

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

**GEOPOLİMER BETONDA PİRİNÇ KABUĞU KÜLÜ VE ATIK  
SERAMİK TOZU KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

**Mohamed Ahmed Mohamed BİLAL**

**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

**Mohamed Ahmed Mohamed BILAL** tarafından hazırlanan "**Geopolimer Betonda Pirinç Kabuğu Külü ve Atık Seramik 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

Tezdeki tüm bilgilerin etik davranış ve akademik düzenlemeler 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.

Mohamed Ahmed Mohamed BILAL



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### GEOPOLİMER BETONDA PİRİNÇ KABUĞU KÜLÜ VE ATIK SERAMİK TOZU KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Mohamed Ahmed Mohamed BILAL

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

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ

Giderek artan katı atık kapasitelerinin azaltılmasında karşılaşılan depolama sorununun çözümü, ya atıkların yeniden kullanımı ya da kaynağında azaltılarak alternatif bir kaynağa dönüştürülmesi ile mümkündür. Bu sayede, doğada kendisini yenileyemeyen kaynaklarının ve enerjinin verimli kullanımı sonucu depolamanın çevreye verdiği zararlar azaltılabilir. Beton, dünyada en yaygın olarak kullanılan, yenilenemeyen kaynakların en fazla kullanıldığı, hatta katı atık depolamasında da önemli bir yere sahip olan yapı malzemelerinden birisidir. Bağlayıcısı olan çimento ise üretimindeki CO<sub>2</sub> emisyon seviyeleri ile çevresel zararlarda önemli bir paya sahiptir. Depolama alanlarının yükünü hafifletilmesinde yada çevresel olumsuz etkiler noktasında yapı malzemesi üretiminde bu alanlardaki atıkların kullanılması bir alternatif olarak düşünülebilir. Geopolimer malzemeler ise geleneksel beton üretiminin aksine, çevrenin korunması için daha az maliyetli olduğu bilinen, sürdürülebilir bir gelişmede kullanılması avantajlar sağlayabilecek yeni bir beton türüdür.

Bu çalışma kapsamında tamamen çimentoya alternatif bir bileşen olarak özellikleri daha iyi olan, depolama alanlarında önemli bir miktarda yer kaplayan atıklardan yüksek fırın cürufu (YFC), seramik tozu (ST) ve pirinç kabuğu külü (PK) kullanımının geopolimer beton karışımlarında kullanımının araştırılmasıdır. Bu amaçla YFC'nin %0, %5, %10 ve %15 oranında PK ile %0, %10, %20 ve %30 oranında ST'nin geopolimer beton üretiminde kullanılmıştır. Ayrıca geopolimer üretiminde önemli bir malzeme olan NaOH'in 12, 14, 16 ve 18 molalite olarak hazırlanması ile oluşturulan Taguchi L16 matrisi ile gruplar belirlenmiştir. Karışımların yayılma çapları, yoğunlukları, porozite ve su emme oranları, basınç dayanımları ile yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışları istatistiksel olarak incelenmiştir. Sonuçlar; ST ve PK kullanılarak üretilen geopolimerlerde PK kullanımının yayılma çapı ve su emme oranları üzerinde negatif bir etkisi olduğu, ST kullanımının olumlu etkisi ile yoğunluğu ve porozitesi fazla olan geopolimerler elde edildiği görülmüştür. Ayrıca 70 MPa üzeri dayanımların 14-16 molalite ile %2 PK veya %15 ST kullanılması durumunda elde edilebileceği belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkilerine bakıldığında; geopolimer betonların yüksek sıcaklıklara dayanım değerlerinin normal betonlara kıyasla düşük olduğu, geopolimer malzemeler

üzerinde ST kullanımının etkisinin daha çok olacağı, 450 °C'yi aşan değerlerde özel önlemler alınması gerektiği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Atık seramik tozu, pirinç kabuğu külü, geopolimer, sodyum silikat, sodyum hidroksit, basınç dayanımı.

**2019, 87 Sayfa**

**Bilim Kodu: 91**



## ABSTRACT

MSc. Thesis

### INVESTIGATION OF THE USE OF RICE HUSK ASH AND WASTE CERAMIC POWDER IN GEOPOLYMER CONCRETE

Mohamed Ahmed Mohamed BILAL

Kastamonu University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Material Science and Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Selçuk MEMİŞ

**Abstract:** The solution of the storage problem encountered in reducing the increasing of solid waste capacities is either the reuse of the waste or the conversion of it to an alternative source by reducing it from its source. By this way, as a result of the efficient use of resources and energy that cannot renew itself in nature, that influence on the environment which caused by storage can be reduced. Concrete is one of the most widely used building materials in the world, the most widely used of non-renewable resources, and even has an important place in solid waste storage. Cement, as the major binder in concrete has a significant impact in CO<sub>2</sub> emission levels and environmental influences through its production. The usage of waste in these fields can be considered as an alternative in the lightening of the load of landfills or in the production of building materials at the point of environmental adverse effects. In contrast to traditional concrete production, geopolymer materials are a new type of concrete that is known to be less costly for the protection of the environment and can provide advantages for use in a sustainable development.

The aim of this study is to investigate the use of blast furnace slag (GGBFS), ceramic powder (CP) and rice husk ash (RHA) from wastes that occupy a significant amount of space in landfills, which have better properties as an alternative component to cement in geopolymer concrete mixtures. For this purpose, GGBFS 0%, 5%, 10% and 15% RHA with 0%, 10%, 20% and 30% CP was used in the production of geopolymer concrete. mixes were also identified with the Taguchi L16 matrix formed by the preparation of NaOH as 12, 14, 16 and 18 molalites, an important material in geopolymer production. Flow, densities, porosity and water absorption, compressive strength and behavior of mixtures under the influence of elevated temperatures were statistically analyzed. Results indicated that RHA has adverse effect on flow and water absorption capacity, and CP has a positive effect to achieve higher density and improve the prosity of geopolymer concrete. Furthermore, it was determined that strengthup to 70 MPa can be achieved if 2% RHA or 15% CP is used with 14-16 of molality. In term of elevated temperature effects, it was determined that the resistance values of Geopolymer concretes to high temperatures were lower compared to normal concretes, that the use of CP on geopolymer materials would be more effective, and that special precautions should be taken at values exceeding 450 ° C.

**Key Words:** Slag, rice ash, waste ceramic powder, geopolymer mortar, sodium silicate, sodium hydroxide, compressive strength, flexural strength, elevated temperature.

**2019, 87 Page**

**Science Code: 91**



## TEŞEKKÜR

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, Prof. Dr. İlhami DEMİR ve Dr. Öğr. Üyesi Gökahan 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.

Lütfü GÖKDERE, Uğur SARIKAYAYanı sıra KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ asistanlarına ve yakın arkadaşlarım Bashar Qasem, 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 aileme teşekkür etmek istiyorum. Onlar bana güç, ilham ve güven kaynağı oldular.

Son olarak, tezimi hazırlamamda bana yardımcı olan herkese içten şükranlarımı sunarım.

Mohamed Ahmed Mohamed BILAL  
Kastamonu, Aralık, 2019



# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ ONAYI.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	15
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	20
2.1. Geopolimer Beton.....	20
2.2. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler.....	22
2.2.1. Agrega.....	22
2.2.2. Yüksek Fırın Cürufu (YFC).....	22
2.2.3. Pirinç Kabuğu Külü (PK).....	24
2.2.4. Atık Seramik Tozu (ST).....	26
2.2.5. Alkali Aktivatörler.....	27
2.3. Literatüre Ait Bazı Çalışmalar.....	27
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
3.1. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler.....	32
3.1.1. Agregalar.....	32
3.1.2. Öğütülmüş Granül Yüksek Fırın Cürufu (YFC).....	33
3.1.3. Pirinç Kabuğu Külü (PK).....	34
3.1.4. Atık Seramik Tozu (ST).....	35
3.1.5. Alkali Aktivatörler.....	37
3.1.6. Su.....	39
3.2. Numunelerin Üretimi ve Kürü.....	39
3.2.1. Numune Dökümü ve Kürü.....	41
3.3. Geopolimer Üzerinde Yapılan Deneyler.....	43
3.3.1. Yayılma Tablası Deneyi.....	43
3.3.2. Yoğunluk Testi.....	44
3.3.3. Porozite ve Su Emme Oranı Tayini.....	45
3.3.4. Kılcal Su Emme Deneyi.....	46
3.3.5. Basınç Dayanımı Testi.....	47
3.3.6. Yüksek Sıcaklık Etkisi.....	48
4. TARTIŞMA VE BULGULAR.....	50
4.1. Yayılma Tablası Deney Sonuçları.....	50
4.2. Yoğunluk Test Sonuçları.....	53
4.3. Porozite Test Sonuçları.....	59
4.4. Su Emme Oranı Test Sonuçları.....	63
4.5. Basınç Dayanımı Test Sonuçları.....	67
4.6. Yüksek Sıcaklık Etkisi Deney Sonuçları.....	72
4.7. Taguchi Optimizasyonu.....	76
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	78
5.1. Sonuçlar.....	78

KAYNAKÇA.....	80
ÖZGEÇMİŞ .....	87



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Geopolimerin kimyasal bileşimi .....	21
Şekil 3.1. Geopolimer üretiminde kullanılan agrega .....	33
Şekil 3.2. Öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (YFC) .....	34
Şekil 3.3. Pirincin yakılma süreci .....	35
Şekil 3.4. PK öğütülmesinde kullanılan halkalı değirmen .....	35
Şekil 3.5. ST elde edilme süreci .....	36
Şekil 3.6. ST'unun öğütülmesinde kullanılan bilyalı değirmen .....	37
Şekil 3.7. Sodyum hidroksit peletleri .....	38
Şekil 3.8. Sodyum silikat çözeltisi .....	38
Şekil 3.9. Hobart karıştırıcı .....	42
Şekil 3.10. Geopolimer karıştırma süreci .....	42
Şekil 3.11. Çalışmanın karıştırma prosedürü .....	43
Şekil 3.12. Döküm ve kür süreci .....	43
Şekil 3.13. Yayılma tablası .....	44
Şekil 3.14. Yayılma tablası deneyi .....	44
Şekil 3.15. Arşimet test ekipmanı .....	45
Şekil 3.16. Geopolimer örneklere yapılan geçirgenlik testi .....	47
Şekil 3.17. Geopolimer beton basınç dayanım testi .....	48
Şekil 3.18. Yüksek sıcaklı etkisi deneyi .....	49
Şekil 4.1. Yayılma çapındaki değişimler .....	51
Şekil 4.2. Yayılma çapı ile ST oranı arasındaki ilişki .....	51
Şekil 4.3. Yayılma çapı ile PK oranları arasındaki ilişki .....	52
Şekil 4.4. Yayılma çapının değişken parametrelere göre belirlenmesi .....	52
Şekil 4.5. Geopolimerin yoğunluk değişimleri .....	54
Şekil 4.6. Yoğunluklar arasındaki ilişki .....	54
Şekil 4.7. ST oranı ile görünür yoğunluk arasındaki ilişki .....	55
Şekil 4.8. PK oranı ile görünür yoğunluk arasındaki ilişki .....	55
Şekil 4.9. Molalite ile görünür yoğunluk arasındaki ilişki .....	55
Şekil 4.10. ST oranı ile yoğunluk arasındaki ilişki .....	56

Şekil 4.11. PK oranı ile yoğunluğu arasındaki ilişki .....	56
Şekil 4.12. Molalite ile yoğunluk arasındaki ilişki .....	57
Şekil 4.13. Değişken parametrelere bağlı yoğunluk değişimi .....	57
Şekil 4.14. Değişken parametrelere bağlı görünür yoğunluk değişimi .....	58
Şekil 4.15. Değişkenlere bağlı yoğunluk tahmini .....	58
Şekil 4.16. Kütle yoğunluğu ile yayılma çapı arasındaki ilişki .....	59
Şekil 4.17. Geopolimer betonlarda porozitedeki değişim .....	60
Şekil 4.18. ST ile porozite arasındaki değişim .....	61
Şekil 4.19. PK ile porozite arasındaki değişim .....	61
Şekil 4.20. Molalite ile porozite arasındaki değişim .....	61
Şekil 4.21. Değişkenlere bağlı porozite tahmini .....	62
Şekil 4.22. Su emme oranlarındaki genel değişim .....	64
Şekil 4.23. PK ile su emme oranı arasındaki değişim .....	65
Şekil 4.24. ST ile su emme oranı arasındaki değişim .....	65
Şekil 4.25. Değişkenlere bağlı su emme oranı tahmini .....	66
Şekil 4.26. Yoğunluk ile su emme oranı arasındaki ilişki .....	67
Şekil 4.27. Geopolimer beton basınç dayanımlarındaki değişim .....	68
Şekil 4.28. Basınç dayanımlarındaki zamansal değişim oranı .....	68
Şekil 4.29. ST ile basınç dayanımı arasındaki değişim .....	69
Şekil 4.30. PK ile basınç dayanımı arasındaki değişim .....	69
Şekil 4.31. Molalite ile basınç dayanımı arasındaki değişim .....	70
Şekil 4.32. Porozite ile basınç dayanımı arasındaki değişim .....	70
Şekil 4.33. Yoğunluk ile basınç dayanımı arasındaki değişim .....	71
Şekil 4.34. Basınç dayanımı ve su emme oranı arasındaki ilişki .....	71
Şekil 4.35. Değişkenlere bağlı basınç dayanımı tahmini .....	72
Şekil 4.36. Yüksek sıcaklık etkisine bağlı dayanım kaybı değişimi .....	73
Şekil 4.37. Yüksek sıcaklık etkisine bağlı ağırlık kaybı değişimi .....	74
Şekil 4.38. 300°C'de basınç dayanımı değişimi .....	74
Şekil 4.39. 450°C'de basınç dayanımı değişimi .....	75
Şekil 4.40. 600°C'de basınç dayanımı değişimi .....	75
Şekil 4.41. Taguchi optimizasyonu kontrol faktör grafikleri .....	76

## TABLolar DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 2.1. ASTM C618-03'e göre YFC'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri .....	23
Tablo 3.1. Agregaların fiziksel özellikleri .....	33
Tablo 3.2. YFC'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri .....	33
Tablo 3.3. PK'nın kimyasal özellikleri .....	35
Tablo 3.4. Karışımlarda 1 dm <sup>3</sup> için kullanılan SS ve SH çözültisi miktarları ....	39
Tablo 3.5. Karışım tasarım parametreleri .....	40
Tablo 3.6. Karışım oranları .....	40
Tablo 3.7. Karışım tasarım verileri (g/dm <sup>3</sup> ) .....	41
Tablo 4.1. Yayılma çapı sonuçları .....	50
Tablo 4.2. Geopolimer betonların yoğunluğu (kg/dm <sup>3</sup> ) .....	53
Tablo 4.3. Geopolimerlerin porozite değerleri .....	60
Tablo 4.4. Su emme oranlarındaki % değişim değerleri .....	63
Tablo 4.5. Geopolimer betonların basınç dayanımları .....	67
Tablo 4.6. Yüksek sıcaklıklar sonrası dayanımlar .....	73
Tablo 4.7. Basınç dayanımı için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri .....	76
Tablo 4.8. Yoğunluk için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri .....	77
Tablo 4.9. Su emme oranı için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri .....	77
Tablo 4.10. Porozite için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri .....	77
Tablo 4.11. Kontrol faktörleri için optimum sonuçlar ve doğrulama deneyleri....	77

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Kısaltmalar

YFC	Yüksek fırın cürufu
PK	Pirinç kabuğu külü
ST	Seramik tozu
CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide
PC	Portland çimentosu
NaOH	Sodyum hidroksit
NaSi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sodyum silikat
SH	Sodyum hidroksit
SS	Sodyum silikat
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat

## 1. GİRİŞ

Beton, dünyada en yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinden birisi olup, bağlayıcısı Portland çimentosudur. Günümüzde Portland çimentosu (PÇ) yapı malzemeleri ve özellikle de beton üretiminde sudan sonra en çok kullanılan bağlayıcı malzemenin başında gelmektedir (Habert vd; 2011; Nimwinya et al 2016). Portland çimentosunun avantajları olduğu gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlardan birisi, Portland çimentosunun üretiminde fosil yakıt kullanımı ve kireçtaşının ayrıştırılması sürecindeki işlemler nedeniyle olumsuz çevresel etkilere yol açması ve küresel çaptaki sera gazlarının %65'ini oluşturan CO<sub>2</sub> gazı ile sera gazı salınımı meydana getirmektedir (Habert vd., 2011; Masi vd., 2014; Nimwinya vd., 2016; Zhou vd., 2016). Bununla birlikte çimento endüstrisi, küresel ölçekte incelendiğinde toplam atmosferdeki CO<sub>2</sub> emisyonlarının tahmini % 5 ile 7'sini neden olduğu da bilinmektedir. Bu bağlayıcıların üretilmesinde daha az enerji gerektiren, atmosfere daha az CO<sub>2</sub> salan, mevcutları ile benzer özelliklere sahip yeni ürünlerin geliştirilmesi önemli bir konudur. Bu durum kullanılan çimento miktarını azaltmaya ve betonu daha sürdürülebilir hale getirmeye yönlendiren araştırmalarda uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, pirinç kabuğu külü vb. mekanik özellikleri ve dayanımı artırabilecek olan endüstri atığı malzemelerin yeniden kullanılmasını ortaya çıkartmıştır (Komnitsas, 2011; Villaquirán-Caicedo ve de Gutiérrez, 2018).

