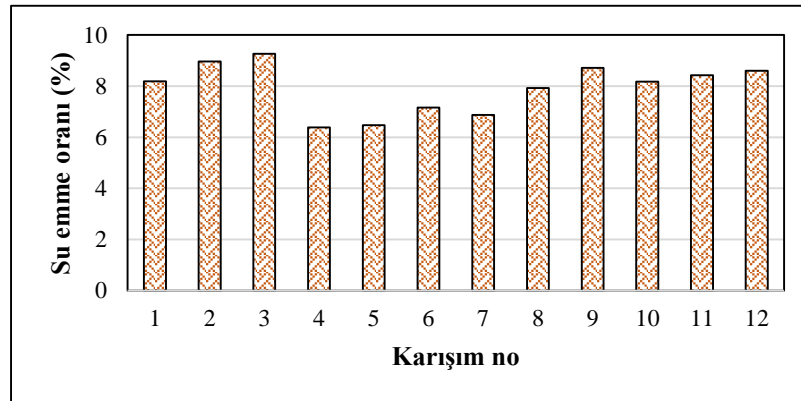
Tablo 4.3 ve Şekil 4.16, Şekil 4.17 incelendiğinde porozite (P) ile cam tozu (GP) arasında  $P = 20,81 + 0,0967 GP$  ilişkisi olan  $R^2 = \%34,9$  ile ifade edilebilecek istatistiksel açıdan düşük bir ilişki söz konusudur. Ancak GP oranındaki artışın porozitedeki artışa neden olduğu da görülmektedir. Bu durum artan cam tozu oranı ile oluşan boşluk yapısından kaynaklanmaktadır. Ayrıca cam tozunun artan oranlarında (%20 ve %30) artan silikat miktarına göre porozitede azalma daha belirgin bir şekilde gerçekleşmiştir.

#### 4.4. Su Emme Oranı Test Sonuçları

Su emme oranı test sonuçları (Tablo 4.4) incelendiğinde, %20 oranına kadar artan GP oranının geopolimerlerin porozitesindeki değişime paralel bir değişime neden olduğu ve kontrol betonundan daha az su emme oranına yol açtığını göstermektedir. Bu durum Soroushian (2012) yılında yapmış olduğu geri dönüştürülmüş agregalar ile cam içeren betonlarından elde edilen sonuçlar ile benzer etkisi olduğu görülmüştür [71]. En yüksek su emme oranı, %0 GP ve SS/SH oranı 1,5 olan 3 numaralı karışımda % 9,27 olarak gerçekleşmişken, en düşük değer ise %10 GP ve SS/SH oranı 0,67 olan 4 numaralı karışımda 6,38 olarak gerçekleşmiştir. GP'nin, betonun su emme oranına etkisi olduğu söylenebilir.

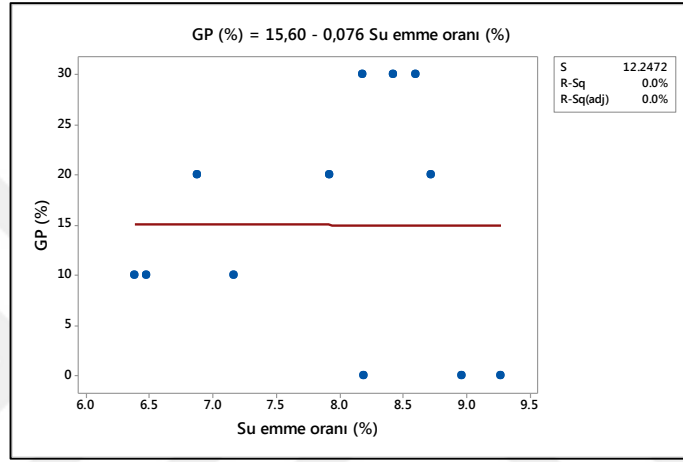
Tablo 4.4. Su emme oranlarındaki % değişim değerleri

Karışım	Su emme oranı (%)
1	8.19
2	8.96
3	9.27
4	6.38
5	6.47
6	7.16
7	6.87
8	7.92
9	8.72
10	8.18
11	8.42
12	8.60

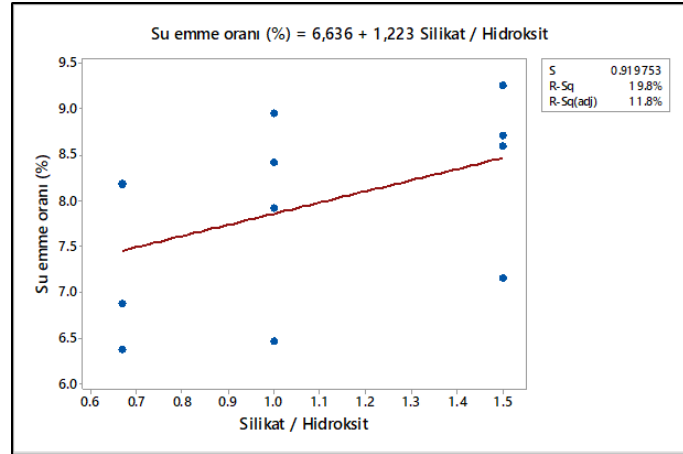


Şekil 4.18. Su emme oranlarındaki genel değişim

Sonuçlar incelendiğinde (Tablo 4.4 ve Şekil 4.18) GP oranı arttığında, istatistiksel açıdan su emme oranında bir azalmanın olduğu görülmüştür. Şekil 4.19'da incelendiğinde cam tozu (GP) ile su emme oranı (SEO) arasında  $GP = 15,60 - 0,076 SEO$  ilişkisi olmasına rağmen, istatistiksel açıdan anlamlı bir regresyonel ilişkinin olmadığı da belirlenmiştir. Bu durum gruplar arasındaki artan GP oranı ile orantılı bir artış veya azalış olmaması ve bu değişimin ise değişken parametrelere bağlı olarak genel bir su emme oranındaki değişen miktardaki azalmadan meydana gelmiştir.



Şekil 4.19. GP ve su emme oranı arasındaki ilişki

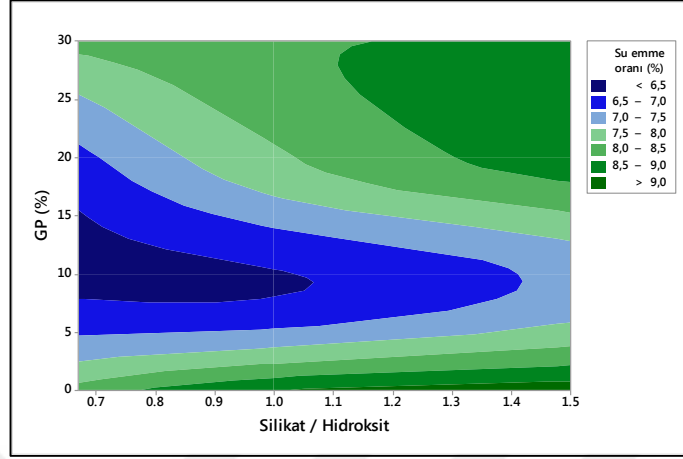


Şekil 4.20. Su emme oranı ile SS / SH oranı arasındaki ilişki

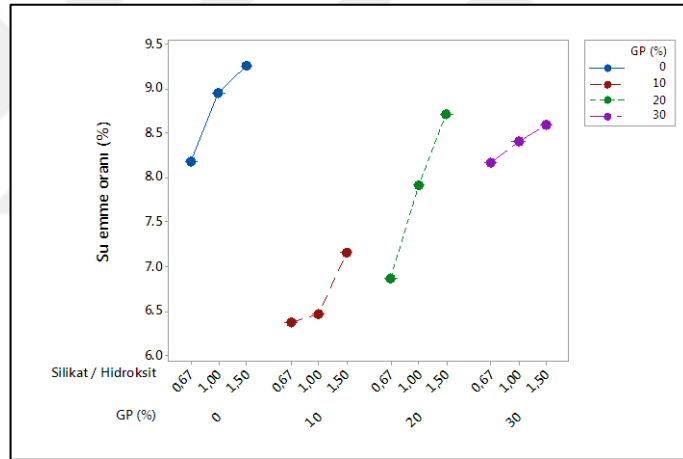
Geopolimerlerin su emme oranı ve SS/SH oranı arasındaki ilişki Şekil 4.20'de analiz edilmiştir. Şekil 4.20'de incelendiğinde, SS/SH oranı arttıkça, istatistiksel açıdan  $SEO = 6,636 + 1,223.(SS/SH)$  eşitliği ile  $R^2 \%19,8$  değerinde anlamlı bir regresyonel ilişkinin



olmadığı ve GP katkısından farklı olarak bir miktar su emme oranında artışa neden olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.21 SS / SH ve GP oranına bağlı su emme oranının belirlenmesi