Katı atık depolama alanları, büyük miktarda kentsel atık başta olmak üzere endüstri atıklarını toplamaya devam etmektedir. Giderek artan depolama kapasitelerinin azaltılması katı atıkların alternatif bir kaynağa dönüştürülmesi ile mümkündür. Bu durum, doğada kendisini yenileyemeyen kaynaklarının azalmasını önlemesi, gerekli enerjiyi koruması ve depolamanın çevreye verdiği zararın azaltılmasındaki karşılaşılan sorunlarının çözülmesine yardımcı olacaktır. Bu amaca yardımcı olacak çözümlerden birisi olan betonda katı atık malzemelerin kullanılmasıyla da küresel sera gazı emisyonlarına önemli katkı sağlayan çimentonun özelliklerinin değiştirilmesi veya alternatif bağlayıcıların araştırıldığı birçok çalışma yapılmaktadır (El-Dieb ve Kanaan, 2018).

Çimento üreticilerinin tek başına göstermiş oldukları çabalar dahi, küresel ısınma çalışmaları ve toplantılarında önerilen CO<sub>2</sub> emisyon seviyelerini elde etmek için yeterli olmayacağı kaçınılmaz bir noktaya ulaşmıştır. Emisyon seviyelerinde en azından istenilen noktanın 1990'dan önceki emisyon seviyeleri olması ve bu noktanın altına düşürmenin değişik yöntemleri araştırılmaktadır. Bu nedenle, geliştirilmesi gerek yeni stratejilere yeni yöntemlere ihtiyaç vardır. Bu yöntemlerden birisi olarak kabul edilebilecek, çimento üretiminde bu atık malzemelerin kullanımı yanında çimentonun kullanımında verimliliğini artıracak stratejilerinde araştırması veya geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, çimento kullanımını azaltmaya yönelik en etkili yöntemlerinde tespit edilerek CO<sub>2</sub> emisyon seviyelerini azaltılmasına katkı sağlayacaktır (Damineli, Agopyan ve John, 2010).

Çevresel koruma faaliyetleri, küresel ölçekte değerlendirilmesi gereken bir sorundur. Kyoto'da 1997 yılında Japonya'da ve 2015 yılında da Paris'te düzenlenmiş olan dünya zirvelerinde alınan kararlar gereği, küresel ölçekte çevreyi korumak ve felaketleri önlemek amacıyla, CO<sub>2</sub> emisyonlarının %21 'den fazla olmaması ve bu oranın üzerindeki ülkelerin gereken önlemleri alarak azaltılmasının gerekliliği vurgulanmıştır. Dünyadaki toplam CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık % 8 ila 10'u, çimento fabrikalarındaki çimento üretiminden kaynaklanmaktadır. Çimento kireçtaşı ve kilin yüksek sıcaklıkta (yaklaşık 1500 °C) bir fırında pişirilme sürecinde havaya CO<sub>2</sub>salınımı gerçekleştirir. Her yıl beton üretimi için 1,89 milyar ton çimento ve bunun sonucu olarak ta önemli bir miktarda CO<sub>2</sub> üretilmektedir (Suhendro, 2014; El-Gamal vd., 2017)

Beton, bileşenlerine kolay erişim, yüksek dayanıklılık ve düşük bakım maliyetleri nedeniyle inşaat endüstrisinde en yaygın kullanılan inşaat malzemelerinden biridir. Doğal hammaddelerin tükenmesi ve normal Portland çimentosu üretiminin sera etkisi ve ilgili kaygıları ile birlikte dünya çapında büyük miktarlarda beton üretilmektedir. Bu açıdan, çeşitli endüstriyel veya tarımsal atık türlerinin betona ekleyerek etkin bir şekilde yönetilmesiyle ilgilenen yeşil veya sürdürülebilir beton, birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Bu çalışmaların çoğu, sürdürülebilir, yeşil ve çevre dostu beton üretmek için yüksek fırın cürufu (YFC), çelik cürufu, çimento farin tozu, uçucu kül (UK) gibi endüstriyel ürünlerin yanı sıra, çimento veya agrega yerine pirinç kabuğu



külü (PK) ve hurma yağı külü gibi tarımsal ürünlerin kullanılmasına yöneliktir. (Villaquirán-Caicedo vd., 2018; Zareei, Ameri vd, 2019).

Tarımsal atıklardan birisi olan pirinç kabuğu külü, pirinç üretilen alanlarda yaygın bir tarımsal atık yan ürünüdür. Pirinç işlemeden (kısmen enerji üretimi için) kaynaklanan kabuğun çoğu atık malzeme olarak yakılır veya boşaltılır. Pirinç kabuğu yakıt olarak kullanıldığında, biyokütle bazlı kazanlarda ve enerji santrallerinde yakılabilir. Pirinç kabuğu, yazlık, çelik, seramik ve çimento endüstrilerinin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için alternatif bir yakıt olarak kullanılabilen de bir malzemedir. Pirinç kabuğunu biyoyakıt olarak yakmak, pirinç kabuğu külü adı verilen yan ürün atığına sebep olmaktadır. Bu kül miktarı ise bir birim yakılan pirinç kabuğunun %22-25 arasında bir oranda atık ürün olan kül oluşturmaktadır (Arnold, de Vargas vd., 2017).

Bu atıkların birçoğu, birçok araştırmacıyı alternatif kullanımlarda etkilerini araştırmaya teşvik etmiştir. Ayrıca bu atıklar dışındaki inşaat sektörü atıklarının da yeniden üretime sokularak ekonomiye kazandırılmasında çalışmalar sürmektedir. Bu amaçla kontrolü üretimi yapılabilen bir beton elde etmek için farklı oranlarda seramik, agrega yerine, kullanılmış oranları test edilmiş, toplam seramik atığı oranı ve beton performansına ilişkin özellikler incelenmektedir. Doğal agregaların seramik atıklarla değiştirilmesinin, daha yüksek basınç dayanımı ve daha az çevresel etkiye yol açtığı, betonun yüksek seramik atık (SA) sıcaklıklarında doğal kaba agregaların yerini almak için kullanılan geri dönüşümlü beton agregaları ile incelendiği görülmüştür (Huseien vd., 2018; Darsanasiri vd., 2018).

Sürdürülebilir yapı malzemelerinin üretilmesinde, bu atıkların çevreye verdiği zararların yok edilmesi ya da kabul edilebilir bir düzeye indirgenmiş malzemelerin kullanılmasıdır. Bu nedenle bu çimento üretiminden kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltacak bir alternatif geopolimer beton üretimi ve geopolimer betonda da bu atıkların kullanılarak çevresel etkilerin minimuma indirgenmesi öngörülebilir. Bu amaçla düşünülebilecek geopolimer beton ise, geleneksel betona alternatif olarak kullanılabilme potansiyeli olan ve çevresel açıdan sürdürülebilir inşaatta önemli bir unsur oluşturan inorganik polimerik bir bileşiktir. Genellikle UK ve YFC gibi endüstriyel alümina silikat esaslı atık maddelerinin alkalın aktivasyonu ile üretilir

(Darsanasiri vd., 2018). Geopolimer yeni bir inorganik bağlayıcı malzeme türüdür ve üretiminde önemli nokta moleküler seviyede bağlanma yeteneğine sahip alkali aktivasyonu sahip malzemelerin gerekli şartlar altında bir araya getirilmesiyle üretilen ve sahip olduğu bu bağlayıcılık özelliği ile Portland çimentosu gibi bazı geleneksel yapı malzemelerine potansiyel bir alternatif olarak kullanılabilen bir malzemedir. Son zamanlarda, geopolimerler sahip oldukları mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri ile inşaat sektörünün ve sürdürülebilir kalkınmanın olası pratik kullanımı nedeniyle kapsamlı bir şekilde incelenen bir malzeme olmuştur (Živica vd., 2015). Tanım olarak "Geopolimer" terimi ilk kez 1978'de Davidovitz tarafından zeolit benzeri metal bağlayıcılar ailesini tarif etmek üzere, ancak amorf bir mikroskobik yapı ve kimyasal bir bileşime sahip olmak üzere tanımlanmıştır. Portland çimentosunun aksine, geopolimerler silis ve alüminyum matrisi ve dayanımını oluşturmak için kalsiyum silikat hidrat (CSH) oluşturmaz, fakat yapısal dayanımı elde etmek için öncül yoğunlaşma ve alümina jellerini kullanır. Geopolimerlerin iki ana bileşeni bağlayıcı malzemeleri ve alkali çözeltilerdir. Bağlayıcı malzemeleri alümina silikat esaslı ve silisyum (Si) ve alüminyumca (Al) zengin olan uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), yüksek fırın cürufu (YFC), kırmızı çamur vb. gibi malzemeler sayılabilir. Diğer alümina silikat materyalleriyle karşılaştırıldığında benzersiz olan geopolimerizasyon alümina silikat jelinde, zeolit sentezinden daha yüksektir (Rajamane vd., 2016; Darsanasiri vd., 2018; Damineli vd., 2011; Komnitsas, 2011)

Geopolimerler inorganik malzemeler olup, ticari olarak üretilen geopolimerler kaplamalar, refrakterler ve yapıştırıcılar için kullanılabilir. Geopolimerler iki ana grupta sınıflandırılırlar: saf inorganik geopolimerler ve doğal olarak oluşan büyük moleküller içeren organik geopolimerler. Genellikle uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), pirinç kabuğu külü (PK), yüksek fırın cürufu (YFC), kırmızı kil vb. geopolimer yapımında kullanılan malzeme kaynağı olarak seçilebilen, uygunluk, maliyet, tip, uygulama ve spesifik gibi faktörlere bağlı olarak ta değişiklikler gösterebilen malzemeler olarak sayılabilir. Geopolimerizasyonda kullanılan en yaygın alkali çözeltiler NaOH kimyasal sembolü ile gösterilen sodyum hidroksit (SH) veya KOH ile gösterilen potasyum hidroksit ile  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  kimyasal sembolü ile gösterilen sodyum silikat (SS) veya  $\text{K}_2\text{SiO}_3$  potasyum silikat karışımıdır. Yüksek alkali koşullar altında, hızlı ve serbest reaktif silikat alüminatlar çözelti içinde salınan tetrahedral üniteleri çözdüğü

zaman bir alkalın hidroksit çözeltisi ve silikat varlığında polimerizasyon meydana gelir. Geopolimer çerçevesi, bu yapıların birbirine bağı olmasından kaynaklanır (Damineli vd., 2011; Komnitsas, 2011).

Geopolimer beton üretiminde en önemli unsur  $\text{SiO}_2$  oranı yüksek malzeme kullanılması olup, pirinç kabuğu yanmasının bir silis kaynağı ( $\text{SiO}_2$ ) olarak pirinç kabuğu külü de çalışmalara konu olmuştur (Shalini vd., 2016). Bu çalışmanın amacı, geopolimer betonun çimento fabrikalarından kaynaklanan karbondioksit emisyonlarını azaltmadaki önemi ve  $\text{CO}_2$  emisyonu daha az olan çimento özelliklerine sahip ve daha ucuz ve çevreye zararlı olmayan malzemelerin bulunması amacıyla atık seramik tozu (ST) ve pirinç kabuğu külünün (PK), geopolimer beton içinde kullanılabilirliğinin ve ideal kullanım oranlarının araştırılmasıdır.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

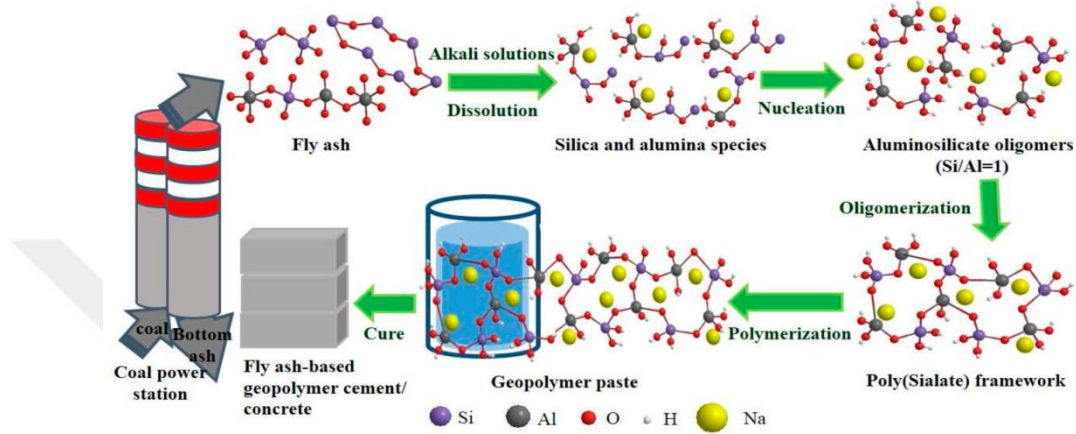
### 2.1. Geopolimer Beton

Geopolimer beton, atık malzeme olarak kabul edilen bileşenlerden en az birisini kullanan veya üretim sürecinde çevreye zarar vermeyen beton olarak tanımlanır. Aynı zamanda yüksek performans ve kullanım ömrüne sahiptir. Başka bir deyişle geopolimer beton çevre dostu bir malzeme olup, sürdürülebilirlik aşamasında: çevresel, ekonomik ve sosyal etkileride olan bir malzemedir (Suhendro, 2014). Geopolimer, düşük emisyon ve düşük enerji tüketimi gibi sürdürülebilirlik kriterleri nedeniyle bazı uygulamalarda geleneksel Portland çimentosu (OPC) ile potansiyel bir alternatif bağlayıcı haline gelmiştir. Geopolimerler, alkali çözünen alüminyum silikattan yapılmış üç boyutlu Si-O-Al çerçeveli inorganik malzemelerdir. Bu, bir geopolimerin inşaat malzemesi olarak kullanılmasını sağlar (Liew vd., 2017).