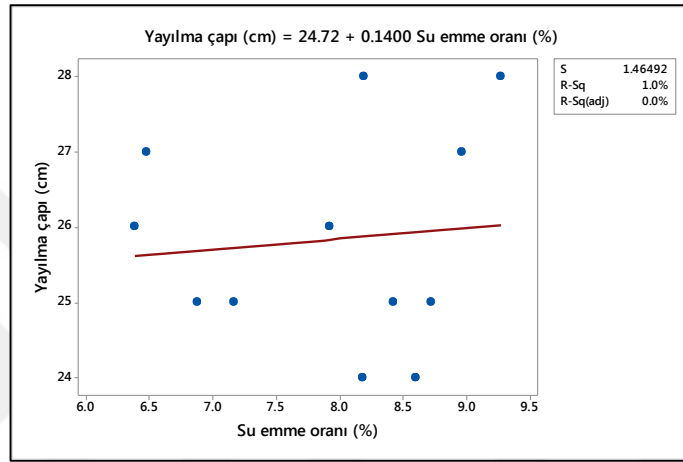


Şekil 4.22. GP ve SS / SH oranındaki değişimin su emme oranına etkisi

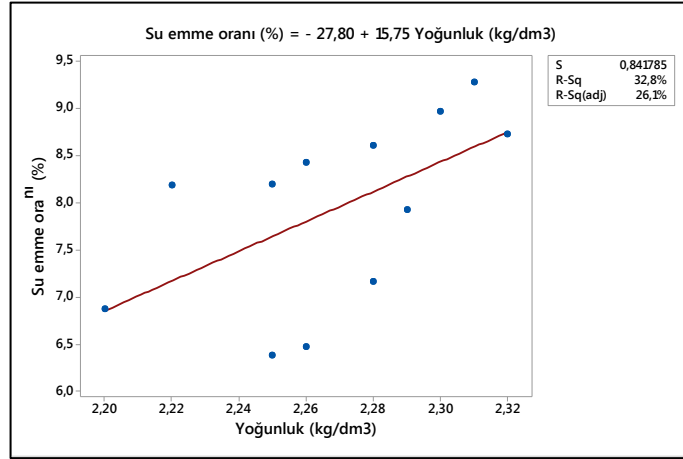
Çalışma konusunu oluşturan geopolimer kompozitlerin SS/SH oranına bağlı olarak su emme oranını tahmin edilmesinde kullanılabilecek kontuar grafik (Şekil 4.21) incelendiğinde ise; SS/SH oranının 0,67 – 1,05 arasında kullanılan değerlerinde ve bunun yanısıra GP'da %7,5-15 oranı arasında kullanılmasında minimum su emme oranına sahip betonlar elde edileceği belirlenmiştir. Ancak GP oranının değişen daha düşük veya daha yüksek oranlarında oranlarında kullanılan SS/SH oranına göre su emme oranlarında artışların olacağı belirlenmiştir. Bu durum kompasitesi en iyi olacak oranların göstergesi olacağı gibi, artan GP kullanımlarında kompasiteden kaynaklı su emme oranındaki artışlara önlem alınması gerekmektedir. Genel olarak çalışmada

kullanılan GP oranına bağlı olarak su emme oranının maksimum %10 olacağı görülmüştür. Şekil 4.22 incelendiğinde de benzer sonuçlar elde edildiği, ancak artan GP oranına bağlı su emme oranındaki azalmaya kıyasla değişen SS/SH oranlarına bağlı olarak ta su emme oranında GP gruplarında bir artışa neden olduğu görülmüştür.

Su emme oranı ile Geopolimerlerin çökmesi arasındaki ilişki değerlendirilmiş ve bu ilişki yayılma çapına bağlı su emme oranındaki değişim Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.23. Su emme oranı ve slump arasındaki ilişki



Şekil 4.24. Geopolimerlerin kütle yoğunluğu ile su emme özelliği arasındaki ilişki

Şekil 4.23 incelendiğinde, su emme oranındaki artışla taze numunelerden elde yayılma çapı değerlerindeki bir miktar artışı istatistiksel olarak göstermiştir. Ayrıca su emme oranını (SEO) ile yayılma çapı (YÇ) arasında  $YÇ = 24,72 + 0,1400 SEO$  ilişkisi ile regreasyon değeri  $R^2 = \%1,0$  ile elde edilen sonuçlar ile yayılma çaplarındaki değişim

oranının aynı oranlarda olmaması nedeniyle anlam olarak düşük bir ilişki söz konusudur.

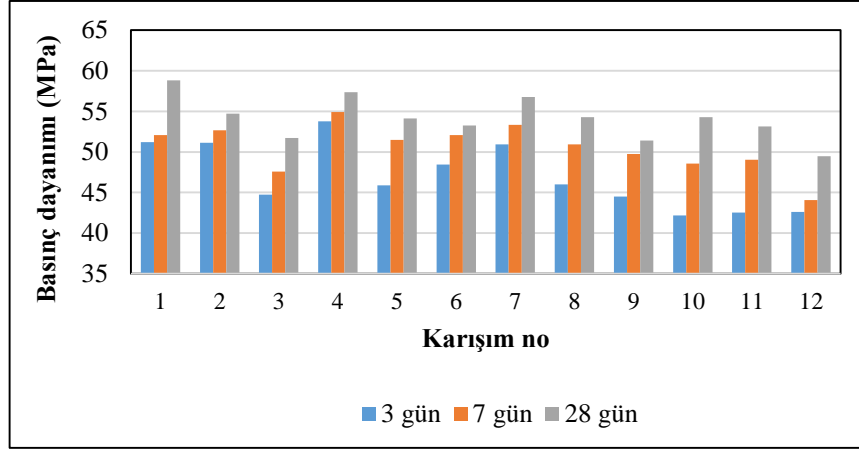
Geopolimerlerin kütle yoğunluğu ile su emme özelliği arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Şekil 4.24'de gösterildiği gibi su emme oranı arttığında, kütle yoğunluğu arttığı görülmüştür. Bu durum Şekil 4.12, Şekil 4.16, Şekil 4.18, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de verilen su emme ve porozite değerleri ile benzerlik göstermiş olup, artan GP oranına bağlı olarak karışımdan azaltılan YFC'nin yoğunluklarının aynı olmaması ve doğrudan malzeme yoğunluğunu etkilemesi ile görünürde su emme oranında bir artış olarak sonuçların elde edilmesine neden olmuştur. Artan yoğunluk değerlerindeki su emme oranları incelendiğinde kütle yoğunluğunun en yüksek değeri, % 8,72 su emme, %19,72 porozite oranları ve 2.32 kg/dm<sup>3</sup> olan %30 GP içeren 9 nolu grupta elde edilmiştir. Kullanılan GP maksimum olduğu grupta bu sonuçların elde edilmesi kullanılan malzeme miktarlarından kaynaklı olduğunu göstermiştir. Ayrıca bu ilişkiye paralel kütle yoğunluğu (KY) ile su emme oranı (SEO) arasında  $SEO = 27,80 + 15,75 (KY)$  olan  $R^2 = 0,328$  ile istatistiksel açıdan anlam seviyesi düşük ilişki olduğu da hesaplanmıştır.

#### 4.5. Basınç Dayanımı Test Sonuçları

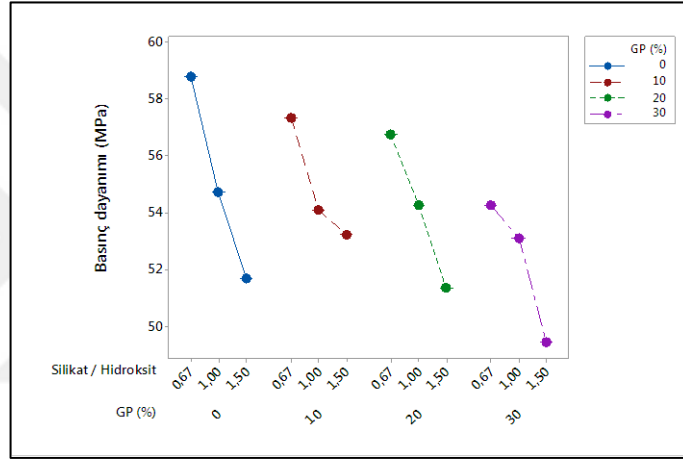
GP kullanımının etkisinin incelendiği bu tez çalışması kapsamında hazırlanan karışımlara ait basınç dayanımı değerlerindeki değişim Tablo 4.5, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da verilmiştir.

Tablo 4.5. Geopolimerbetonların basınç dayanımları

Karışım no	Basınç dayanımı (MPa)		
	3 gün	7 gün	28 gün
1	51.22	52.06	58.81
2	51.14	52.68	54.73
3	44.75	47.57	51.70
4	53.76	54.93	57.37
5	45.88	51.48	54.12
6	48.46	52.09	53.25
7	50.94	53.32	56.76
8	46.00	50.93	54.27
9	44.51	49.76	51.39
10	42.16	48.55	54.27
11	42.52	49.05	53.13
12	42.62	44.05	49.45

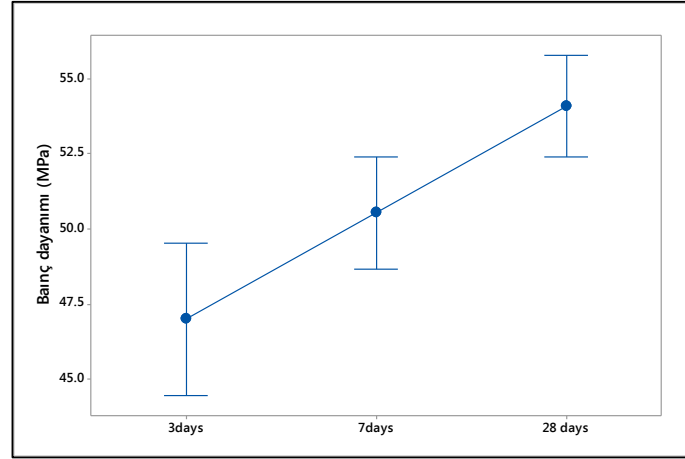


Şekil 4.25. Geopolimer beton basınç dayanımlarındaki değişim



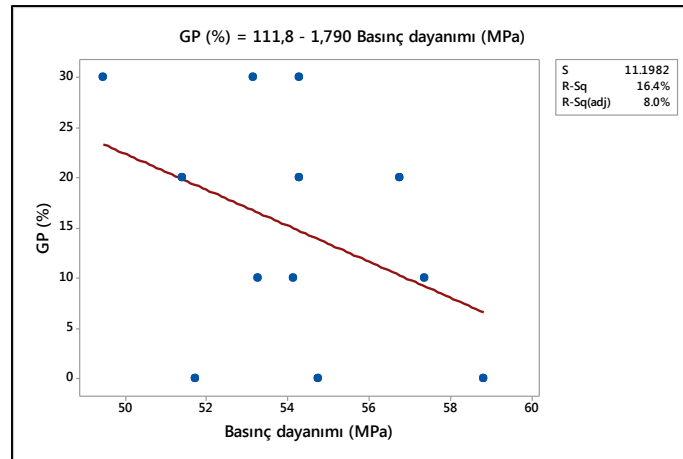
Şekil 4.26. GP ve SS / SH ilavesinin basınç dayanımına etkisi

Geopolimer betonlarda GP kullanılmasının beton basınç dayanımlarındaki değişimlere etkileri (Tablo 4.5, Şekil 4.25, Şekil 4.26) incelendiğinde; dayanımlarda kullanılan cam tozunun SS/SH değerinin 0.67 oranında kullanıldığında en etkili olduğu ve bu grupların 1.0 ve 1.5 oranlarındaki SS/SH kullanımlarına göre daha yüksek dayanım değerlerine ulaştığı ve artan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (SS) oranının olumsuz etkisi olduğu görülmüştür. Ancak GP %20 oranına kadar kullanılmasının genel olarak dayanımlarda fazla bir değişime neden olmadığı, %30 kullanımında ise dayanımda diğer gruplara kıyasla dayanımdaki düşüş miktarının daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bunun yanısıra çalışma sonuçları (Şekil 4.27) GP ve değişik oranlarda kullanılan SS/SH oranının dayanımlar ortalamasında istatistiksel olarak yaklaşık %10'a varan artışlara neden olduğu görülmüştür.



Şekil 4.27. Geopolimerlerde basınç dayanımlarındaki zamansal değişim oranı

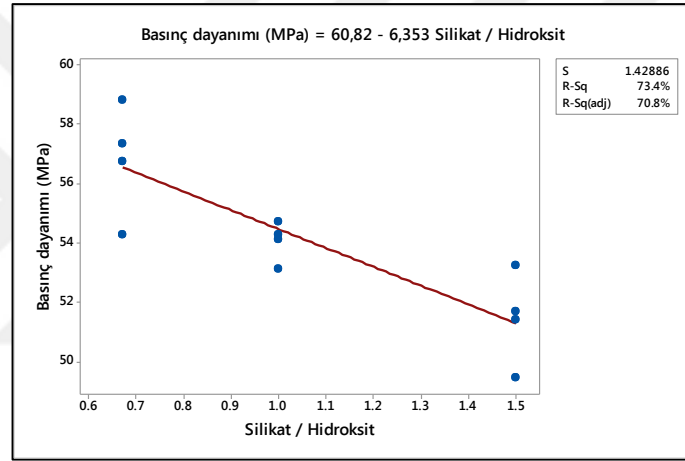
GP kullanımı ile ilgili çalışmalarda da elde edilen deney sonuçlarının, GP oranının artan yüzdesinin, cam parçacık yüzeyindeki yapışkan kuvvetinin azalmasından dolayı betonun basınç dayanımını azalttığı tesbit edilen çalışmalarla benzer sonuçlar elde edilmiştir [72-75], Madandoust ve Ghavidel (2013) tarafından yapılan diğer bir çalışma ise atık cam tozu içeren karışımın çimentonu yerine ilave edilerek kullanılmasında tane boyutundaki küçülmeye paralel olarak dayanımda artış olduğu, diğer bir ifadeyle incelen tane boyutunun cam tozuna bir miktar puzolonik bir özellik kazandırdığı anlaşılmıştır [76] .



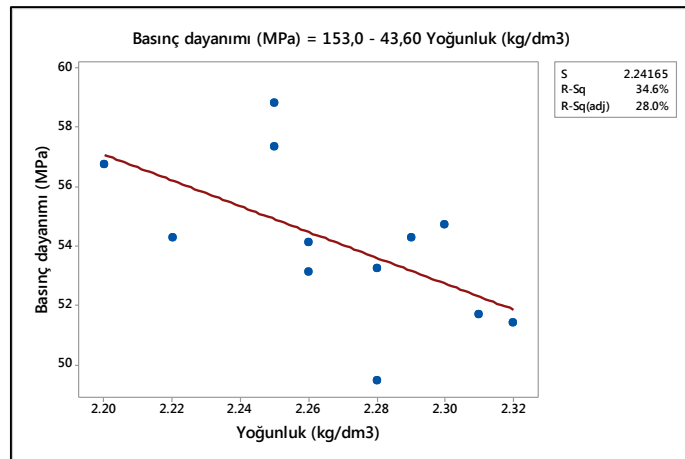
Şekil 4.28. Geopolimerlerin GP ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

Geopolimerlerde cam tozu kullanımı ile basınç dayanımları arasındaki ilişki (Şekil 4.28) incelendiğinde, genel olarak dayanımlarda bir azalış olmasına karşılık ideal GP oranının %15-20 arasındaki bir değere karşılık geldiği belirlenmiştir. Ancak sonuçlar

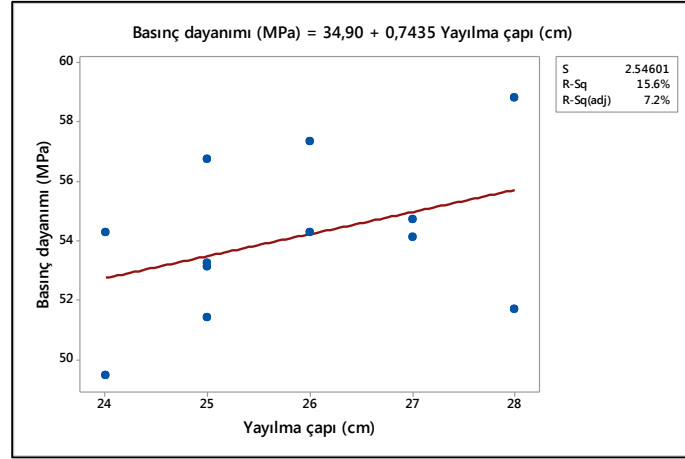
istatistiksel açıdan incelendiğinde cam tozu (GP) ile basınç dayanımı (BD) arasında  $GP=111,8-1,790 (BD)$  olan  $R^2=\% 16,4$  değeri ile zayıf bir ilişkisi olduğu da hesaplanmıştır. Bu durum cam tozu (GP) kullanılmasında karışımlarda değişkenliklerin olabildiğini göstermiştir. Bu durum Şekil 4.29’da verilen SS/SH oranındaki değişimin basınç dayanımı ile ilişkisinde de görülmüştür. Basınç dayanımı (BD) ile SS/SH arasında  $BD=60,82 - 6,353 (SS/SH)$  olan  $R^2=\% 73,4$  değeri cam tozuna göre daha fazla ancak genelde benzer bir anlamlı ilişki hesaplanmıştır. Ayrıca basınç dayanımları ile yoğunluk (4.30) ve basınç dayanımı ile slump (Şekil 4.31) ve basınç dayanımı su emme oranı (Şekil 4.32) arasındaki ilişkilerde de istatistiksel açıdan önemli bir farkın olmadığını göstermiştir.



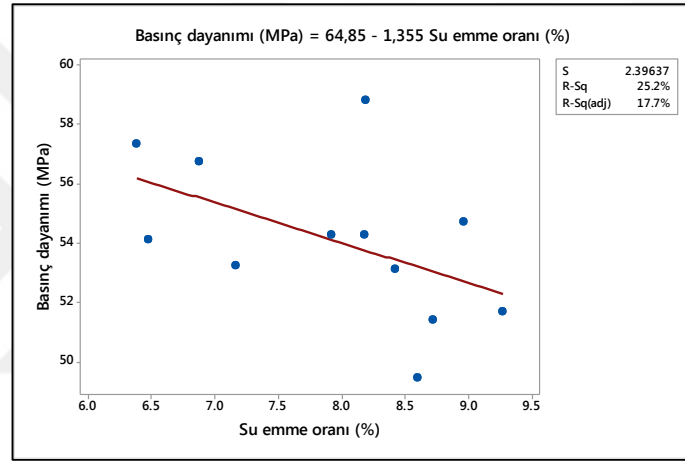
Şekil 4.29 Geopolimerlerde SS /SH ile basınç dayanımı arasındaki ilişki



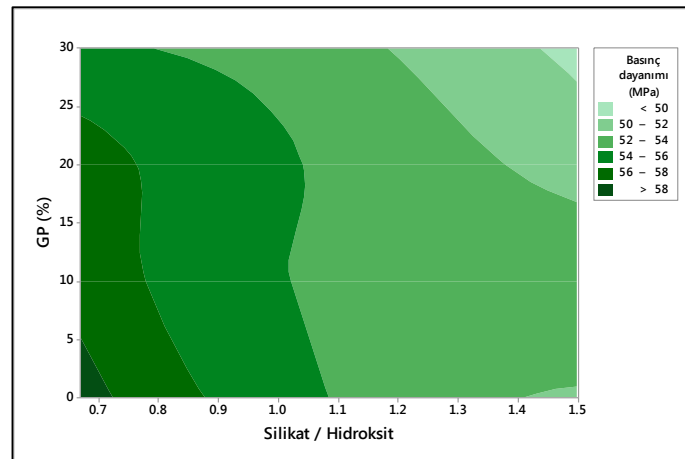
Şekil 4.30. Basınç dayanımı ve kütle yoğunluğu arasındaki ilişki