Çimento üretimi sırasında yayılan CO<sub>2</sub> miktarını azaltmak için geopolimer beton kullanılabilir ve geopolimer teknolojisi, çimento ve agrega kaynaklı atmosferik karbondioksit emisyonlarını % 80 azaltılabilir bir malzemedir. Ayrıca basınç dayanımı, yüksek asit direnci, düşük büzülme gibi yüksek mekanik özellikler gösteren bir malzeme olması avantajlar sağlamaktadır. İlk olarak 1940'tan bu yana alkali çözeltilerin (Na, K) hidrasyon sürecini hızlandırdığı ve betona zarar vermelerine rağmen yeni hidrasyon ürünlerinin işlemini kolaylaştırdığı keşfedilmesi ile tarihsel süreçte araştırma konusu olarak yerini alan bir malzeme olmuştur (Al Muhit vd., 2013). Ancak son yıllarda artan araştırmalar ile birlikte, polimerizasyon süreci (Şekil 2.1) ile elde edilen ve geopolimer adı verilen bu malzeme silis tozları veya silika alüminat, metakaolin, uçucu kül gibi malzemeler ile konsantre alkalın çözeltileri (KOH, NaOH) arasındaki kimyasal etkileşimler sayesinde elde edilen yeni nesil bir bağlayıcı olarak bilinmektedirler (Fleuryvd, 2017).

Geopolimer kimyasal yapısı itibari ile bilinen bir malzeme olmasına rağmen, tipik örnekler genellikle şekilsiz ve organik polimer sistemlerine benzer boyutsal yapılarla sahiptir. YFC gibi kalsiyum bakımından zengin sistemlerde, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli, çimentonun hidrasyonu sırasında oluşan sistemlerde etkilidir. Kullanılan

SiO<sub>2</sub> zengin toz bağlayıcı ile aktivatör ve işleme koşullarına bağlı olarak, asitlere ve diğer kimyasallara daha iyi direnç gösteren geopolimerler, iç yapılarına zarar vermeden 1000 ila 1200 ° C arasındaki sıcaklıklara dayanan düşük alkali değerlerde sergiler ve genişleme, sülfat ve korozyon direnci yüksek olan bir malzeme olarak bilinirler (Erdoğan, 2014) .



Şekil 2.1. Geopolimerin kimyasal bileşimi

Genel olarak, uçucu kül kullanılan geopolimerlerin sıcaklığa maruz kaldıktan sonra mukavemetinde bir artış gösterdiği bulunmuştur. Polimer betonun yüksek sıcaklık altındaki davranışı toplam hacimden etkilenmiştir. Daha küçük bir toplam hacim (10 mm'den az), geopolimerin yoğun çatlamasının yanı sıra dağılmaya yol açabilir, ancak daha büyük agregalar (10 mm'den fazla) daha kararlıdır. Öte yandan, geopolimer matris ve agrega bileşenleri arasındaki termal uyumsuzluk, geopolimer beton numunelerindeki yüksek sıcaklıklarda mukavemet düşüşünün en olası nedenidir. (Živica vd., 2015).

SiO<sub>2</sub> oranı yüksek olan endüstriyel yada diğer atıkların bir kısmının geopolimerlerde kullanımı, artan dayanım ve dayanıklılık özellikleri, azaltılmış inşaat maliyetleri, karbondioksit emisyonlarını azaltma ve kirleticileri kolayca ortadan kaldırmak gibi çevresel faydalarının olması gibi birçok avantaj sağlamaktadır (Al Muhit vd., 2013; Thomas, 2018).

## **2.2. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler**

Bu bölüm, pirinç kabuğu külü (PK) ve atık seramik tozu (SP), yüksek fırın cürufu (YFC), NaOH-sodyum hidroksit (SH) ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>-sodyum silikat (SS) katkı maddeleri gibi malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi içermektedir.

### **2.2.1. Agregalar**

Kullanılan agregalar kategorizasyonu, 4,75 mm veya daha büyük bir partikül boyutuna ve ince 4,75 mm veya daha küçük bir partikül boyutuna sahip agregalardır. İnce agregalar (kum) harç ve beton oluşumu için önemli bir malzemedir ve tasarım karışımının en önemli bölümünü oluşturur. İnce agregalar, betonun önemli bir bileşenidir ve belirli bir beton karışımının hızı ve cinsine göre, beton oluşturmak için kullanılan ince agreganın özellikleri belirlenir (Dash, vd. 2016; Awoyera, vd., 2018). Toplam yapı ve pasta ile agregalar arasındaki ısıl uyumluluk, betonun yüksek sıcaklıklara maruz kalma davranışını önemli ölçüde etkiler. Silikat agregaları (kuvars kumu, kumtaşı ve granit), kuvars kumunun inversiyonundan dolayı betonda yaklaşık 573 ° C'de hafif bir artışa neden olabilir. (Sun, Feng ve Chen, 2019).

Beton, katı çimento karışımına gömülü ince agregalar ve kaba agregalardan oluşan, toplam parçacıklar arasındaki boşluğu doldurup hepsini birleştiren kompozit bir malzemedir. İnce agregalar ve kaba agregalar bir beton iskeleti oluşturur ve genellikle hacmin % 60-75'ini kaplar. Dünyada bir insan için yılda ortalama bir ton beton üretilmektedir. Her yıl, betona olan talep artmakta ve beton malzemeleri üzerindeki baskı talepleri karşılamaya yöneliktir (Yaragal, vd., 2019). Agregalar ayrıca endüstriyel veya doğal atıkların tam olarak kullanılması ve ortadan kaldırılması için geleneksel bileşenlere bir alternatif olarak kullanılabilirler (Cong ve Zhou, 2018).

### **2.2.2. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)**

YFC inşaat mühendisliğinde kullanılabilen, ekonomiye kazandırılabilen yeni kullanımı olan ancak geri dönüştürülmüş bir malzeme değildir. Demir üretiminde ve fırınında ilave bir ürün olarak geri dönüştürülmüş bir pozzolonik malzemesidir. Cüruf

demir yapım işleminin bir parçası olarak kullanılan malzemelerden geriye kalan bir malzemedir (Ash, 2011). Kısaca YFC, demir üretiminin bir yan ürünüdür ve düşük demir ile cüruf oluşmakta ve enerji olarak kok tüketilmektedir. YFC hafif bir malzeme olup, erimiş "sıvı" üzerinde yüzer. YFC ağır demirden ayrıldığında, cüruf hızlı bir şekilde çekilir veya yüksek basınçlı ve yüksek hacimli su spreleri ile söndürülür, böylece granül fırın cürufu işlendiğinde ısı enerjisinin erimiş YFC içine patlaması ve granül bir fırın cürufu oluşması sağlanır. Geleneksel çimento klinker öğütme tekniği kullanılarak öğütüldüğünde (Tablo 2.1) ise pozzolonik bir özellik kazanır (Zhang, 2014).

Tablo 2.1. ASTM C618-03, (2003)'e göre YFC'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Oksit	%	EN 15167-1
SiO <sub>2</sub>	36.7	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.2	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.98	
CaO	32.61	
MgO	10.12	<18%
SO <sub>3</sub>	0.99	< 2 %
K <sub>2</sub> O	0.76	
Na <sub>2</sub> O	0.42	
SO <sub>4</sub>	0.19	< 2.5%
Nem oranı, max,	2.88	< 3%
Spesifik yüzey alanı cm <sup>2</sup> /g	4250	>2750
Spesifik ağırlık	2.88	
Cam içeriği	Vol. %	> 2/3
CaO + MgO)/SiO <sub>2</sub>	M. %	>1
Tutuşma kaybı	M. %	< 3.0

Yüksek sıcaklıkta bir çelik üretim tesisinin bir yan ürünü olan YFC, parçalar halinde öğütülür ve betonda geleneksel kaba agrega ile birlikte ince ve kaba agrega olarak kullanılır. Nehir kumu, geleneksel bir ince agrega olarak ve ezilmiş granit gibi geleneksel bir kaba bileşik olarak kullanılır. Standartlara ek olarak, tüm agregaların, iyi doğal agregaların ve cürufların farklı özellikleri de gereksinimlere göredir. YFC agregası için kırma ve korozyon değerleri standart değerlerden daha yüksektir. YFC agregatının su emilimi, kırılmış granit emiliminden çok daha yüksektir ve ayrıca tarif edilen standart değerleri aşmaktadır. Cüruf agregası, beton işlerinde kullanılmadan önce iyi incelenmelidir (Devi ve Gnanavel, 2014).

### 2.2.3. Pirinç Kabuğu Külü (PK)

1960'ların sonlarından bu yana karışımdaki malzemelerin yerine yer değiştirilerek pirinç kabuğu külünün kullanımı veya çimento'nun kısmi ikamesi olarak ya da sadecegeopolimer betonunda kullanımı hakkında çok sayıda araştırma ve patent yayınlanmıştır (Thomas, 2018). Birçok kullanım alanı bulunan PK üretimi potansiyeli için pirinç hasadı oranlarına bakıldığında dünyada yılda beş yüz milyon ton olarak üretimi yapıldığı tahmin edilmektedir. Pirincin % 20'sinin kabuk olduğu ve kabuk miktarının da 1/5'nin küle dönüştüğü göz önüne alındığında, toplam yirmi milyon ton kül elde edilebilir. Pirinç kabuğu yanarken potasyum, sodyum, magnezyum, kalsiyum, demir ve fosforu ve çok az miktarda bakır, demir, manganez vb. ortaya çıkabilir. Büyük miktarlarda pirinç kabuğu ve pirinç kabuğu külü hala dünyada sanayide kullanılmaktadır. Sonuç olarak, pek çok olası pirinç kabuğu külünün endüstriyel uygulamaları mevcuttur (Soltani, vd., 2015).

Pirinç kabuğu külü, iyi bir puzolan malzemesidir ve hammaddenin nereden geldiğine, yanma yöntemine, zamana, süreye ve sıcaklığa bağlı olarak rengi siyah ile beyaz arasında değişkenlik gösterir. Çiğ pirinç kabuğu, dakikada 10 °C'den başlayarak ve altı saat boyunca kademeli olarak dakikada 700 °C'ye yükselen, daha sonra oda sıcaklığına soğumaya bırakılan kontrollü bir sıcaklıkta fırına bırakılmak suretiyle bir yanmaya tabi tutulabilir. Organik maddenin pirinç kabuğundan uzaklaştırılmasından sonra, silisin ortaya çıkması için en az 402 °C sıcaklıkta ısıtılması gerekir. En reaktif silis, 500 °C'de yanma ile elde edilebilir. Yanma koşullarının çimento'nun mekanik davranışı üzerindeki etkileri ise araştırılması gereken bir konudur. Pirinç kabuğunun. Sıcaklık yükseldiğinde, PK'da ayrışıp daha fazla karbon üretebilir. ASTM C618, puzolanın çimento ve betonda kullanımını belirtir ve literatüre göre, PK bir puzolan tipi olarak sınıflandırılmaktadır (Thomas, 2018; Hafez, vd., 2017).

Pirinç kabuğu, pirinç öğütmenin önemli bir yan ürünüdür ve her yıl dünya çapında büyük miktarlarda üretilmektedir. Silis, pirinç kabuğunda şekilsizdir. Bu nedenle pirinç kabuğu, doğal ve yenilenebilir bir silis kaynağıdır. Günümüzde pirinç kabuğu, büyük miktarda pirinç kabuğu üretimi ile sonuçlanan yerlerde kurulmuş enerji veya elektrik üretmek için gerekli tesislerde doğrudan yakılmaktadır (Zou ve Yang, 2019).



PK 'nın harç ve betonda kısmi olarak çimento yer değiştirilerek kullanıldığında:

- 1) Yandığında, pirinç kabuğunun yüzde seksenin üzerinde silis üretebilir.
- 2) PK çok gözenekli bir malzeme olması nedeniyle betonda kullanımında artıştan dolayı çimentoya su yüzdesinde yaklaşık bir artış gerektirir.
- 3) Beton üretim kapasitesi artan PK değişimi ile azalır.
- 4) PK insanlara zararlı olsa da, pirinç kabuğu külü maliyeti sıfırdır, bu nedenle, PK'nın silis dumanlarına kıyasla betonda kullanılmasını tercih edilir.
- 5) PK betonun işlenebilirliği azaltılmakta iken UK betonun uygulanabilirliğini arttırmakta, böylece PK ve UK betonun işlevselliğini arttırmak için betonda beraber kullanılmalıdır.
- 6) PK daha fazla silis içerir, bu yüzden betonu güçlendirmek için betonda kullanılan silis dumanı yerine pirinç kabuğu külü tercih edilebilir (Shalini ve diğerleri, 2016; Zou ve Yang, 2019).

Pirinç kabuğu yakmak için kullanılan pirinç kabuğu külünün normalden farklı olarak değiştirilmiş bir yakma fırınında yapılabilmektedir. Yakma fırınının çalışma prensibi yaklaşık 300 - 400 ° C'de karbonizasyondan ve yaklaşık 600 - 800 °C'de yakılmadan oluşur. İşlemin süresi, işlenmiş pirinç kabuğunun kütlesine bağlıdır ve 500 kg pirinç kabuğu kütlesi işlendiğinde yaklaşık 800 gram PK meydana getirir bu işlem 10 saat ile 3 gün arasındadır. Zamanlar ve sıcaklıklar, PK 'nın amorf içeriğini arttırmaya yöneliktir, yüksek sıcaklıklar ve kısa zamanlar SiO<sub>2</sub> oluşumuna neden olur. Ticari olarak temin edilebilen kristalimsi amorf >% 95SiO<sub>2</sub> içeriğine sahiptir (Medina vd., 2018; Tong, Vinai ve Soutsos, 2018; Shalini vd., 2016).

Pirinç kabukları ılıman bir sıcaklıkta yakıldığında ise, üretilen beyaz kül, yaklaşık yüzde 92-97 oranında amorf silika içerir (Matori vd., 2009).

PK ile SS sistemi, geopolimer beton ve beton malzemelerin sürdürülebilirliğini artırmak için uygun ve temiz bir çözüm olarak görülmektedir (Kamseu ve ark., 2017). Geopolimer kompozitlerde PK, YFC, SH, SS ve kum karışımları olarak üretilebilir (Kaur, Singh ve Kaur, 2018).Pirinç kabuğu ve PK, çeşitli uygulamalarla yüksek kalitede silisin önemli kaynaklarıdır. Birçok silis uygulaması için yüksek saflık gereklidir. Silisin ısı yalıtıcıları, ateş tuğlası, yarı iletken, seramik, polimerler ve malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılan temel bir hammaddedir (Sánchez vd., 2017; Soltani vd., 2015).

#### **2.2.4. Atık Seramik Tozu (ST)**

Seramik, kilden yapılmış bir üründür ve karıştırılması, kalıplanması, kurutulması ve yakılmasıyla işlenen hammaddesi kuvarsdır. Günlük seramik üretiminin %30, inşaat endüstrisinde duvar ve zemin için kullanılan popüler bir malzeme olan inşaat seramikleri oluşturmaktadır. Bu malzemenin oluşturduğu atıklar ise günümüzde %100 yeterince geri dönüştürülmemektedir (Subaşı, Öztürk ve Emiroğlu, 2017).

Seramik malzemeler uzun süredir kullanılan ve seramik kaplar (tabaklar ve bardaklar), sıhhi tesisat malzemeleri (tuvaletler ve lavabolar) ve yüksek gerilim yalıtkanları gibi ürünlerin yapımında kullanılan ortak bir malzemedir. Seramikler ayrıca seramik döşeme, fayans, duvar ve farklı kil oluşturan tuğlalar gibi inşaat malzemeleri olarak da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu, küresel ölçekte toplumun sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkınmaya daha fazla odaklandığı bir zamanda, kalkınmanın sürdürülebilirliği arttırmanın bir parçası olarak önerilen ortak strateji, çevreyi korumak için atıkların azaltılması, yeniden kullanımı ve geri dönüşümüdür (Anderson, Smith ve Au, 2016; Medina, Frías ve Sánchez De Rojas, 2012).

Kullanılan seramik malzemeler, yıkılan duvarlardan, yıkımlardaki seramik kaplı alanlardan ve fayanslardan elde edilebilir. Seramik atık, karakteristik atık geri dönüşüm programında nelerin kullanılması gerektiğini temsil eder ve harç ve harç ilavesiyle kullanılan kırık duvar karolarından oluşur(Anderson ve diğ., 2016; El-Dieb ve Kanaan, 2018).