Şekil 4.31. Basınç dayanımı ve yayılma çapı arasındaki ilişki



Şekil 4.32. Basınç dayanımı ve su emme oranı arasındaki ilişki



Şekil 4.33 SS / SH ve GP ilavesinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi

Bu çalışma kapsamında cam tozu kullanımı ile elde edilebilecek geopolimer betonların kullanılabilir malzemeye göre tahmin edilmesinde yardımcı olabilecek olan Şekil 4.33

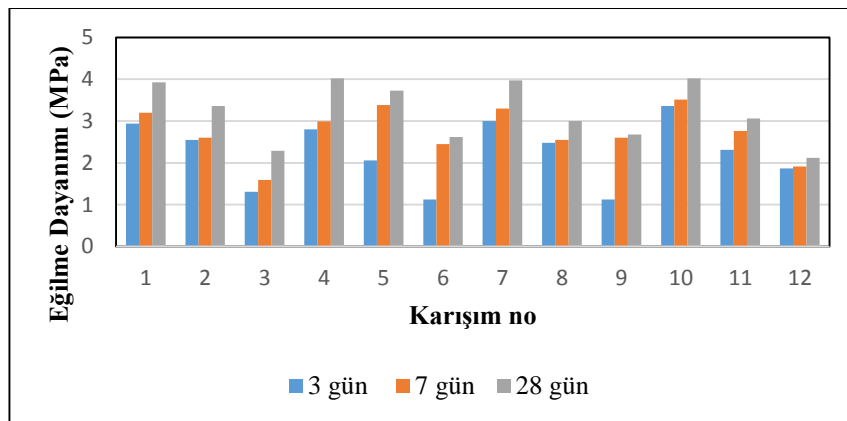
incelendiğinde; yüksek dayanımlar için ideal GP % 20-25 kullanım oranının üzerine çıkmaması ve bu kullanımda SS kullanımının SH kullanımından az olması durumunda gerçekleşebileceği belirlenmiştir. Ancak bu durum SS ın az SH fazla olduğu karışımlarda da benzer sonuçlar elde edilebileceği de dikkate alınmalıdır. Buna rağmen SS ve SH eşit oranda kullanımında Geopolimerlerde GP kullanılması durumunda olumsuz etki ile düşük dayanımların elde edilebileceği belirlenmiştir.

#### 4.6. Eğilme Dayanımı

GP kullanımının geopolimer betondaki etkisinin incelendiği bu tez çalışması kapsamında hazırlanan karışımlara ait eğilme dayanımı değerleri Tablo 4.6, Şekil 4.34, Şekil 4.35 ve Şekil 4.36’da verilmiştir.

Tablo 4.6. Geopolimerbetonların eğilme dayanımları

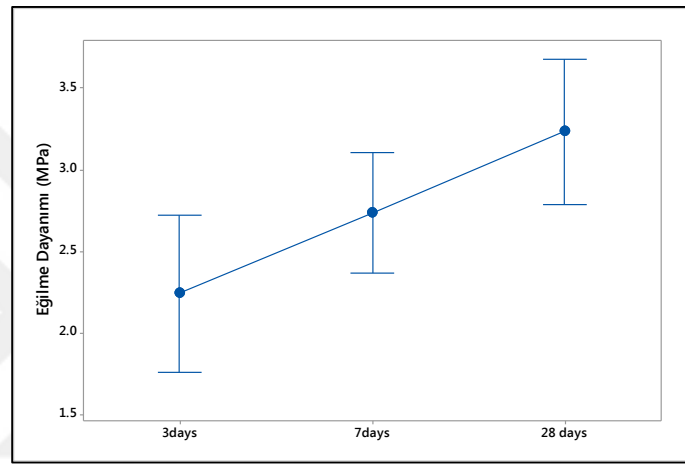
Karışım no	Eğilme Dayanımı (MPa)		
	3 gün	7 gün	28 gün
1	2.94	3.20	3.93
2	2.55	2.60	3.36
3	1.31	1.59	2.29
4	2.80	2.99	4.02
5	2.06	3.38	3.73
6	1.12	2.45	2.62
7	3.00	3.30	3.97
8	2.48	2.55	3.00
9	1.12	2.60	2.68
10	3.36	3.51	4.02
11	2.31	2.76	3.06
12	1.87	1.91	2.12



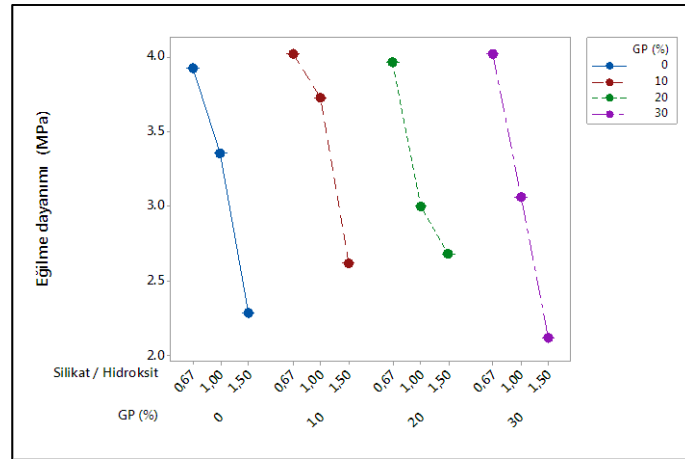
Şekil 4.34. Geopolimerlerin eğilme dayanımlarındaki değişim



Tablo 4.6 ve Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36 incelendiğinde 3 günlük eğilme dayanımlarının en küçük değerinin 1,12 MPa ile %10 - %20 GP ve 1.5 SS/SH oranlarındaki 6. ve 9. gruplarda, en yüksek dayanımın ise 3.36 MPa ile %30 GP ve 0,67 SS/SH oranında 10. grupta elde edilmiştir. Ancak 28 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde nihai eğilme dayanımlarının 3 günlük eğilme dayanımlarından farklı olarak tüm GP kullanılan gruplarda arasında önemli bir fark olmaksızın yaklaşık 4.0 MPa değerine ulaştığı görülmüştür. GP kullanılmayan gruplarda ise bu değer 3.93 MPa değerine ulaşmıştır.



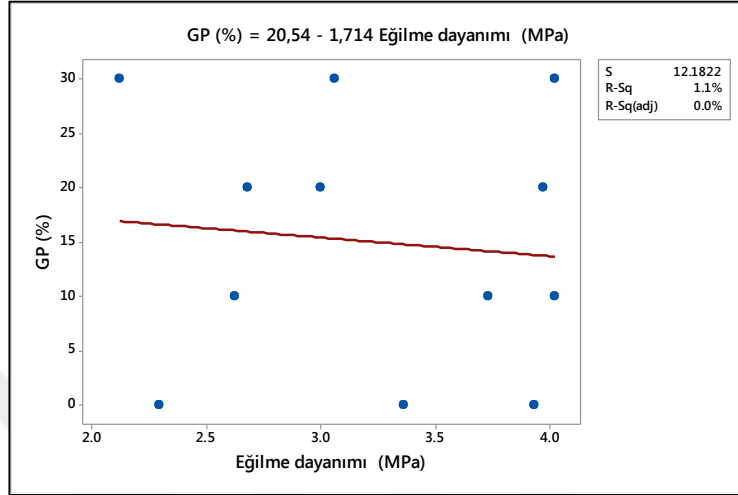
Şekil 4.35. Geopolimerlerin eğilme dayanımlarındaki zamansal değişim oranı



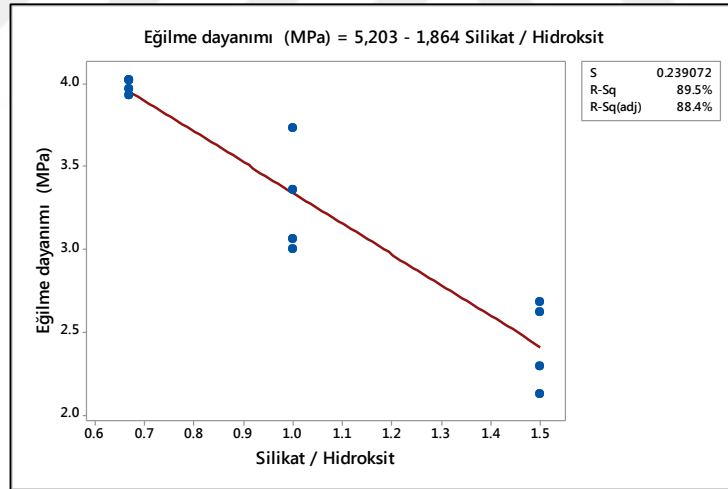
Şekil 4.36. GP ve SS / SH ilavesinin eğilme dayanımına etkisi

Ortalama eğilme dayanımlarındaki (Şekil 4.35) zamansal değişim 28. günündeki artışı net bir şekilde açıklamaktadır. Ancak genel değişimler incelendiğinde (Şekil 4.36) 0,67 SS/SH oranı kullanılan tüm gruplarda dayanımların yüksek ve artan SS/SH

oranına bağılı olarak dayanımda azalma olduğu görülmüştür. Bu durum eğilme dayanımında GP kullanılması etkisinin SS/SH kullanımını etkisinden az olduğunu ortaya koymuştur.



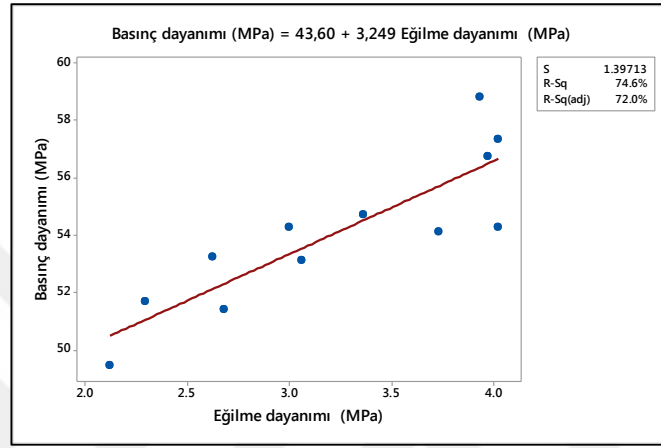
Şekil 4.37. Eğilme dayanımı ve GP arasındaki ilişki



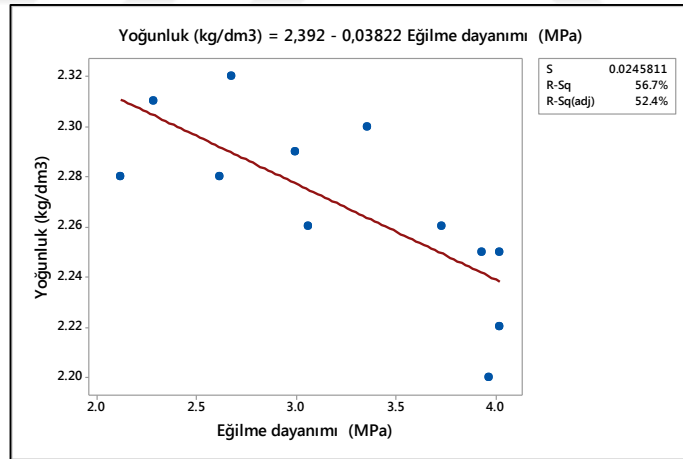
Şekil 4.38. Eğilme dayanımı ve SS / SH oranı arasındaki ilişki

Geopolimer betonlarda cam tozu (GP) kullanımı ile eğilme dayanımları arasındaki ilişki (Şekil 4.37) genel olarak dayanımlarda artan GP oranına bağılı olarak dayanımlarda bir miktar artışa neden olduğu görülmektedir. Ancak sonuçlar 20,54 - 1,714 ED olan  $R^2 = \% 1,1$  değeri ile istatistiksel olarak düşük bir anlamlı ilişki olduğu da hesaplanmıştır. Bu değışim SS/SH oranı ile incelendiğinde artan SS oranına bağılı olarak eğilme dayanımlarında azalma olduğu, bu azalmanın ED = 5,203 – 1,864 SS/SH oranında  $R^2 = \% 89,5$  oranı ile anlamlı ve yüksek bir ilişki belirlenmiştir. Eğilme

dayanımı (ED) ile basınç dayanımı (BD) arasında (Şekil 4.40)  $BD = 43,6 + 3,249 ED$  olan  $R^2$  değeri ise 74,6 ile istatistiksel açıdan zayıf ancak bu çalışmada diğer değişken parametrelere göre daha etkili bir ilişki tespit edilmiştir. Bu durum üretilen Geopolimerbetonların kütle yoğunluğu (KY) ile (Şekil 4.40) karşılaştırıldığında ise  $KY = 2,392 - 0,03822 ED$  ve  $R^2 = 56,7\%$  olan istatistiksel olarak anlamlı bir ilişkide çalışmada tespit edilmiştir.



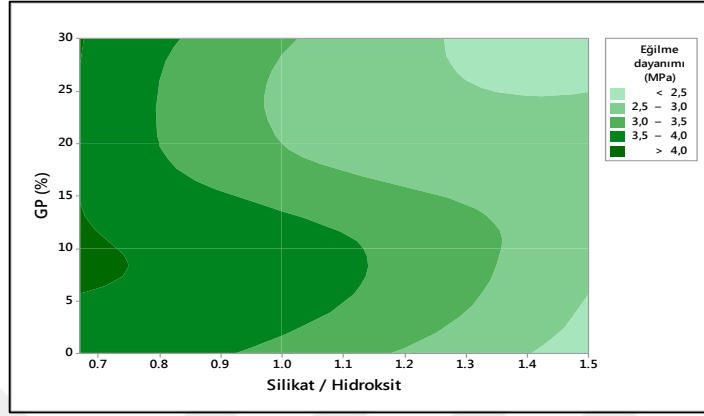
Şekil 4.39 Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 4.40. Eğilme dayanımı ve kütle yoğunluğu arasındaki ilişki

Bu çalışma kapsamında cam tozu kullanımı ile elde edilebilecek Geopolimerharçların kullanılan malzemeye göre eğilme dayanımlarının tahmin edilmesinde yardımcı olabilecek Şekil 4.41 incelendiğinde; yüksek dayanımlar için ideal cam tozunun basınç dayanımı sonuçları ile karşılaştırıldığında üst sınır olarak kullanılabilir oranın % 5-15 oranı arasında kullanımında yüksek eğilme dayanımlarının elde edilebileceği, ancak bu kullanımda SS kullanımının SH kullanımından az olması (0,67 SS/SH)

durumunda gerçekleşebileceği belirlenmiştir. Ancak SS ve SH eşit oranda kullanımında da Geopolimer betonlarda %5-15 arasında GP kullanılması durumunda 3,5 – 4,0 MPa dayanımlara ulaşılabileceği belirlenmiştir.



Şekil 4.41. SS / SH ve GP ilavesinin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi

#### 4.7. Ultrases Geçiş Hızı (UPV) Sonuçları

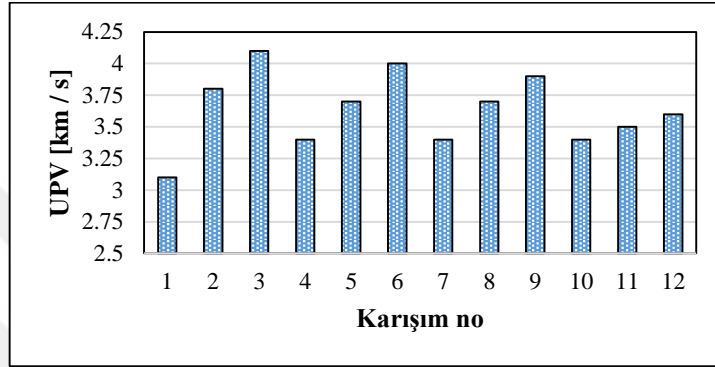
Geopolimer ait tüm karışımlar için ultrases geçiş hızı (UPV) sonuçları, Tablo 4.7 ve Şekil 4.42'de verilmiştir. Buharla kürlenmiş GP karışımlarının tümü ultrases geçiş hızlarının kabul edilebilir seviyelerde olup olmadığı [77] Tablo 4.8 ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.7. Geopolimer beton UPV sonuçları

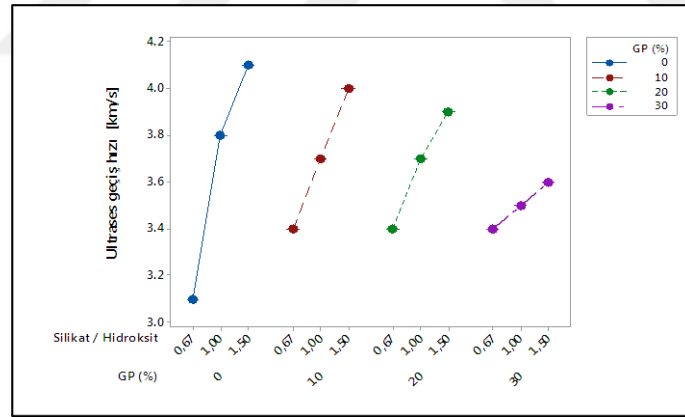
Karışım	UPV [km / s]	Beton kalitesi
1	3.1	Orta
2	3.8	İyi
3	4.1	İyi
4	3.4	İyi
5	3.7	Orta
6	4.0	İyi
7	3.4	Orta
8	3.7	İyi
9	3.9	Belirsiz
10	3.4	Orta
11	3.5	Orta
12	3.6	Orta

Tablo 4.8. Beton kalitesinin UPV hızına bağlı sınıflandırılması

Darbe Hızı [km / s]	Beton kalitesi
4,5 üzeri	Mükemmel
3,5 den 4,5	İyi
3 den 3,5	Orta
3 altı	Belirsiz



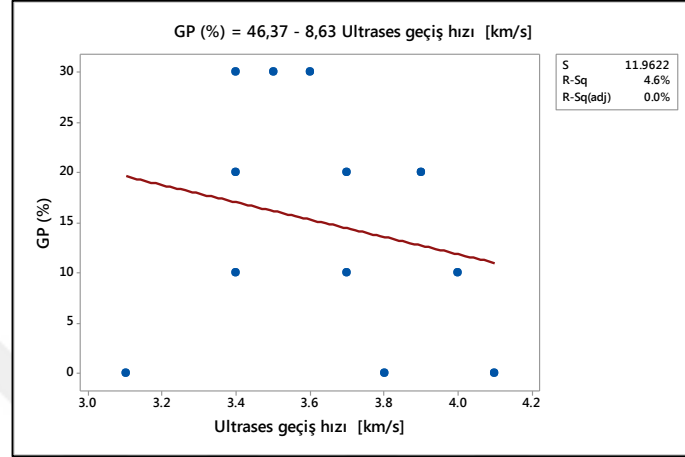
Şekil 4.42. Geopolimerlerin UPV değişimleri