Dünya genelinde seramik endüstrisinde üretilen seramik ve kiremit atığı, malzeme kaynağı kaybını temsil eden atık depolama alanlarına atılmaktadır. Aynı düşüncede ki, inşaat sektörü de beton üretimi için çimento ve agrega tedarik etmede büyük miktarda doğal kaynak tüketmektedir (Penteado ve Vi 2016; Hwang, vd., 2019). Bu durumun azaltılmasında kullanılabilir ST, inşaat sektöründen veya fabrikadan elde edilir. (Huseien ve diğerleri, 2018; Hwangvd, 2019; Hafez ve diğerleri, 2017; Mistry, 2016). Sonuç olarak ST, PK, YFC vb. atık malzemeler, inşaat endüstrisi atık ürünlerinin beton üretiminde yeniden kullanımı, çevre dostu bir malzeme olmasını sağlar, atık birikimini azaltır ve içerdiği enerjiyi kullanır (El-Dieb ve Kanaan, 2018).

### **2.2.5. Alkali Aktivatörler**

Sodyum silikat ile kombinasyon olan, sodyum ve / veya potasyum hidroksitinin etkisine ile doğal alümina silikatların aktivasyonu konusunda yeterince araştırma yapılmamıştır. KOH, NaOH'den daha iyi reaksiyon etkilerine sahip olma eğilimindedir. Mineraller, KOH çözeltisine kıyasla, özellikle NaOH ile artan konsantrasyonlarda alkaline ile daha fazla çözünme kabiliyetine sahip olma eğilimindedir. Bu mineraller aynı zamanda ikincisinde geopolimerizasyondan sonra daha fazla basınç dayanımına sahip malzemeler oluşturabilirler. Bu alkali-aktive edilmiş malzemeler, OPC'ye dayalı bağlayıcıların aksine, daha iyi özelliklere sahip olacak şekilde düzenlenebilir ve asitlere, sülfata, ısıya karşı geliştirilmiş direnç ile geliştirilen mukavemet ile kuruma ve büzülmenin azalması gibi avantajlara sahiptir (Ren vd., 2019).

Ticari katı sodyum silikatların modülü ( $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$  molar oranı), yayınlanan bir kısım geopolimer çalışmalarında 0.93 ile 3.32 arasında değişmiştir. Susuz sodyum metasilikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , modül 0.93), sodyum sülfat ve spesifik olmayan sulu sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-NH}_2\text{O}$ , modül 2.06) 'dan daha yüksek basınç dayanımı ve daha iyi işlenebilirlik sonucu vermiştir (Albitar, vd., 2017; Walkley, vd., 2020).

### **2.3. Literatüre Ait Bazı Çalışmalar**

Yaseri, Masoomi Verki ve Mahdikhani (2019) ikili bağlayıcı esaslı geopolimer karışımı yapmakta sürdürülebilir bir öncü olarak sınıflandırılan tehlikeli katı atık

madde olan Çimento Fırın Tozu (CKD) ve Silika Dumanı (SF) kombinasyonunun kullanılmasının fizibilitesini araştırdı. Ayrıca, standart ticari sodyum silikat ile sürdürülebilir malzeme kullanımında amorf silika hazırlamak için ana kaynak olarak pirinç kabuğu külü (RHA) kullanımışlardır. Bu çalışmada,  $\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2$  ve  $\text{H}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O}$  mol oranını ayarlamak ve etkilerinin incelenmesi için 10 M sodyum hidroksit çözeltisi (NaOH) ile kombinasyonu ile bir alkalın aktivatör çözeltisi hazırlanmış ve etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, RHA-NaOH'den yapılan alkalın aktivatör çözeltisinin, taneciklerin çözülmesi ve geopolimerizasyon reaksiyonunun başlatılması için büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca Sonuçlar, geopolimerin priz süresinin SF / CKD oranını değiştirerek modifiye edilebileceğini göstermiştir. Sturm vd. (2016) çalışmalarında, RHA'nın tek parçalı geopolimerlerin sentezi için başarılı bir şekilde uygulanabileceğini, RHA bazlı geopolimerler, diğer silika malzemelerine dayanan tek parçalı geopolimerlere kıyasla, özellikle silis besleme stokunun neredeyse tamamen reaksiyonu ve nispeten yüksek bir basınç mukavemeti ile karşılaştırıldığında bazı geliştirilmiş özellikler sağlayabildiğini ifade etmişlerdir.

Mehta ve Siddique (2018), sürdürülebilir geopolimer betonun geliştirilmesi için öğütülmüş tanecikli yüksek fırın cürufu (GGBS) ve pirinç kabuğu külü (RHA) gibi endüstriyel yan ürünlerin kullanımını incelemiştir. GGBS esaslı geopolimer beton karışımı hazırlanmış ve 90 güne kadar GGBS'nin kısmi ikamesi olarak RHA eklenmesinin basınç dayanımı, çekme dayanımı, klorür geçirgenliği ve kapilarite üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, yaklaşık 60 MPa üzerindeki 3 günlük basınç dayanımı ile GGBS ve RHA kullanarak geopolimer betonun geliştirilebileceğini göstermiş, ve RHA % 15'lik bu optimum içeriğin ötesinde dahil edilmesi olumsuz sonuçlar gösterdiği aktarılmıştır.

Çalışmada Liang vd.(2019), metakaolinin kısmi ile yerdeğiştirilen (% 40'a kadar) pirinç kabuğu külünün, metakaolin bazlı bir geopolimerin termal stabilitesi ve mikro yapıları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, RHA'nın alüminosilikat fraksiyonlarının geopolimerizasyonun asit-baz reaksiyonu ile ilişkili olduğunu ve daha fazla jel oluşumunu teşvik ettiğini göstermiştir. Ayrıca RHA ile karıştıran geopolimer, yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra OPC macununa kıyasla mükemmel kapsamlı bir performans sergilediği açıklanmıştır. Çalışma, % 30 RHA

ilavesinin, yüksek sıcaklık etkisinden önce veya sonra geopolimerin mukavemetine en iyi katkıyı sağlayacağı sonucuna varmıştır.

Villaquirán-Caicedo ve de Gutiérrez (2018) çalışmasında, metakaolin, KOH ve pirinç kabuğu külü ve silis dumanı gibi çevre dostu silika kaynakları kullanılarak üretilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, geopolimerlerin geliştirilmesinde silis kaynağı olarak RHA ve SF kullanımının mümkün olduğunu göstermiştir; dolayısıyla, RHA ve SF, daha düşük karbon ayak izi üretmek için teknolojik açıdan ilgi çekici malzemelerdeki ticari potasyum silikatın yerine kullanılabilir bir malzeme olduğu açıklanmıştır.

Shalini vd. (2016) Betonun, RHA yüzdesindeki artış nedeniyle su çimento oranında yaklaşık artış gerektirdiğini bildirmiştir. Çünkü RHA son derece gözenekli bir malzemedir ve bu da RHA betonunun işlenebilirliğini azaltmaya neden olmuştur. Ayrıca çalışma, pirinç kabuğu külünün daha fazla silika içerdiğini ve dolayısıyla gücü arttırmak için betonda pirinç kabuğu kül kullanımını silis dumanından daha fazla tercih ettiğimizi, uçucu kül ve pirinç kabuğu bazlı betonun daha düşük basınç mukavemeti gösterdiğini ve GGBS'nin ise yaklaşık % 10, mukavemet artışına neden olduğunu bildirmişlerdir.

Kamseu vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, karışım tasarımında standart ticari sodyum silikatın yerini almak için kullanılan sodyum silikat çözeltisinin (MR-3) üretimi için amorf silika ana kaynağı olarak RHA kullanılmıştır. Geopolimerizasyon sırasında bir bağlayıcı olarak işlev görebilen silis optimum çözünmesi ve oluşumunu araştırmak amacıyla üç başlangıç NaOH konsantrasyonu (8, 10 ve 12M) dikkate alınmıştır. (FT-IR ve XRD) sonuçları, RHA-NaOH ve sodyum silikat çözeltilerinin standart ticari sodyum silikata benzer özelliklere sahip olduğunu ve viskoz macunlarda bulunan artık karbonatların, karışım tasarımı kullanılarak geopolimerlerin hazırlanması sırasında izlenebileceğini göstermiştir. Hacimce % 25 sodyum silikat çözeltisi, iyi polikondensasyon, yoğunlaştırma, yüksek eğilme mukavemeti testi (~ 8 MPa) ve düşük gözeneklilik için gerçekleştirilen, % 75 hacim bazlı RHA-NaOH sodyum silikat çözeltisi ile karıştırılmıştır. Alkali aktivatörün bağlanma oranı (AAB)

ve alkalın aktivatörün molaritesinin pirinç kabuğu külü bazlı geopolimer üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur,

Kaur, Singh ve Kaur (2018). basınç dayanımı 0.5 ila 0.7 arasında değişen AAB oranındaki 12 M ila 16 M arasında alkali aktivatör çözeltisinin molarite etkisi incelenmiştir. Basınç dayanımının hem AAB oranı hem de alkali aktivatör çözeltisinin molaritesi ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Molaritenin artmasıyla mikro yapı oldukça yoğunlaştığı, nedeni ise yüksek derecede geopolimerizasyon nedeniyle açıklanmıştır.

Liew vd.(2017) ön kürlenme ve toz haline getirme yoluyla geopolimer hazırlanmış ve tek parçalı karıştırma işlemlerinin geopolimerlerinin yanı sıra yüksek eğilme mukavemetli geopolimer seramiklerin üretilmesi için büyük bir potansiyel olabileceğini ifade etmişlerdir. Bu çalışmada, tek parçalı karıştırma geopolimerleri, 28 gün sonra zeolit fazları ile birlikte geopolimer çökeltilerinin oluşumu ile 10 MPa'lık bir basınç mukavemeti elde etmiştir. Düşük mukavemete rağmen, kararlı kalabilen ve suya batırıldıklarında dağılmayan geopolimer seramikler yüksek eğilme mukavemeti (90 MPa) sergilemiştir.

Tong, Vinai ve Soutsos (2018) öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (GGBS), metakaolin, uçucu kül (FA) gibi vitroz silika ve alümina bileşenleri içeren bir alüminosilikat kaynağından Alkali Aktifleştirilmiş Bağlayıcılar (AAB) üretmişlerdir. Sodyum silikat, AAB ve geopolimer betonda bir alkalın aktivatörü olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle, en yüksek mekanik mukavemet gelişimi ile birlikte, kararlı ve yoğun bir yapı ile ilişkili azaltılmış geçirgenlik ile sonuçlanır. Bununla birlikte, sodyum silikat kullanımı, somutlaştırılmış enerjiyi önemli ölçüde artırır. Ayrıca harçların basınç dayanımı 28. günde 60 MPa aralığında bulunmuştur.

Nuaklong vd. (2019), ısı ile sertleşmeden kurulabilen ve sertleşebilen yüksek kalsiyum uçucu külünden yapılmış geri dönüştürülmüş agregat geopolimer betonunun (RAGC) performansını artırmak için nano-SiO<sub>2</sub>'nin zengin kabuk külüyle değiştirilmesinin etkinliği araştırıldığı bu çalışmalarında, RHA ilavesinin, özellikle SiO<sub>2</sub> / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı 4.17'ye yükseldiğinde, RAGC'lerin mukavemetinin artırılmasında etkili olduğunu

göstermiştir. Geliştirilmiş mikroyapı ve daha yoğun matris nedeniyle RHA'lar içeren 28 günlük RAGC'lerin basınç dayanımları 36.0 ila 38.1 MPa arasında değişmiş ve nS ile yapılan RAGC'lerinkile karşılaştırılabilir olmuştur. Bununla birlikte, SiO<sub>2</sub> bakımından zengin malzemelerin dahil edilmesi, esas olarak azaltılmış gözenekliliğe bağlı olarak geri dönüştürülmüş agregatlardan yapılan geopolimer betonlarının yangın sonrası mukavemeti üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduklarını ifade etmişlerdir.



### **3. MATERYAL VE YÖNTEM**

#### **3.1. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler**

Bu bölümde, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (YFC), pirin kabuğu külü (PK), seramik tozu (ST), sodyum hidroksit (SH), sodyum silikat (SS), su ve deneysel çalışmada kullanılan agrega gibi malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri açıklanmıştır.

##### **3.1.1. Agregalar**

Bu çalışma kapsamında, geleneksel olarak bir ince agrega (kum) olmak üzere maksimum tane çapı 4,75mm olan 2 ince agrega karışımı kullanılmıştır. Beton hacminin yüzde 70'ini oluşturan agregalar, geopolimer beton üretimindeki ince agrega ana bileşenlerinden biridir (Devi ve Gnanavel, 2014; Cong ve Zhou, 2018). Betondaki gerekli bileşen, nadiren toplam hacmin yaklaşık yüzde 65-80'ini kaplar ve bu durumun betonun performansı üzerindeki etkisi önemlidir.

Agregalar, 4.75 mm partikül boyutuna göre kaba ve ince agregalara ayrılır. Betonda güçlü bir yapı oluşturabilir ve beton ölçüsünün dengesini artırabilir, bunun sonucunda da büzülme azalır ve betonun aşınma direncini artırır. Beton performansını artırmak için özel betonlarda özel agregalar kullanılabilir. Ek olarak, yüksek kaliteli agregalar, geopolimer betondaki çimento gibi bağlayıcı miktarını azaltabilir. Doğal kum, beton hazırlığında yaygın olarak kullanılan geleneksel bir ince agrega türüdür (Sun vd., 2019).

Bu çalışmada kullanılan kum, ince agrega olarak 0 - 2 mm arasında değişen partikül büyüklüğüne sahip normal kuvars kumu ve ayrıca Kastamonu İlinde yerel olarak bulunabilen 0 - 4,75 mm ince kalker esaslı agregalardan oluşmaktadır. Kullanılan agregaya yönelik fiziksel özellikleri Tablo 3.1'de ve kullanılan agregalar Şekil 3.1 verilmiştir.



Tablo 3.1. Agregaların fiziksel özellikleri

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



Şekil 3.1. Geopolimer üretiminde kullanılan agrega

### 3.1.2. 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 3.2'de sunulmuştur. Kullanılan öğütülmüş garüle yüksek fırın cürufunun (YFC), görünüşü Şekil 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. 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
<b>Fiziksel gereksinimi</b>			
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
<b>Mineralojik özellikleri (%)</b>			
Cam içeriği	100,00	-	TS EN 196-2
LOI	0,09	Max, 3,0	TS EN 196-2



Şekil 3.2. Öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (YFC)

### 3.1.3. Pirinç Kabuğu Külü (PK)

1990'lı yıllarda endüstriyel uygulamalar için doğal liflerin kullanımı hızla artmaya başlamıştır. Doğal liflerin kullanımındaki son gelişmeler hakkında birkaç yazar, pirinç kabuğunun, bileşenlerde yanmadan sonra PK'nın çok fazla silise sahip olduğunu bildirmiştir (Soltani vd., 2015). Pirinç kabuğu (RH), pirinç üreten ülkelerde bol miktarda tarımsal bir atıktır ve yüksek silisli bir malzemedir. Düşük fiyatı ve diğer doğal elyaflardan daha yüksek silika içeriği nedeniyle tercih edilir (Matorivd, 2009; Soltanivd, 2015). Pirinç kabuğundan yüksek oranda reaktif silis üretimi, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla birçok avantaja sahip basit bir işlemdir (Sánchez vd., 2017).