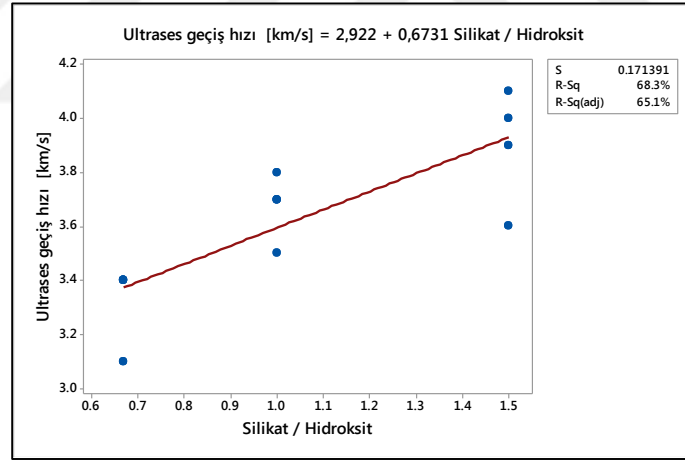
Şekil 4.43. GP ve SS / SH ilavesinin UPV'na etkisi

Ultrases geçiş hızları (UPV) cam tozu (GP) kullanılmayan ilk 3 grupta incelendiğinde; artan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (SS) oranına bağlı olarak boşluksuz bir betonu tanımlayabilecek UPV değerlerine yakın değerlerin elde edildiği belirlenmiştir. Bu durum artan SS ile daha boşluksuz bir betonlar elde edilmesi olarak yorumlanmıştır. Ancak artan GP oranı (Şekil 4.43) ile Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.20 ile de desteklenen sonuçlara göre bir miktar boşluk oluştuğu ve Geopolimerbetonun iç yapı değişimlerinin homojen olmayan malzeme oluşturmasıyla açıklanabileceği öngörülmüştür.

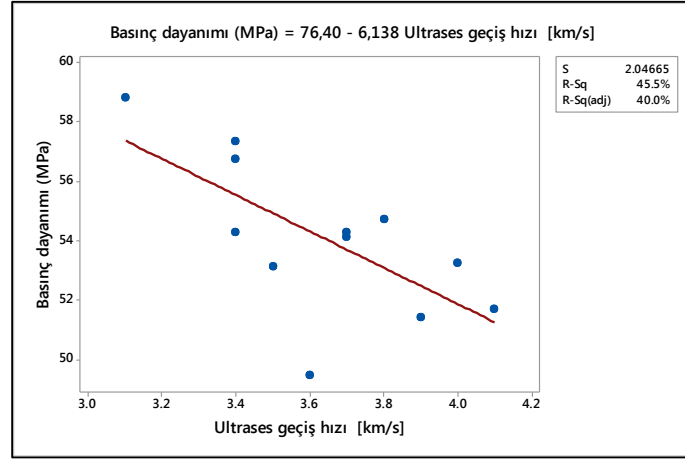
Cam tozu (GP) ilavesi ile farklı oranlarda karıştırılan SS ve SH aktivatörleri ile hazırlanan geopolimer betonlarda UPV'nın cam tozu (GP) ile ilişkisi Şekil 4.44'te, SS/SH oranı ile ilişkisi Şekil 4.45'te, basınç dayanımı ile ilişkisi 4.46'da ve kütle yoğunluğu ile ilişkisi de Şekil 4.47'de verilmiştir.



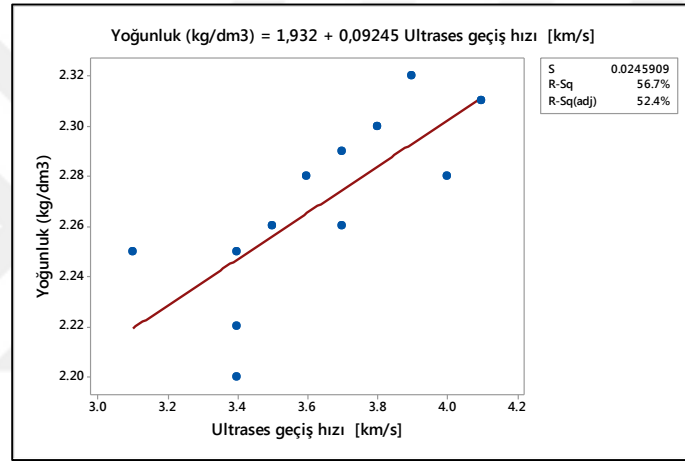
Şekil 4.44. UPV ve GP arasındaki ilişki



Şekil 4.45. UPV ve SS/SH arasındaki ilişki

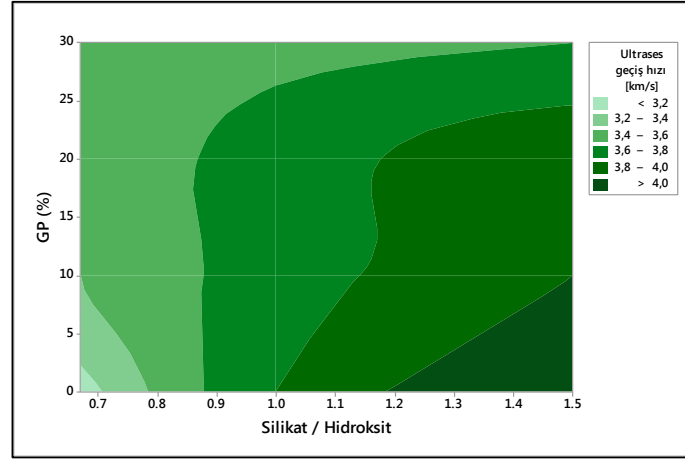


Şekil 4.46. Basınç dayanımı ve UPV arasındaki ilişki



Şekil 4.47 Geopolimerlerde UPV ile kütle yoğunluğu arasındaki ilişki

Şekil 4.44, Şekil 4.45, Şekil 4.46 ve Şekil 4.47 incelendiğinde istatistiksel açıdan UPV ile ilişkisi  $R^2=68,3$  olan SS/SH oranı ile (Şekil 4.45)  $UPV=2,922+0,6731.SS/SH$  regresyon eşitliğinde istatistiksel açıdan düşük ancak gruplar arasındaki en yüksek ilişki elde edilmiştir. Bu değişimi  $R^2=56,7$  ile kütle yoğunluğu (KY) analizi ile (Şekil 4.47)  $KY = 1,932+ 0,09245.UPV$  olan istatistiksel açıdan anlam seviyesi değişken bir malzemenin heterojen olması nedeniyle elde edilebileceği öngörülmüştür.



Şekil 4.48. SS / SH ve GP ilavesinin UPV üzerindeki etkisi

Bu çalışma kapsamında cam tozu kullanımı ile elde edilebilecek Geopolimerlerin kullanılan malzemeye göre ultra ses geçiş hızlarının (UPV) tahmin edilmesinde yardımcı olabilecek olan Şekil 4.48 incelendiğinde; yüksek kalitede beton elde edebilmek için düşük cam tozu (GP) oranı ile aktivatörlerde SS oranının yüksek kullanılması durumunda elde edilebileceği ve maximum cam tozu (GP) oranının %10 geçmemesi durumunda sağlanabileceği görülmüştür. Ancak Şekil 4.33 ile Şekil 4.41 incelendiğinde basınç dayanımlarının UPV değerlerine göre 50-52 MPa dayanımlarda ve 2,5-3,0 MPa eğilme dayanımlarına ulaşılacağı görülmektedir. Ancak bu dayanımlar UPV analiz sonucu ile (Şekil 4. 48) ile çelişkili gibi görünmesine rağmen bu durum elde edilen Geopolimerler yüksek silikat kullanılarak üretilmesi durumunda boşluksuz bir yapıya sahip olabilecek malzeme üretilmesinde avantaj sağlayacağı anlaşılmıştır. Buna rağmen Geopolimerlerin silikat oranının yüksek olması, hidroksit oranının yüksek olan gruplardan daha zayıf moleküler bağ oluşturması nedeniyle olabileceği de öngörülmektedir. Bu durum sonraki çalışmalarda daha detaylı incelenmeli ve değişken parametrelerin etkisinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

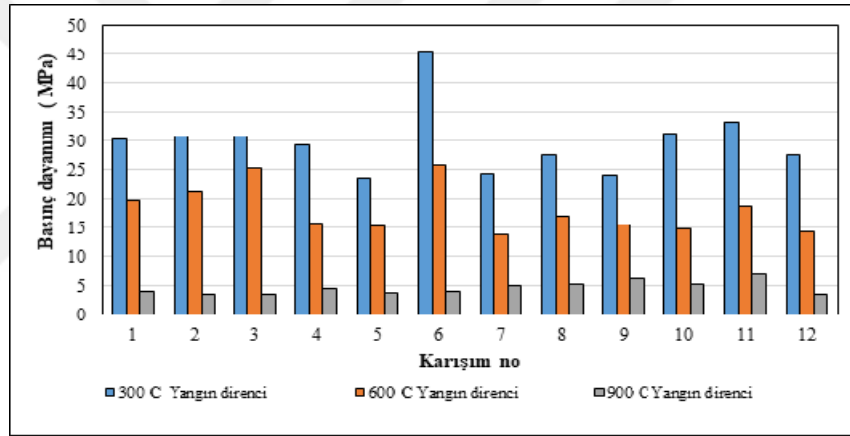
#### 4.8. Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonuçları

Beton küpler iki saat boyunca 300 °C, 600 °C ve 900 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış ve sonrasında elde edilen değerler Tablo 4.9 ve Şekil 4.49. 'da gösterilmiştir.



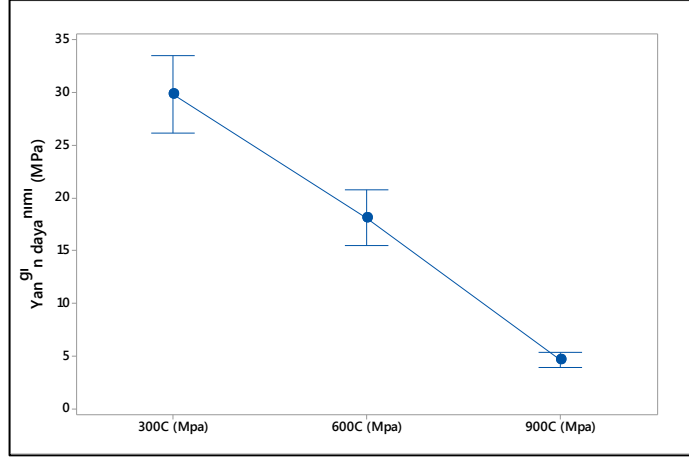
Tablo 4.9. Betonun farklı sıcaklıklardaki basınç dayanımları (MPa)

Karışım	300 °C	600°C	900°C
1	30.25	19.81	4.05
2	30.68	21.21	3.44
3	30.72	25.18	3.53
4	29.42	15.74	4.62
5	23.48	15.24	3.88
6	45.23	25.73	4.01
7	24.31	13.69	5.00
8	27.52	17.13	5.35
9	24.09	15.62	6.38
10	31.25	14.82	5.20
11	33.38	18.88	6.97
12	27.55	14.36	3.62



Şekil 4.49. Betonun farklı sıcaklıklarda basınç dayanımı

Yüksek Sıcaklık etkisi sonuçları incelendiğinde, geopolimerlerin 300 °C ve üzeri sıcaklıklara karşı yüksek dayanım kayıpları yaşadığı görülmüştür. Bu dayanım kayıplarının %50'ye varan değerlere ulaştığı, ancak en az dayanım kaybının yaklaşık %14 ile %10 GP ve 1.5 SS/SH oranı ile hazırlanan karışımda gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Şekil 4.50 incelendiğinde, istatistiksel açıdan GP kullanılması ile hazırlanan geopolimerlerde önemli bir yangına karşı direnç sağlanamadığı belirlenmiştir.



Şekil 4.50. Yangına dayanıklılık ve sıcaklık arasındaki ilişki

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu araştırmanın temel amacı, GP içeriğinin karışımlara eklendiğinde geopolimerlerin özellikleri üzerindeki etkisini incelemektir. Bu hedeflere standart bir yayılma çapı, su emme oranı, porozite, kütle yoğunluğu, basınç ve eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızları ve yüksek sıcaklık etkileri uygulanmıştır. Bu laboratuvar çalışması sonuçlarından elde edilen veriler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Yayılma çapı testi sonuçlarına göre geopolimer betonlarda YFC ve GP eklendiğinde yayılma çapının azaldığı tespit edilmiştir. GP oranının değiştirilmesi nedeniyle yayılma çapı en çok azalması %30 GP'unda 0,67 SS/SH oranında elde edilmiştir. Bu durum, atık camın kullanılmasının betonun işlenebilirliği üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını, ancak yayılma çapı, hava içeriği ve taze birim hacim ağırlık değerlerini yüksek oranda kullanımına rağmen düşürdüğü görülmüştür
- Görünür yoğunluk, kuru kütle yoğunluğu ve kütle yoğunluğun farklı oranlarda GP eklenmesinde, değişken olmasına rağmen, yoğunluklarda artışa neden olduğu ve GP özelliklerinden dolayı kütle yoğunluğu üzerinde olumlu bir etkisi olduğu belirlenmiştir.
- Su emme oranına göre, GP oranı arttığında, su emme oranının düştüğü belirlenmiştir. SS/SH oranı arttığında, su emme oranı, yoğunluk değişimine paralel olarak su emme oranında bir miktar artışa neden olmuştur. Ayrıca maksimum su emme oranının yüksek GP kullanımındaki SS/SH oranı % 1.0 ila 1.5 GP arasında olduğunda gözlemlenmiştir.
- Dayanımlarda kullanılan cam tozunun SS/SH değerinin 0.67 oranında kullanıldığında en etkili olduğu ve bu grupların 1.0 ve 1.5 oranlarındaki SS/SH kullanımlarına göre daha yüksek dayanım değerlerine ulaştığı ve artan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (SS) oranının olumsuz etkisi olduğu görülmüştür. Ancak cam tozunun %20 oranına kadar kullanılmasının genel olarak dayanımlarda fazla bir değişime

neden olmadığı, %30 kullanımında ise dayanımda diğer gruplara kıyasla dayanımdaki düşüş miktarının daha fazla olduğu belirlenmiştir.

- Eğilme dayanımları incelendiğinde nihai dayanımın GP artan kullanımına rağmen gruplar arasında istatistiksel açıdan önemli bir farkın olmadığı belirlenmiştir. Ancak bu değişim GP kullanımından ziyade SS/SH oranının en yüksek dayanımın 0,67 olarak kullanılmasıyla elde edilmiştir.
- Yüksek kalitede beton elde edebilmek için düşük cam tozu (GP) oranı ile aktivatörlerde SS oranının yüksek kullanılması durumunda elde edilebileceği ve maximum cam tozu (GP) oranının %10 geçmemesi durumunda sağlanabileceği görülmüştür. Kontrol karışımına kıyasla, en iyi ultra ses geçiş hız değerlerinin (% 10 cam tozu, 1.5 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> / NaOH oranı) olduğunu ve karışımlardaki tüm sonuçların UPV değerlerinin 3,2 km / s'den daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Yangına dayanıklılık değerlerinin 300°C, 600°C ve 900°C artan sıcaklıklarla kademeli olarak azaldığını olduğu ve bu dayanım kayıplarının % 50'ye varan oranlarda dayanımda azalmaya yol açtığı belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] US EPA, 2012. Glass, Common Wastes and Materials. *Wastes Resources Conservation-common Wastes and Materials*. Retrieved from: <http://www.epa>.
- [2] IEA, 2007. Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions. OECD/IEA, pp: 1-321.
- [3] Chai, L.T., P.C. Sun & W.H. Wing, 2013. Management and recycling of waste glass in concrete products: Current situations in Hong Kong. *Resour. Conserv. Recy.*, 70: 25-31.
- [4] Caijun, S., 2009. Corrosion of glasses and expansion mechanism of concrete containing waste glasses as aggregates. *J. Mater. Civil Eng.*, 21(10): 529-534.
- [5] User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, 1997. *US Department of Transportation Federal Highway Administration*. Publication No. FHWA-RD-97-148.
- [6] Meyer, C., 2009. The greening of the concrete industry. *Cement Concrete Comp.*, 31: 601-605.
- [7] Roskovic, R. & D. Bjegovic, 2005. Role of mineral additions in reducing CO<sub>2</sub> emission. *Cement Concrete Res.*, 35: 974-978.
- [8] Mehta, P.K. & P.J.M. Monteiro, 2006. *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. 3rd Edn., McGraw-Hill, New York.
- [9] Ahmad, S., 2002. Value-added utilization of waste glass in concrete. *Proceeding of the IABSE Symposium, Melbourne*
- [10] Ledererova, M. and K. Grunner, 2006. Optimization of the technology for recycling concrete materials. *Slovak J. Civ. Eng.*, 4: 29-40.
- [11] Jevtic, D., D. Zakic & A. Savic, 2012. Achieving sustainability of concrete by recycling of solid waste materials. *Mech. Test. Diagn.*, 1(2): 22-39.
- [12] Shayan, A. & Xu, A., 2003. "Value-added utilization of waste glass in concrete", *Vermont South, Victoria*, 3133, Australia
- [13] Meyer, C., Egosi, N., 2001. and Andela, C., "Concrete with Waste Glass as Aggregate" *International Symposium Concrete Technology Unit of ASCE and University of Dundee*
- [14] Topçu, I. & Canbaz, M., 2003 "Properties of concrete containing waste glass", *Cement and Concrete Research Journal*, Vol. 34, pp. 267 – 274,

- [15] Topçu, I, Boğa, A., & Bilir, T., 2007 “Alkali-silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ”, *Waste Management*, Vol. 28, pp. 878 – 884,
- [16] Ismail, Z. & Al-Hashmi, E., 2009 “Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete”, *Journal of Waste Management*, Vol. 29, pp. 655-659, 2009. Kou, S. and Poon, C., “Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate”, *Cement and Concrete Composites Journal*, Vol. 31, pp. 107 – 113,.
- [17] Saccani, A. & Bignozzi, M., 2010. “ASR expansion behavior of recycled glass fine aggregates in concrete” *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 531 – 536,.
- [18] Bhupendra Singh Shekhawat<sup>1</sup>, Dr. Vanita Aggarwal (2014) “Utilisation of Waste Glass Powder in Concrete – A Literature Review” *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol 3 PP 14822-14826
- [19] Shilparaju, Dr. P.R Kumar (2014) “effect of using glass powder in concrete” *International journal of innovative research in science, engineering and technology*, Vol 3 PP 421-429
- [20] Paras S.Pithadiya, Abhay V. Nakum (2015) “Experimental study on geopolymer concrete by using GGBS” *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol 4 PP 185-187
- [21] Ana Balaguer Pascual, Monique Tohoue Tognonvi, Arezki Tagnit-Hamou (2014) “Waste glass powder based alkali activated mortar” *International journal of research in engineering and technology*, Vol 03, PP 32-36
- [22] Lateef N. Assi , Edward (Eddie) Deaver , Mohamed K. ElBatanouny , Paul Ziehl (2016) “Investigation of early compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete” *Construction and building material*, Vol 112, PP 807-815
- [23] Y. Jani, W. Hogland Waste glass in the production of cement and concrete – a review *J. Environ. Chem. Eng.*, 2 (3) (2014), pp. 1767-1775
- [24] Asian Productivity Organization Solid Waste Management,(2007): *Issues and Challenges in Asia M. Environmental Management Centre, India*
- [25] C. Shi, K. Zheng., (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete *Resour., Conserv. Recycl.*, 52 (2), pp. 234-247
- [26] Hong, L., Huiying, B., and Ewan, A., 2007 “Use of waste glass as aggregate in concrete”, 7th UK CARE Annual General Meeting, *UK Chinese Association of Resources and Environment, Greenwich*,.
- [27] L.N. Tchadjié, et al. Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis *Ceram. Int.*, 42 (2, Part B) (2016), pp. 3046-3055