- **Pirinç kabuğu külünün hazırlanması**

Pirinç kabuğu külünün hazırlanması laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir ve pirinç kabuğu Türkiye'de üretimi yeterince yapılan Kastamonu ili Tosya ilçesinden temin edilmiştir. Yakma metodu ile büyük bir kaba konulmuş (Şekil 3.3) ve ateşe konulup külün bu şekilde soğutulması için bütün gün boyunca bırakılmıştır (Şekil 3.3). Pirinç külü dikkatlice alınmış ve pirinç külü elde ettikten sonra mümkün olduğunca karbon tabakasından kaçınılmıştır. Pirinç kabuğu külü halkalı öğütücüye (Şekil 3.4), istenilen inceliği elde etmek için taşlama halkasına bir miktar koyulmuş, 60 saniye bekletilmiştir.



Şekil 3.3. Pirincin yakılma süreci



Şekil 3.4. PK öğütülmesinde kullanılan halkalı değirmen

Tablo 3.3. PK'nın kimyasal özellikleri

Oksit %	%
SiO <sub>2</sub>	96,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,31
CaO	0,60
MgO	0,88
SO <sub>3</sub>	0,21
K <sub>2</sub> O	2,28
Na <sub>2</sub> O	1,07

### 3.1.4. Atık Seramik Tozu (ST)

Günümüzde atık seramikler, eski binaların yenilenmesi ve tadilat gibi nedenlerle atık depolama alanlarında miktarı giderek artan bir malzemedir. Araştırmalar ise seramiklerin yapısal özelliği olan alüminyum silikat malzemelerin yeniden

kullanılmasını ve bunların malzemelere kattığı özellikler ile ilgi odak noktasını oluşturmaktadır (Hwang vd., 2019).

Seramik malzemeler orijininde kilden yapılmış bir üründür ve hammaddesi karıştırılması, kalıplanması, kurutulması ve yakılmasıyla işlenen birincil hammadde olarak kuvarstur. Hem üretim hem de uygulama ile bakımın yanı sıra, büyük miktarda seramik atığına yol açmıştır. Bu atıkların yönetimi için gerçek bir çözüm olmamasına rağmen, bazı araştırmacılar seramik atıklarını geleneksel beton karışımlarında agrega veya dolgu olarak kullanmışlardır. Her gün seramik atıklarının birikmesiyle, seramik endüstrisinde bertaraf için bir çözüm bulma baskısı vardır. İnşaat ve yıkım atıklarının tuğla, seramik gibi atıkların beton da puzolanik malzeme olarak yeniden kullanımı ve geri dönüşümü için birçok önemli girişimde bulunulmuştur Seramik atıklarının inşaat mühendisliğinde tekrar kullanımı üzerine bazı çalışmalar mevcuttur (Subaşı vd., 2017).

- **Seramik tozunun hazırlanması**

Bu çalışmada, bakım gerektiren eski binaların atıklarından elde edilen seramik atıkları kullanılmıştır. Seramik atıkları laboratuvar ortamında öncelikle çekiçle kırılmış ve ikinci aşamada elde edilen küçük parçalar için iki çeneye sahip konkasörde (Şekil 3.5) kırılmıştır. Karışımlarda kullanılacak ST'nin istenilen inceliğe gelmesi için 600 devir/sa dönme hızına sahip değirmende (Şekil 3.6) 120 dk. öğütme işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.5. ST elde edilme süreci



Şekil 3.6. ST'unun öğütülmesinde kullanılan bilyalı değirmen

### 3.1.5. Alkali Aktivatörler

Kimyasal gösterimi NaOH (Şekil 3.6) olarak yazılan sodyum hidroksit bileşiği, genellikle topraklar, granüller veya pullar şeklinde bulunan beyaz bir malzemedir. NaOH, suda ve alkaliler ile yüksek çözünürlük seviyelerinden dolayı oldukça hızlı çözünen ve geopolimer karışımlarında sıklıkla kullanılır. Sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) (Şekil 3.7) ise, sodyum karbonatın ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ve kuartzın ( $\text{SiO}_2$ ) 1400 °C ila 1500 °C arasındaki sıcaklıklarda kalsifikasyonunu sonucu oluşan, yan ürün olarak büyük miktarlarda karbondioksit açığa çıkaran bir işlem ile üretilmektedir (Kamseu vd. , 2017).

Kamseu vd., (2017); Kaur vd., (2018) de açıklanan 1 lt suda NaOH topraklarının, hacimsel bir şişede su içinde çözülmesi ve kullanılan NaOH konsantrasyonu ile  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  karışımlarının kombinasyonu ile alkali aktivatör, diğer bileşiklerle karıştırılmadan 24 saat önce hazırlanması dikkate alınmış ve karışımlarda NaOH çözeltisinin hazırlanmasında aynı yöntem uygulanmıştır. NaOH çözeltisi toprakların (Şekil 3.6) (küçük, yuvarlak, bir NaOH (SH) maddesinin sıkıştırılmış kütlesi) belirli hacimdeki su içinde çözülmesiyle hazırlanmıştır. Bu amaçla 16 mol için 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 3.7. Sodyum hidroksit peletleri

Bu çalışmada, bir alkalın aktivatörü olarak sodyum hidroksit (NaOH) (Şekil 3.7) ile karıştırılmış sodyum silikat (SS) ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) (Şekil 3.8) 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 3.8. 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. Burada, çözeltinin hacmi 1 litredir. Çözeltinin molalitesi:

- Verilen, çözeltide  
12 mol için 480 g kütle  
14 mol için 560 g kütle  
16 mol için 640 g kütle  
18 mol için 720 g kütle



- NaOH'nin moleküler ağırlığı (1 mol): 40 g
- Mol sayısı = gram cinsinden kütle / molekül ağırlığı
  - 12 mol\*40 = 480 g
  - 14 mol\*40 = 560 g
  - 16 mol\*40 = 640 g
  - 18 mol\*40 = 720 g
- Hacim = 1 litre
- $m = n / v$  (1 kg çözücü) = 12 / 1 = 12 mol / litre = 12 molalite (m)  
 = 14 / 1 = 14 mol / litre = 14 molalite (m)  
 = 16 / 1 = 16 mol / litre = 16 molalite (m)  
 = 18 / 1 = 18 mol / litre = 18 molalite (m)

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

Tablo 3.4. Karışımlarda 1 dm<sup>3</sup> için kullanılan SS ve SH çözeltisi miktarları

Karışım no	SS (g)	SH (g)	m
C0R0M12			12
C0R5M14			14
C0R10M16			16
C0R15M18			18
C10R0M14			12
C10R5M12	150	150	14
C10R10M18			16
C10R15M16			18
C20R0M16			12
C20R5M18			14
C20R10M12			16
C20R15M14			18

### 3.1.6. Su

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

### 3.2. Numunelerin Üretimi ve Kürü

Bu çalışma, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (YFC) ve pirin kabuğu külü (PK) ile seramik tozu (ST) tasarım parametrelerini (Tablo 3.5) birlikte oluşturduğu Taguchi

L16 matrisi kullanılmıştır. Bu amaçla hazırlanan PK/ST/YFC oranı olarak 16 grup Tablo 3.6 beton karışımı tasarlanmıştır. Karışımlar için ince agrega, su, ST, PK ve YFC kullanılmıştır. Karışımlarda gruplar oluşturulmasında ST için C, PK için R ve molalite için M kod harfleri verilerek karışım oranlarında içeren karışım grupları oluşturulmuştur.

Tablo 3.5. *Karışım tasarım parametreleri*

Değişken	Seviye			
	1	2	3	4
ST	0	10	20	30
PK	0	5	10	15
m	12	14	16	18

Tablo 3.6. *Karışım oranları*

Karışım no	YFC (%)	ST (%)	PK (%)	Molalite
C0R0M12	100	0	0	12
C0R5M14	95	0	5	14
C0R10M16	90	0	10	16
C0R15M18	85	0	15	18
C10R0M14	90	10	0	14
C10R5M12	85	10	5	12
C10R10M18	80	10	10	18
C10R15M16	75	10	15	16
C20R0M16	80	20	0	16
C20R5M18	75	20	5	18
C20R10M12	70	20	10	12
C20R15M14	65	20	15	14
C30R0M18	70	30	0	18
C30R5M16	65	30	5	16
C30R10M14	60	30	10	14
C30R15M12	55	30	15	12



### 3.2.1. Numune Üretim Süreci

TS-EN196-1 ile uyumlu olarak ince agrega (<4,75 mm), kuvars kumu, su, PK, ST, 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 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7. Karışım tasarım verileri (g/dm<sup>3</sup>)

Karışım no	SS(g/d m <sup>3</sup> )	SH (g/dm <sup>3</sup> )	YFC (g/dm <sup>3</sup> )	ST(g/d m <sup>3</sup> )	PK (g/dm <sup>3</sup> )	Kum (g/dm <sup>3</sup> )	Agrega (g/dm <sup>3</sup> )	H <sub>2</sub> O (g/dm <sup>3</sup> )
C0R0M12			800		0			
C0R5M14			760	0	40			
C0R10M16			720		80			
C0R15M18			680		120			
C10R0M14			720		0			
C10R5M12			680		40			
C10R10M18			640	80	80			
C10R15M16			600		120			
C20R0M16	150	150	640		0	400	800	225
C20R5M18			600		40			
C20R10M12			560	160	80			
C20R15M14			455		120			
C30R0M18			560		0			
C30R5M16			520		40			
C30R10M14			480	240	80			
C30R15M12			440		120			

### 3.2.1. Numune Dökümü ve Kürü

Karışımlar, Tablo 3.5 ve Tablo 3.6'da verilen oranlara 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.



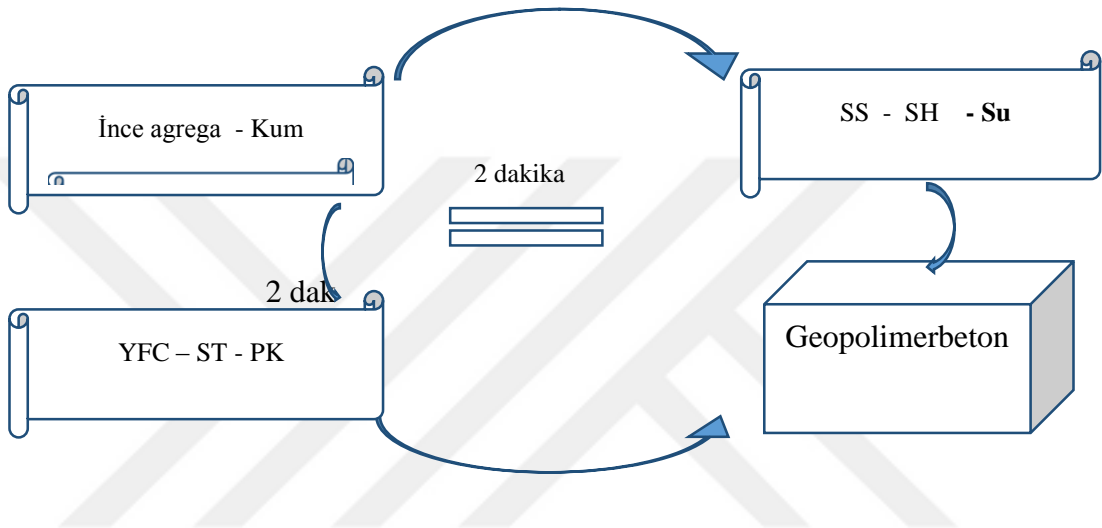
Şekil 3.9. Hobart karıştırıcı

Geopolimer üretiminde, karışım sırası (Şekil 3.10) ve süresi, tüm karışımlarda aynı homojenliği ve aynı yapıyı sağlamak için çok önemlidir. Bu hazırlık süresince sırasıyla kuru harmanlama karışımı, ince ve kaba agregaların iki dakika boyunca homojenleştirilmesinden ibarettir. İkinci olarak, homojen bir karışım elde etmek için YFC ile ST ve PK 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 ilaveside yapılarak karışım toplam 6 dakikaya tamamlanmıştır.



Şekil 3.10. Geopolimer karıştırma süreci

Hazırlanan karışımların yayılma çapı değerleri belirlenerek, TS EN 196-1'e uygun 40mm x 40mm x 160mm boyutlarındaki kalıplara (Şekil 3.10) doldurulmuştur. Son olarak, kalıplar üzerleri cam plakalar ile kapatılmıştır numuneler kalıptan 24 saat sonra çıkartılmış ve 60 ° C'de 24 sa olmak üzere sıcak su kür tankına yerleştirilmiştir. Numuneler laboratuvar koşullarında üzerleri naylon örtülü olarak (Şekil 3.10) test tarihlerine kadar bekletilmişlerdir.



Şekil 3.11. Çalışmanın karıştırma prosedürü



Şekil 3.12. Döküm ve kür süreci

### 3.3. Geopolimer Üzerinde Yapılan Deneyler

#### 3.3.1. Yayılma Tablası Deneyi

Yayılma tablası deneyi, engellerin olmadığı durumlarda ASTM C1437 (2009) standartına uygun olarak betonun yatay serbest akışını değerlendirmek için kullanılır. Test yöntemi, çöküşün belirlenmesi için yapılan test yöntemine dayanmaktadır ve bu

deneyde beton yayılma çapı betonun geçiş kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Bu deneyde kullanılan aparat (Şekil 3.13) aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Bu testte bir koni harçlarla doldurulur ve temiz ve kuru olan dairesel akış tablasının ortasına yerleştirilir (Şekil 3.14) ve koni mümkün olduğunca dikkatlice kaldırılır ve taze harç örneğinin 25 düşümdeki yayılma çapı ölçülür. Yayılma çapının ölçülmesi: standartta % 105 ile % 115 arasında değişir ve numunenin işlenmeye karşı duyarlılığını gösterir.



Şekil 3.13. Yayılma tablası



Şekil 3.14. Yayılma tablası deneyi

Harcın çapı iki dikey boyutta çapı ölçülür ve ortalaması rapor edilir. Son olarak, 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 (Kralij, 2009). Yoğunluk, en az 24 saat etüvde  $105\pm 5$  °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 kurusu ağırlığı, g

B = Doymun yüzey numune ağırlığı, g

C = Kaynatılan numune ağırlığı, g

D = Su içindeki numune ağırlığı, g

P = su yoğunluğu = 1 Mg / m<sup>3</sup> = 1 g / cm<sup>3</sup>.