- [28] S. Ahmari, et al. (2012). Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash *Constr. Build. Mater.*, 35, pp. 718-729
- [29] A. Vásquez, et al., (2016.) Geopolymer based on concrete demolition waste *Adv. Powder Technol.*, 27 (4), pp. 1173-1179
- [30] J. Payá, et al. 18 – Reuse of aluminosilicate industrial waste materials in the production of alkali-activated concrete binders . *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, Woodhead Publishing, Oxford (2015), pp. 487-518
- [31] A. Nazari, J.G., (2015). Sanjayan Synthesis of geopolymer from industrial wastes *J. Clean. Prod.*, 99, pp. 297-304
- [32] J. Davidovits *Geopolymer Chemistry and Applications* (fourth ed.), Geopolymer Inst. (2015)
- [33] M. Vafaei, A. Allahverdi, (2016). Influence of calcium aluminate cement on geopolymerization of natural pozzolan *Constr. Build. Mater.*, 114, pp. 290-296
- [34] M. Torres-Carrasco, F., (2015) Puertas Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation *J. Clean. Prod.*, 90, pp. 397-408
- [35] R. Redden, N. Neithalath *Microstructure*, (2014). strength, and moisture stability of alkali activated glass powder-based binders *Cem. Concr. Compos.*, 45, pp. 46-56
- [36] A.B. Pascual, M.T. Tognonvi, A. Tagnit-Hamou, (2014)' Waste glass powder-based alkali activated mortar *Int. J. Res. Eng. Technol.*, 03 (13), pp. 15-19
- [37] S. Zhang Waste glass as partial binder precursor and fine aggregate replacement in alkali activated slag/fly ash system M.Sc thesis Delft University of Technology
- [38] Hong, L., Huiying, B., and Ewan, A., (2015) "Use of waste glass as aggregate in concrete", 7th UK CARE Annual General Meeting, *UK Chinese Association of Resources and Environment, Greenwich*, 15 September 2007.
- [39] L.N. Tchadjié, et al. Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis *Ceram. Int.*, 42 (2, Part B) (2016), pp. 3046-3055
- [40] S. Ahmari, et al. (2012) Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash *Constr. Build. Mater.*, 35, pp. 718-729
- [41] A. Vásquez, et al. (2016). Geopolymer based on concrete demolition waste *Adv. Powder Technol.*, 27 (4), pp. 1173-1179
- [42] J. Payá, et al. (2015).18 – Reuse of aluminosilicate industrial waste materials in the production of alkali-activated concrete binders . *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, *Woodhead Publishing, Oxford*, pp. 487-518

- [43] A. Nazari, J.G. (2015) Sanjayan Synthesis of geopolymer from industrial wastes J. Clean. Prod., 99, pp. 297-304
- [44] J. Davidovits Geopolymer Chemistry and Applications (fourth ed.), Geopolymer Inst.
- [45] M. Vafaei, A. (2015), Allahverdi Influence of calcium aluminate cement on geopolymerization of natural pozzolan Constr. Build. Mater., 114 (2016), pp. 290-296
- [46] M. Torres-Carrasco, F. Puertas. (2015), Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation J. Clean. Prod., 90, pp. 397-408
- [47] R. Redden, N. Neithalath (2014,) Microstructure, strength, and moisture stability of alkali activated glass powder-based binders Cem. Concr. Compos., 45, pp. 46-56
- [48] A.B. Pascual, M.T. Tognonvi, A. Tagnit-Hamou ,(2014), Waste glass powder-based alkali activated mortar Int. J. Res. Eng. Technol., 03 (13), pp. 15-19
- [49] S. Zhang Waste glass as partial binder precursor and fine aggregate replacement in alkali activated slag/fly ash system M.Sc thesis Delft University of Technology (2015)
- [50] Bischoff, P. H., & Perry, S. H. (1991). Compressive behaviour of concrete at high strain rates. *Materials and structures*, 24(6), 425-450.
- [51] Chen, X., Wu, S., & Zhou, J. (2013). Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 40, 869-874.
- [52] Meyer, C., Egosi, N., and Andela, C., 2001 “Concrete with Waste Glass as Aggregate” *International Symposium Concrete Technology Unit of ASCE and University of Dundee*, March 19-20,.
- [53] Ismail, Z. and Al-Hashmi, E., 2009 “Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete”, *Journal of Waste Management*, Vol. 29, pp. 655-659,
- [54] Topçu, I. and Canbaz, M., 2004 “Properties of concrete containing waste glass”, *Cement and Concrete Research Journal*, Vol. 34, pp. 267 – 274,.
- [55] Topçu, I, Boğa, A., and Bilir, T., 2007 “Alkali-silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>”, *Waste Management*, Vol. 28, pp. 878 – 884,
- [56] Kou, S. and Poon, C., 2009 “Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate”, *Cement and Concrete Composites Journal*, Vol. 31, pp. 107 – 113,.



- [57] Saccani, A. and Bignozzi, M., 2010 “ASR expansion behavior of recycled glass fine aggregates in concrete” *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 531 – 536,.
- [58] Federico, L. and Chidiac, S., “Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete: Critical review of treatment methods” *Cement & Concrete Composites*, Vol. 31, pp. 606–610, 13 February 2009.
- [59] Idir, R., Cyr, M., and Tagnit-Hamou, A., 2010 “Use of fine glass as ASR inhibitor in glass-aggregate mortars” *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1309–1312, July.
- [60] Caijun, S. and Keren, Z., A., 2007 “A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete” *The Journal of Resources, Conservation, and Recycling*, Vol. 52, pp. 234–247, May.
- [61] Her-Yung Wang, 2008 “A study on the effects of LCD glass sand on the properties of concrete”, *Waste Management*, Vol. 29, pp. 335–341, May.
- [62] Shane Palmquist, 2003 “Compressive behavior of concrete with recycled aggregates”, Ph.D. Thesis, TUFTS University,
- [63] Kralj Davorin, 2009 “Experimental study of recycling lightweight concrete with aggregates containing expanded glass”, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 87, pp. 267-273, March.
- [64] Lee, M., Ko, C., Chang, F., Lo, L., Lin, J., Shan, M., and Lee, J., 2008 “Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments, and vacuum vibratory compaction”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, pp. 583-587,
- [65] Park, S., , Lee, B., and Kim, J., 2004 “Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 2181-2189,
- [66] T. D. Dyer and R. K. Dhir, 2001 "Chemical reactions of glass cullet used as cement component," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 13, pp. 412-417,
- [67] C. Polley, S. M. Cramer, and R. V. d. l. Cruz, 1998, "Potential for using waste glass in Portland cement concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 10, pp. 210-219,
- [68] A. Shayan, "Value-added utilization of waste glass in concrete," in IABSE Symposium Report, 2002, pp. 12-21.
- [69] R. Vandhiyan, K. Ramkumar, and R. Ramya, 2013, "Experimental study on replacement of cement by glass powder," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*-Vol, vol. 2.
- [70] J. Khatib, E. Negim, H. Sohl, and N. Chileshe, 2012, "Glass powder utilization in concrete production," *European Journal of Applied Sciences*, vol. 4, pp. 173-176.

- [71] P. Soroushian, 2012, "Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as a partial replacement for cement," *Construction and Building Materials*, vol. 29, pp. 368-377.
- [72] F. Rajabipour, H. Maraghechi, and G. Fischer, 2010, "Investigating the alkali-silica reaction of recycled glass aggregates in concrete materials," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 22, pp. 1201-1208.
- [73] R. G. Pike and D. Hubbard, 1957, "Physicochemical studies of the destructive alkali aggregate reaction in concrete," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol. 59, pp. 127-132,
- [74] C. Johnston, 1974, "Waste glass as coarse aggregate for concrete," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 2, pp. 344-350.
- [75] B. Topcu and M. Canbaz, 2004, "Properties of concrete containing waste glass," *Cement and concrete research*, vol. 34, pp. 267-274.
- [76] R. Madandoust and R. Ghavidel, 2013, "Mechanical properties of concrete containing waste glass powder and rice husk ash," *Biosystems Engineering*, vol. 116, pp. 113-119.
- [77] Özçep, F., Karabulut, S., Özgüven, B., & Sanlı, O. (2012). Tahribatsız Test Yöntemleri ve Ultrasonik Hız Ölçümleri. *Jeofizik Bülteni*, 22(69-70-71), 11-24.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı, Soyadı : Majed Ali Ibrahim ANNAKOA  
Doğum Tarihi ve Yeri : 02.03.1981 Zawia-LİBYA  
Medeni Durumu : Evli  
Yabancı Dili : İngilizce  
Elektronik Posta : majedali259@gmail.com



### Eğitim

Lise : Dhaher alhelal lisesi- LİBYA-1999  
Lisans : Al-Zawiyah yüksek bilim ve Teknoloji Enstitüsü -  
İnşaat mühendisliği - 2003

### Yayınlar

Ali ANNAKOA M., Memiş S., Kaplan G., Yaprak H.,(2019). Effect of Adding Glass Powder in Geopolymer Concrete. ICELIS 2019, 1, 480-484. (Tam Metin Bildiri / Sözlü Sunum)