### 3.3.3. Porozite ve Su Emme Oranı Tayini

Betonun porozitesi su, hava, asit ve bazın içinden geçebileceği küçük deliklerle dolu bir yapı anlamına gelir. Porozite, 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 porozite 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 doymun hale gelmesi sağlanmıştır. Ayrıca numuneler su içerisinde kaynatılarak soğuması beklenilmiş ve arşimet yöntemiyle su içerisindeki ağırlıkları (Şekil 3.15) belirlenmiştir. Numunelerin porozite ve su emme oranlarının ölçülmesinde ise eşitlik (3.5) ve (3.6) kullanılmıştır:



Şekil 3.15. Arşimet test ekipmanı

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

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

Eşitlikte;

A = Etüv kurusu ağırlığı, g

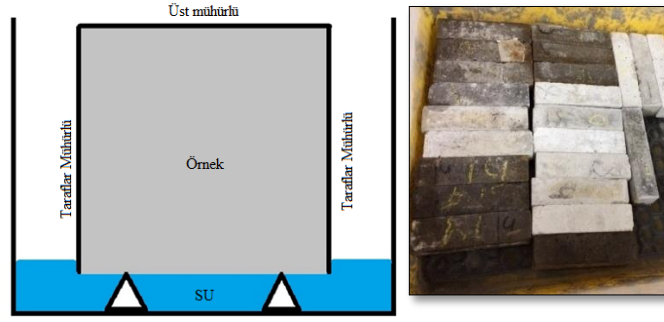
B = Doymun yüzey numune ağırlığı, g

C = Kaynatılan numune ağırlığı, g

D = Su içindeki numune ağırlığı, g

### 3.3.4. Kılcal Su Emme Deneyi

Geçirgenlik veya su emme, numunede kılcal basıncın yükselmesi nedeniyle suyun gözenek sisteminden girmesine izin veren zamanın bir fonksiyonu olarak beton tarafından su emme oranını tanımlar. ASTM C1585-04 (2004) standardına göre, kılcal su emme, numunenin bir yüzünün suya maruz kaldığı zamana göre emiliminin bir sonucu olarak kütle artışının bir fonksiyonudur. Maruz kalacak yüzün hazırlanmasından ve numunenin başlangıç kütlesinin ölçülmesinden sonra, diğer tüm yüzlere bir parafin uygulanır. Bu önlem, numuneye yukarı doğru tek yönlü su akışı sağlamak için yapılmaktadır. Beton yüzeyinin su emilimi, karışımın oranına ve kalitesine ve kullanılan kimyasal katkılara da bağlıdır. Bu çalışmada geçirgenlik testi örneklerin alt yüzeyleri suya temas edecek şekilde Şekil 3.16'de yerleştirilmiştir. Örnek sudan çıkarıldıktan sonra 110°C sıcaklıkta etüvde kurutulmuş ve çevre yüzeylerdeki akış emici olmayan malzeme kullanılarak kapatılmıştır. 24 saatlik süre sonunda, 0,1g ağırlığındaki terazide tartılarak emilen su miktarı kayda alınmıştır. Geçirgenlik, gözenekli malzemenin kılcallık yoluyla su emme ve iletme eğilimini gösteren bir özelliktir. Örneklerin su kabında bekletilmesiyle bu örneklerin su emme oranları belirtilen zaman içinde ölçülmüştür. Gözenek boşluklarından numunelere suyun girmesi, geçirgenlik olduğu anlamına gelmektedir



Şekil 3.16. Geopolimer örneklere yapılan geçirgenlik testi

### 3.3.5. Basınç Dayanımı Testi

Beton küp testinin basınç dayanımı, betonun tüm özellikleri hakkında fikir verir. 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 kürlerini tamamlamasından sonra, Şekil 3.17'de gösterildiği gibi basınç dayanımı test cihazı ile deney gerçekleştirilmiştir. Örnekler taşıma gücünü kaybedene 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 (N)

A: Kesit alanı (mm<sup>2</sup>)

$\sigma$ : Basınç dayanımı (MPa)



Şekil 3.17. Geopolimer beton basınç dayanım testi

### 3.3.6. 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 Geopolimerlerin değişik sıcaklıklardaki etkilerinin belirlenmesi amacıyla maksimum 600 °C olacak şekilde sırasıyla numuneler 300 °C, 450°C ve 600°C yüksek sıcaklıklarda 1 saat süreyle 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 3.18. Yüksek sıcaklı etkisi deneyi

## 4. TARTIŞMA VE BULGULAR

### 4.1. Yayılma Tablası Deney Sonuçları

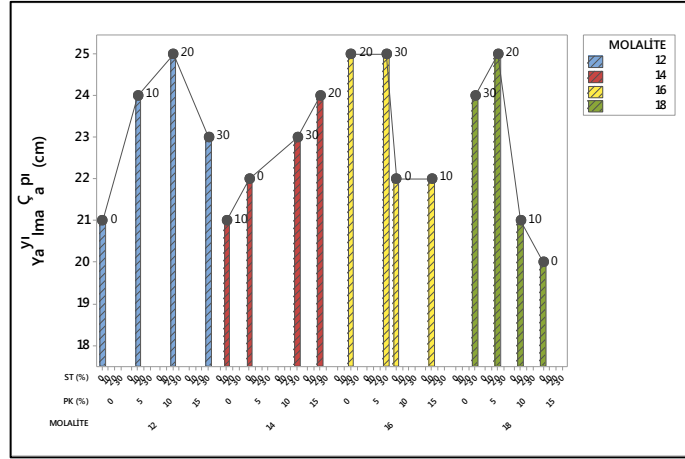
Yayılma tablası deneyi geleneksel olarak en çok kullanılan deneylerden birisidir. Geopolimer harcın kalıba doldurulduğu bir koninin 25 düşüşten sonraki yayılma çapı ölçülür. Bu deney sonucunda numulerdeki yayılma çapı 20 ile 25 cm arasında değiştiği görülmüştür. ST vePK ilavesiyle yayılma çapının kullanılan malzemeye bağlı olarak artış ya da azalış eğiliminde olduğu görülmüştür (Tablo 4.1; Şekil 4.1).

Tablo 4.1. *Yayılma çapı sonuçları* (01)

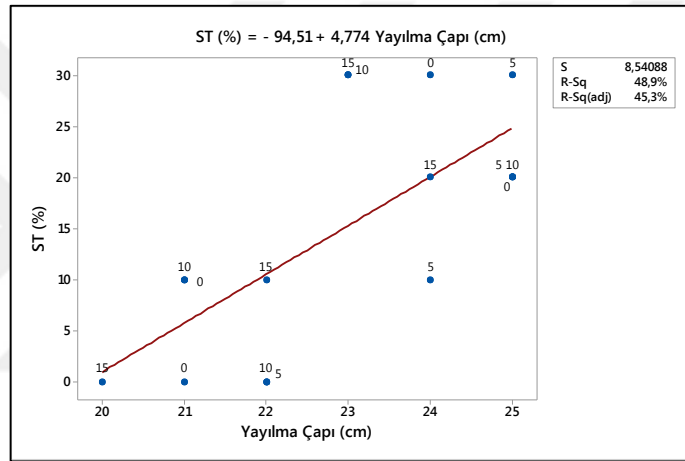
Karışım No	Yayılma Çapı(cm)
C0R0M12	21
C0R5M14	22
C0R10M16	22
C0R10M18	20
C10R0M14	21
C10R5M12	24
C10R10M18	21
C10R15M16	22
C20R0M16	25
C20R5M18	25
C20R10M12	25
C20R15M14	24
C30R0M18	24
C30R5M16	25
C30R10M14	23
C30R15M12	23

Bu çalışma kapsamında, karışımlara değişik oranlarda ilave edilen seramik tozu (ST) ve pirinç kabuğu külünün (PK) farklı oranlarda ve farklı molalitelere hazırlanan gruplardaki genel değişimi Şekil 4.1 'de verilmiştir.

Şekil 4.1 incelendiğinde, yayılma çapının her bir molalite grubundaki değişimleri kullanılan ST ve PK külüne bağlı olarak arttığı, ancak %30 kullanılan ST'lu gruplarda diğer gruplara nazaran değişimin aynı olmadığı belirlenmiştir.



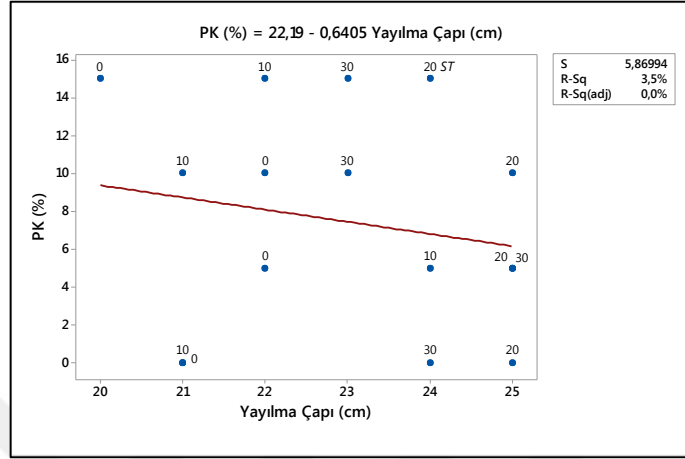
Şekil 4.1. Yayılma çapındaki değişimler



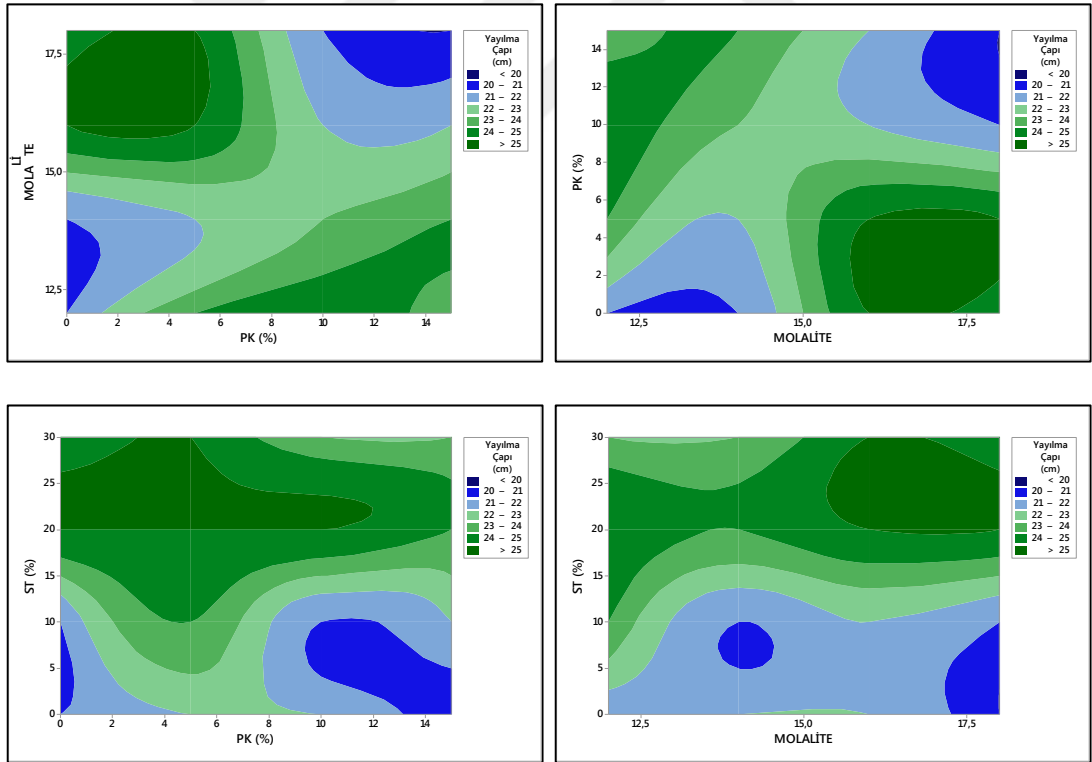
Şekil 4.2. Yayılma çapı ile ST oranı arasındaki ilişki

Hazırlanan geopolimerlerin yayılma çaplarındaki değişimin istatistiksel olarak incelendiğinde (Şekil 4.2), geopolimer karışımlarında artan kullanım oranına paralel olarak ST kullanımı yayılma çapını arttırdığı görülmüştür. ST ile yayılma çapı (YÇ) arasında  $ST = -94,51 + 4,774 YÇ$  olan ve  $R^2 = \% 48,9$ 'luk istatistiksel açıdan regresyonel bir ilişki olduğu görülmüştür. ST'nun %20 ve 30 oranlarında kullanılmasında elde edilen yayılma çapı sonuçlarının ise minimum 23 cm olarak gerçekleştiği, diğer düşük kullanımlarında da bu oranınıyaklaşık maksimum 22 cm olarak gerçekleştiği görülmüştür. Ancak PK ile yayılma çapı arasındaki ilişki incelendiğinde ise artan PK kullanımına bağlı olarak yayılma çapının istatistiksel ortalamalar açısından azaldığı ve bu azalmanın ise PK ile yayılma çapı (YÇ) arasında  $PK = 22,19 - 0,6465 YÇ$  olan ve  $R^2 = \% 3,5$ 'luk istatistiksel açıdan çok zayıf bir ilişkisi olduğu belirlenmiştir. Bu durum sadece PK kullanılan gruplarda maksimum 22 cm yayılma çapı elde edilmesi ve PK

karışımlarda daha yapışkan bir malzeme oluşturmaları ile açıklanabilir. Ancak bu yayılma çapındaki artış olabilmemesinin karışımlara PK dışında ST ilave edilmesi durumunda gerçekleşebileceğini göstermiştir.



Şekil 4.3. Yayılma çapı ile PK oranları arasındaki ilişki



Şekil 4.4. Yayılma çapının değişken parametrelere göre belirlenmesi

Molalite, ST ve PK kullanım oranlarına bağlı olarak yayılma çapının belirlenmesinde kullanılacak Şekil 4.4' te gösterilmiştir. Şekil 4.4 incelendiğinde; yayılma çapının

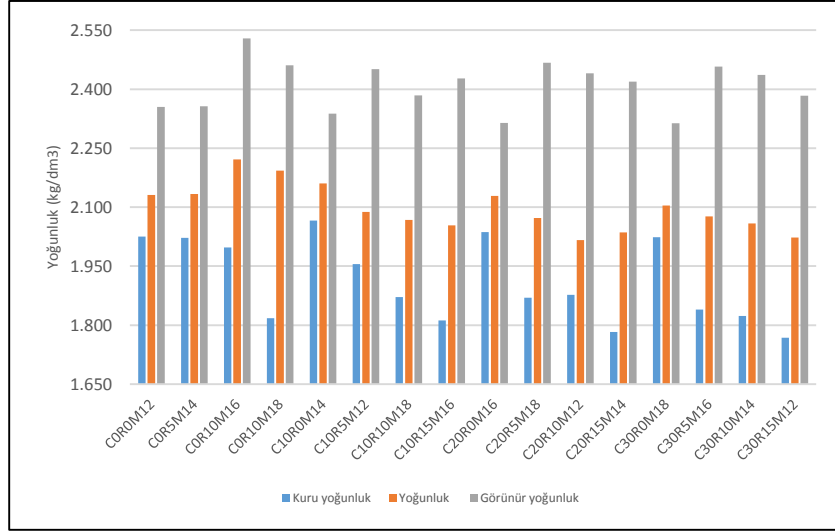
maksimum olabilme durumu, ya hiç PK kullanılmadan 16-18 molalitede %20-25 oranlarında ST kullanımı yada (PK kullanılması durumunda) %6 PK kullanımı ile 16-18 molalitede %20-25 oranlarında ST kullanımıyla sağlanabileceği belirlenmiştir. En düşük yayılma çapının minimum olması ise karışımlarda ST kullanılmayacaksa 16-18 molalitede %10-15 arası PK kullanılmasıyla ya da ST kullanımında da mololiteye bakılmaksızın %5-10'u geçmeyen kullanım oranı ile mümkün olabileceği görülmüştür.

#### 4.2. Yoğunluk Test Sonuçları

Geopolimerlerin yoğunluğu ASTM C642-97'ye göre belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 4.2'de ve değişimler Şekil 4.5'te verilmiştir.

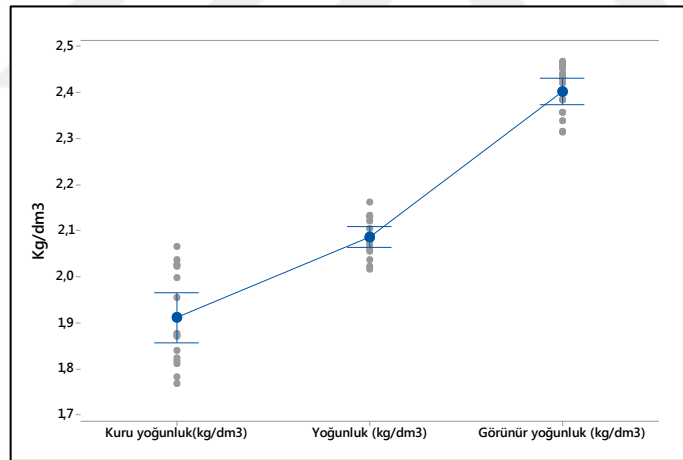
Tablo 4.2. Geopolimer betonların yoğunluğu ( $kg/dm^3$ )

Karışım	Kütle yoğunluğu (kuru)	Kütle yoğunluğu	Görünür yoğunluk
C0R0M12	2,026	2,131	2,355
C0R5M14	2,022	2,134	2,356
C0R10M16	1,997	2,121	2,529
C0R10M18	1,818	2,143	2,460
C10R0M14	2,066	2,161	2,338
C10R5M12	1,955	2,088	2,451
C10R10M18	1,872	2,068	2,385
C10R15M16	1,812	2,054	2,427
C20R0M16	2,036	2,129	2,314
C20R5M18	1,870	2,073	2,467
C20R10M12	1,877	2,016	2,440
C20R15M14	1,783	2,036	2,419
C30R0M18	2,024	2,105	2,313
C30R5M16	1,840	2,076	2,457
C30R10M14	1,823	2,059	2,436
C30R15M12	1,768	2,023	2,384



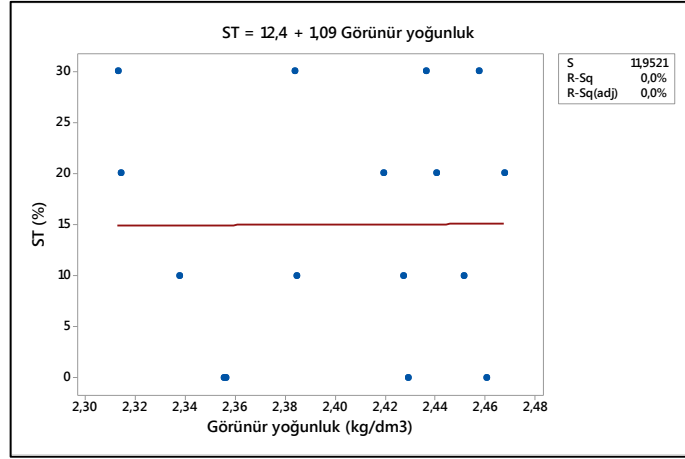
Şekil 4.5. Geopolimerin yoğunluk değişimleri

Bu çalışmadaki yoğunluklar ile ilgili sonuçlar (Tablo 4.2; Şekil 4.5) incelendiğinde; görünür yoğunluk, kuru kütle yoğunluğu ve kütle yoğunluklarının artan molalite, PK ve ST oranlarına göre azalan bir değişimin içerisinde olduğu görülmüştür.



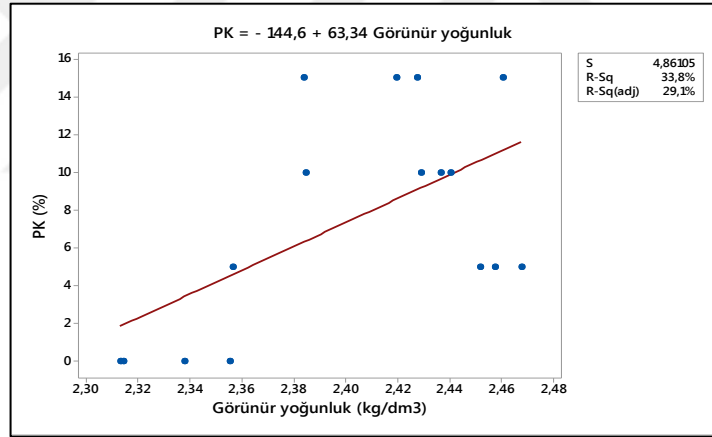
Şekil 4.6. Yoğunluklar arasındaki ilişki

İstatiksel ortalamalar açısından yoğunluklardaki değişimi veren Şekil 4.6 incelendiğinde ise; kuru kütle yoğunluğunun 1,75 – 2,08 kg/dm<sup>3</sup> değerler arasında elde edildiği, sırasıyla yoğunluğu ve görünür yoğunluk değerlerinin de 2,0-2,2 kg/dm<sup>3</sup> ve 2,35-2,45 kg/m<sup>3</sup> arasında olmak üzere kuru yoğunluktanyaklaşık %21 oranında daha yüksek görünür yoğunluk değerleri elde edilmiştir.

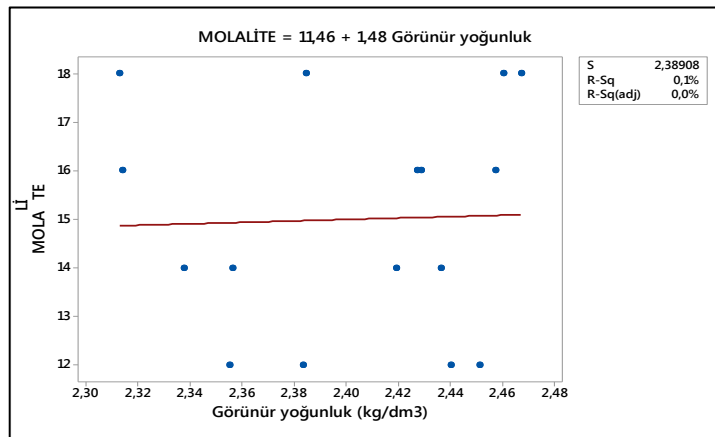


Şekil 4.7. ST oranı ile görünür yoğunluk arasındaki ilişki

Geopolimer harçlarda görünür yoğunluğun etkisi üzerine ST kullanımının etkisi (Şekil 4.7’de, PK kullanımının etkisi Şekil 4.8’de ve molalitenin etkisini gösteren regresyon ilişkisi ise Şekil 4.9’de verilmiştir.

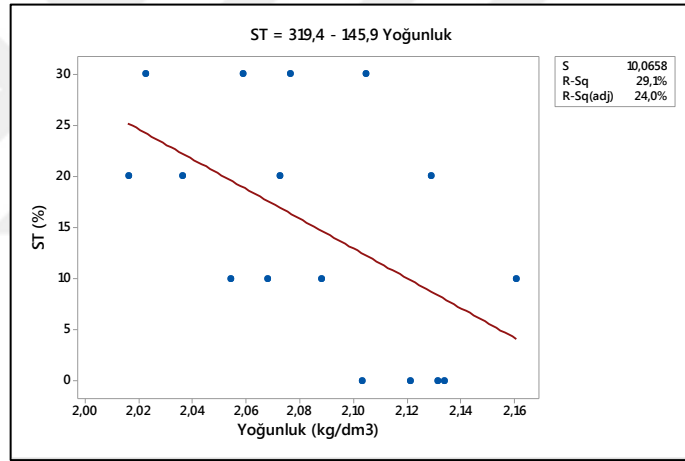


Şekil 4.8. PK oranı ile görünür yoğunluk arasındaki ilişki

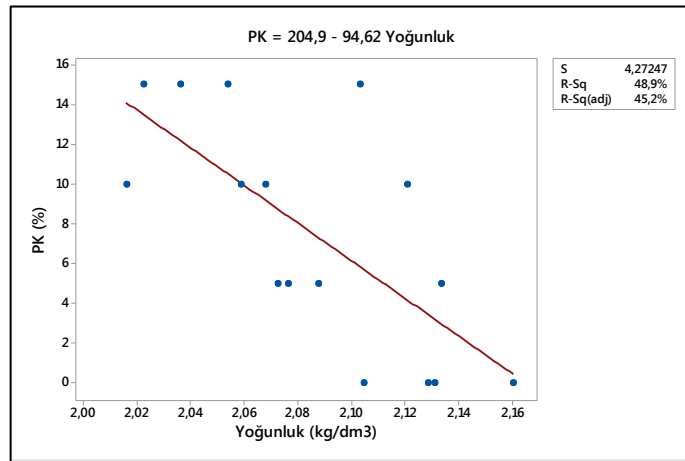


Şekil 4.9. Molalite ile görünür yoğunluk arasındaki ilişki

Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 incelendiğinde görünür yoğunluk (GY) üzerinde mololitenin ve ST'nin etkisinin neredeyse hiç olmadığı,  $m = 11,46 + 1,48 \text{ GY}$  ile  $R^2 = 0,1$  ve  $ST = 12,4 + 1,09$  değerleri ile istatistiksel açıdan anlamlı bir ilişkinin olmadığı görülmüştür. Ancak PK kullanımındaki ilişkiye bakıldığında  $PK = - 144,6 + 63,34 \text{ GY}$  ile  $R^2 = 33,8$  lik daha yüksek bir anlamlı ilişki olduğu tespit edilmiştir. Geopolimerlerin yoğunluklardaki değişimlerin ilişkisi incelendiğinde (Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12); mololitenin etkisinin  $R^2 = 3,2$  ile düşük ve görünür yoğunlukla istatistiksel olarak benzer bir ilişkisi olduğu görülmüştür. Ancak ST kullanımında bu anlamlı ilişkinin  $ST = 319,4 - 145,9 \text{ Y}$  ve  $R^2 = \%29,1$  ile görünür yoğunluğa göre artan bir ilişki tespit edilmiştir. Bu durum yerdeğiştirilerek kullanıldığı YFC ile ortalama çap gibi aynı özelliklere sahip olmaması ve ilave edilen ST oranı yapı içerisinde artan boşluk oluşumuna neden olabilmesi ile açıklanabilir.

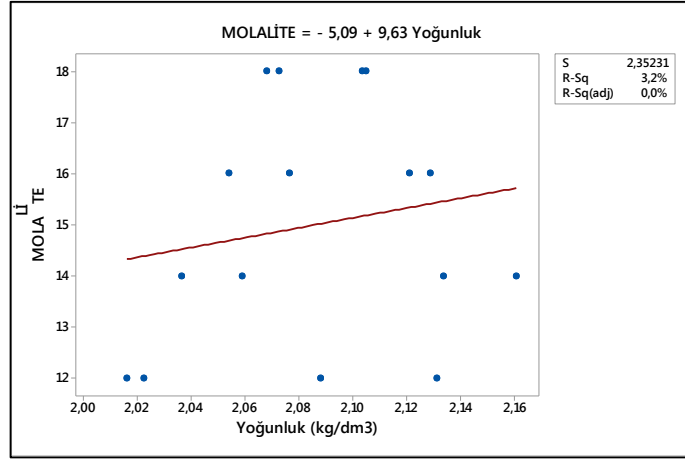


Şekil 4.10. ST oranı ile yoğunluk arasındaki ilişki



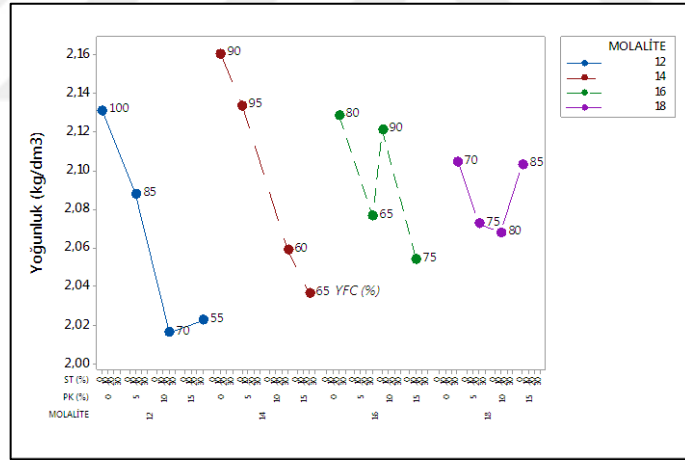
Şekil 4.11. PK oranı ile yoğunluğu arasındaki ilişki



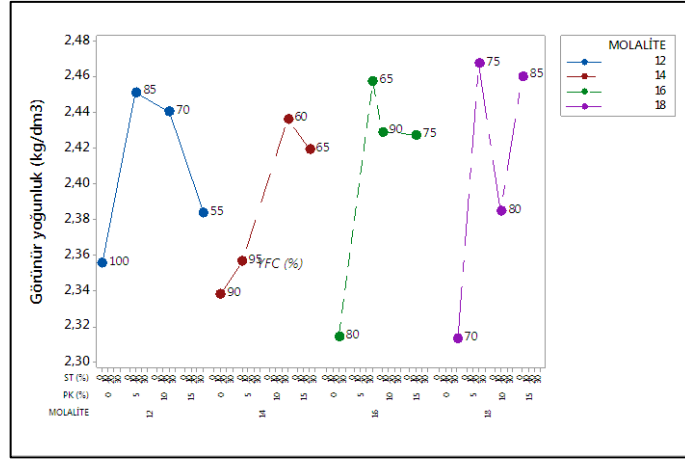


Şekil 4.12. Molalite ile yoğunluk arasındaki ilişki

PK kullanımında ise elde edilen ilişki  $PK = 204,9 - 94,62 Y$  bağıntısı ile  $R^2 = \%48,9$  luk diğer gruplara göre istatistiksel olarak daha anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir. Bu durum yoğunluk üzerine PK'nun etkisinin mololite ve ST kullanımından daha çok etkili bir malzeme olduğu sonucunu göstermiştir.

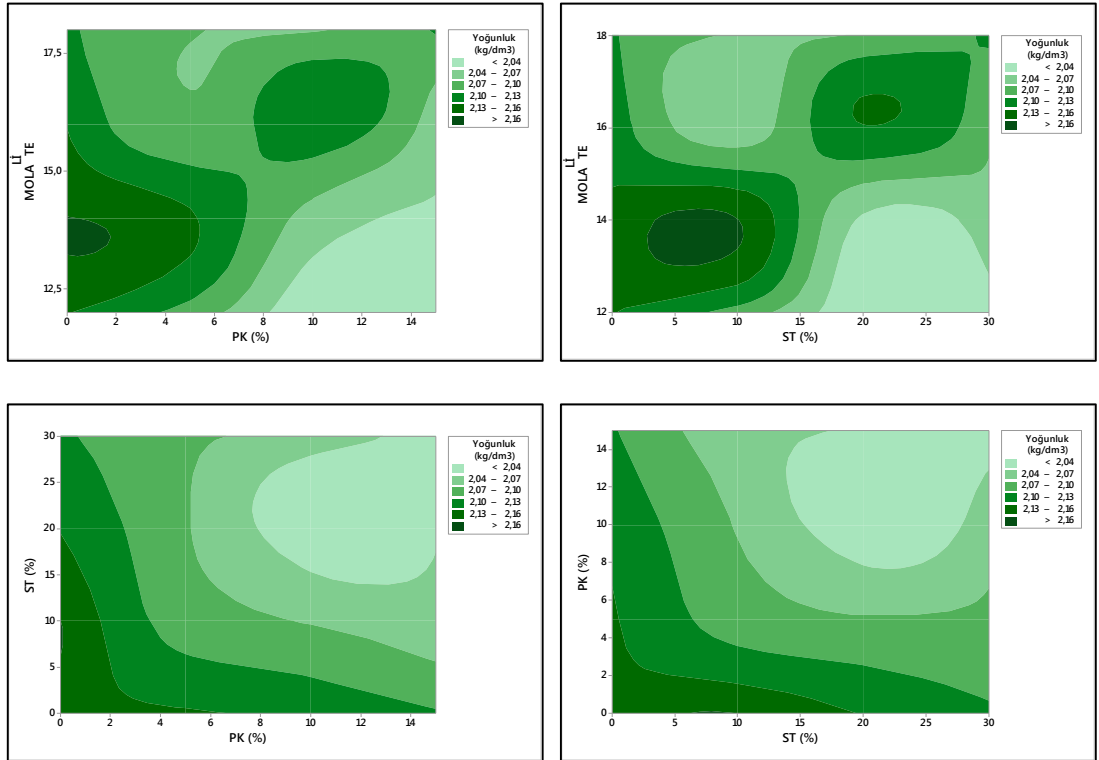


Şekil 4.13. Değişken parametrelere bağlı yoğunluk değişimi



Şekil 4.14. Değişken parametrelere bağlı görünür yoğunluk değişimi

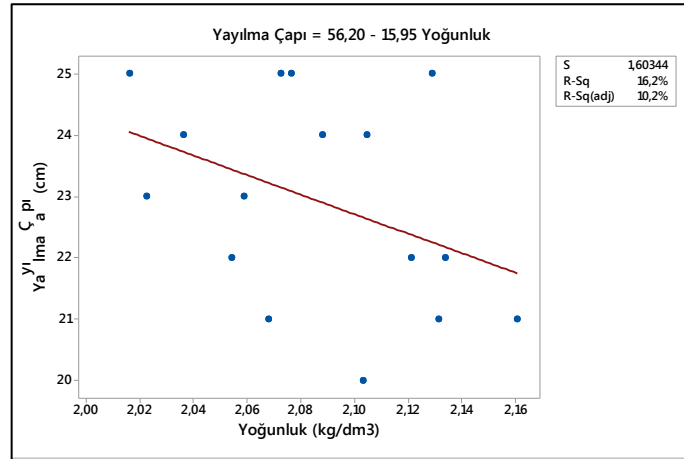
Yoğunluk ve görünür yoğunluk değerlerinin molalite, ST ve PK değişken parametrelerine bağlı genel değişimlerine bakıldığında, artan molalite oranlarında değişmemek üzere tüm gruplarda yoğunluğun azalan YFC oranına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Ancak bu durum görünür yoğunluklarda yüksek orandaki YFC kullanımlarında daha düşük değerler elde edilmişken, yüksek YFC oranına göre daha yüksek olan ve 2,44 – 2,46 kg/dm<sup>3</sup> arası yoğunluklara çıkan değerlerden, artan ST ve PK kullanımına bağlı olarak yoğunluklarda azalışlar meydana gelmiştir.



Şekil 4.15. Değişkenlere bağlı yoğunluk tahmini

Bu çalışma kapsamında hazırlanan geopolimer betonların yoğunluklarının molalite, PK ve ST'ye göre belirlenmesi amacıyla hazırlanan yoğunluk değişimlerini gösteren Şekil 4.14 incelendiğinde; yüksek yoğunluktaki bir malzeme için ST ve PK beraber kullanılmasında %2 PK karşılık maksimum %10-15 ST kullanıldığında gerçekleşeceği belirlenmiştir. Ancak molalite etkisi dikkate alındığında ya 14 molalite de, yada %20 ST ile 16 molalitede hazırlanacak geopolimerlerde elde edilebileceği görülmüştür. Düşük yoğunluk için molaliteye göre değişmekle birlikte yüksek oranlar kullanılacak ST ve PK oranlarının etkili bir parametredir. Bu durum geopolimer üretiminde istenilen yoğunlukların sağlanmasının ancak ideal malzeme ve oranlarının kullanılmasında mümkün olabileceğini göstermiştir.

Yoğunluk değerleri ile yayılma çapları arasındaki ilişki incelendiğinde (Şekil 4.16) kütle yoğunluğundaki yaklaşık %5 lik değişime karşılık yayılma çapına %7 lik bir değişim gerçekleşmiştir ve bu ilişki arasında yüksek bir ilişki olmadığı görülmüştür. Ancak yoğunluk ile yayılma çapı (YÇ) arasında  $YÇ=56,20-15,95Y$  olan  $R^2=\% 16,2$  ile düşük bir ilişki hesaplanmıştır.



Şekil 4.16. Kütle yoğunluğu ile yayılma çapı arasındaki ilişki

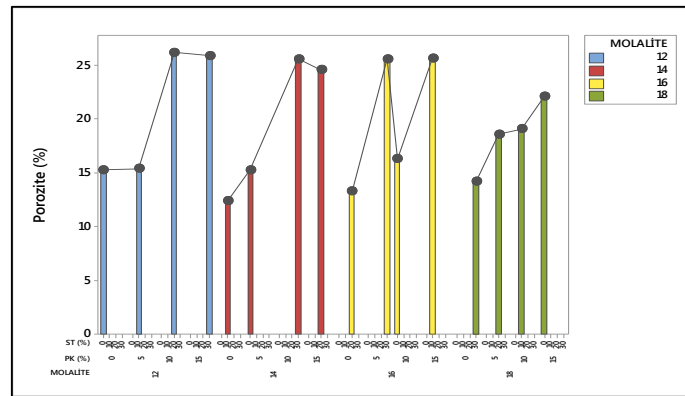
### 4.3. Porozite Test Sonuçları

Genellikle yüzde olarak ifade edilen ve gözeneklerle doluluğun tanımı olan porozite, betonun toplam hacminin oranını tanımlamak için kullanılır. Geçirgen olduğu bilinen

bir betonda porozite önemli bir faktördür. Hazırlanan geopolimer beton örneklerine ait porozite değerleri Tablo 4.3 ve Şekil 4.17’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Geopolimerlerin porozite değerleri

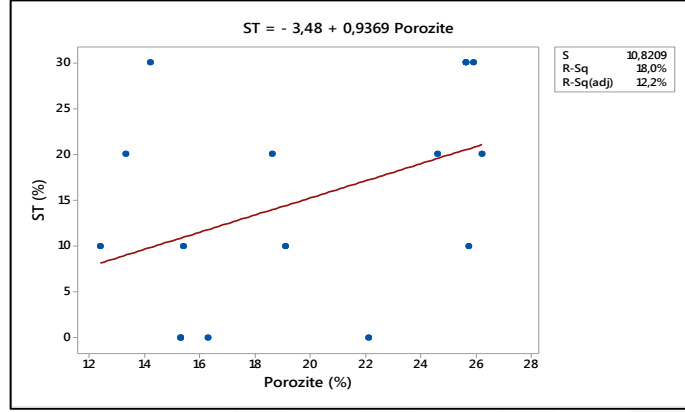
Karışım no.	Porozite (%)
C0R0M12	15,3
C0R5M14	15,3
C0R10M16	16,3
C0R10M18	22,1
C10R0M14	12,4
C10R5M12	15,4
C10R10M18	19,1
C10R15M16	25,7
C20R0M16	13,3
C20R5M18	18,6
C20R10M12	26,2
C20R15M14	24,6
C30R0M18	14,2
C30R5M16	25,6
C30R10M14	25,6
C30R15M12	25,9



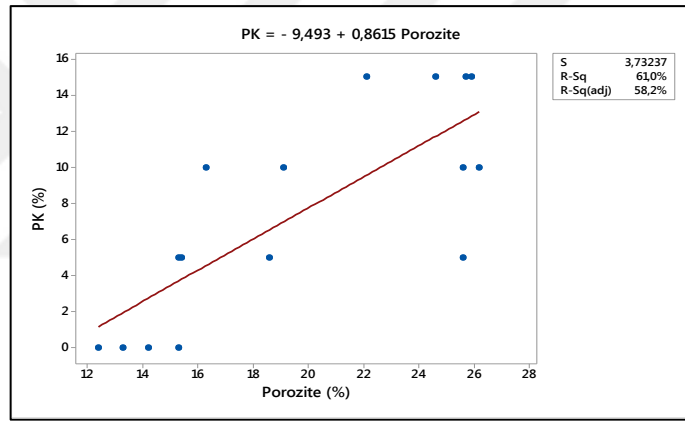
Şekil 4.17. Geopolimer betonlarda porozitedeki değişim

Geopolimer beton örneklerine ait porozite değerleri Tablo 4.3 ve Şekil 4.16 incelendiğinde minimum %12,4 ile %26,2 oranları arasında değiştiği görülmüştür. Ancak bu değişimlerin 16 molaliteye kadar artan PK ve ST kullanımlarında artışa bağlı

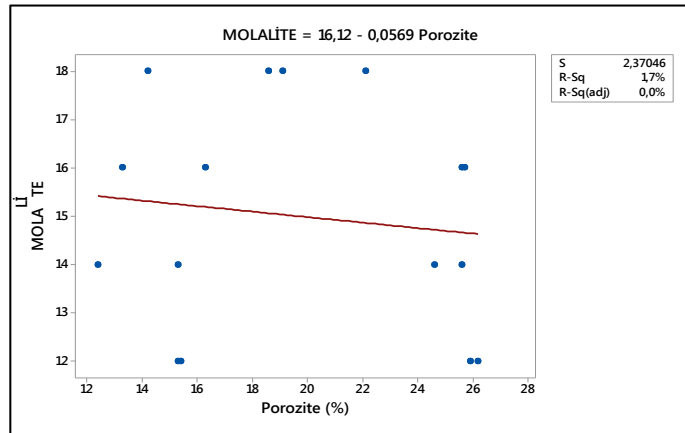
porozitedeki artış olarak gerçekleştiği, ancak 18 molalitede porozitede artan malzeme oranına bağlı olarak %15 oranlarına varan azalış meydana geldiği belirlenmiştir.



Şekil 4.18. ST ile porozite arasındaki değişim

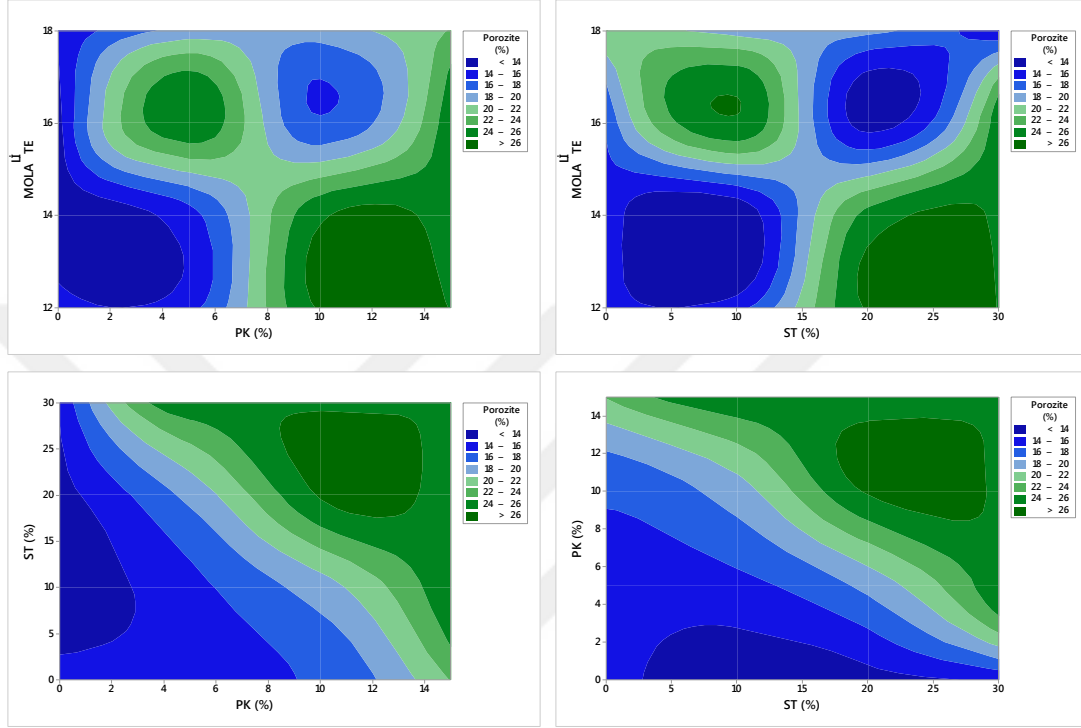


Şekil 4.19. PK ile porozite arasındaki değişim



Şekil 4.20. Molalite ile porozite arasındaki değişim

Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20 incelendiğinde porozite değerlerinin Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 'de verilen yoğunluk değişimleri ile benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Bu değişimler geopolimer üretimde ST kullanılmasında porozitenin  $R^2 = 18$  ile yoğunluktaki değer ile ters orantılı olarak %29,1 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.21. Değişkenlere bağlı porozite tahmini

Artan değişken kullanım oranına karşılık istatikselsel olarak poroziteninde arttığı hesaplanmıştır. Benzer durum PK kullanımı içinde gerçekleşmiş olup,  $PK = -9,493 + 0,8615 \cdot P$  denklemi ile açıklanabilen  $R^2 = 61$  ile daha anlamlı ilişki belirlenmiştir. Molalite de ise Şekil 4.12 deki duruma benzer olarak istatikselsel açıdan gruplar arasındaki farklı kullanılan silikatın değişimlerde bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında hazırlanan geopolimer betonların porozitelerini molalite, PK ve ST'ye göre belirlenmesi amacıyla hazırlanan ve değişimlerini gösteren Şekil 4.21 incelendiğinde; Şekil 4.14 'de ifade edilen %2 PK karşılık maksimum %10-15 ST kullanıldığında gerçekleşecek yüksek yoğunluktaki bir malzeme ile aynı paralellikte olması beklenen maksimum kompaziteye sahip bir malzeme elde edilebileceğini desteklemektedir. Bu oranların kullanılması durumunda ise %14'den daha az

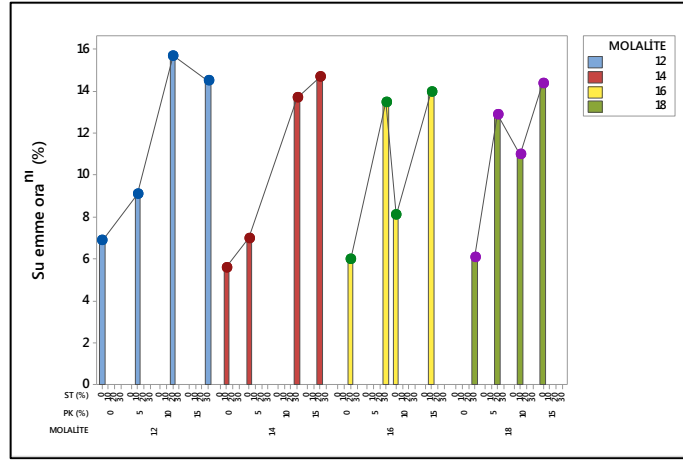
poroziteye sahip bir malzeme elde edilebileceği görülmüştür. Ancak molalite etkisi dikkate alındığında ya 14 molalite de, ya da 16 molalitede %20 ST ile yüksek oranlardaki ST ve PK oranlarında hazırlanacak geopolimerlerde porizitenin düşük değerleri elde edilmiştir.

#### 4.4. Su Emme Oranı Test Sonuçları

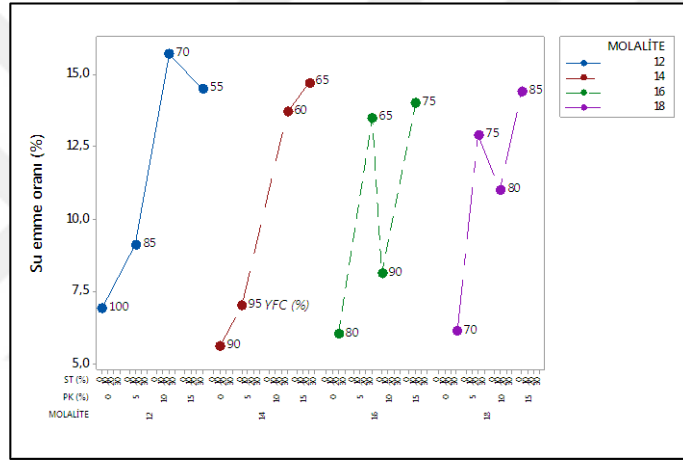
Su emme oranı test sonuçları (Tablo 4.4) incelendiğinde, su emme oranlarının %5,60 ile %15,70 değerleri arasında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek su emme oranı, %15,70 ile %20 ST, %10PK ve 12 molalitede gerçekleşmişken, en düşük değer ise %10 SK, %0 PK ve 14 molalite hazırlanan grupta 5,60 olarak gerçekleşmiştir. Kullanılan malzeme ve molalitenin su emme oranına etkisi olduğu söylenebilir.

Tablo 4.4. Su emme oranlarındaki % değişim değerleri

Karışım	Su emme oranı (%)
C0R0M12	6,90
C0R5M14	7,00
C0R10M16	8,10
C0R10M18	14,40
C10R0M14	5,60
C10R5M12	9,10
C10R10M18	11,00
C10R15M16	14,00
C20R0M16	6,00
C20R5M18	12,90
C20R10M12	15,70
C20R15M14	14,70
C30R0M18	6,10
C30R5M16	13,50
C30R10M14	13,70
C30R15M12	14,50



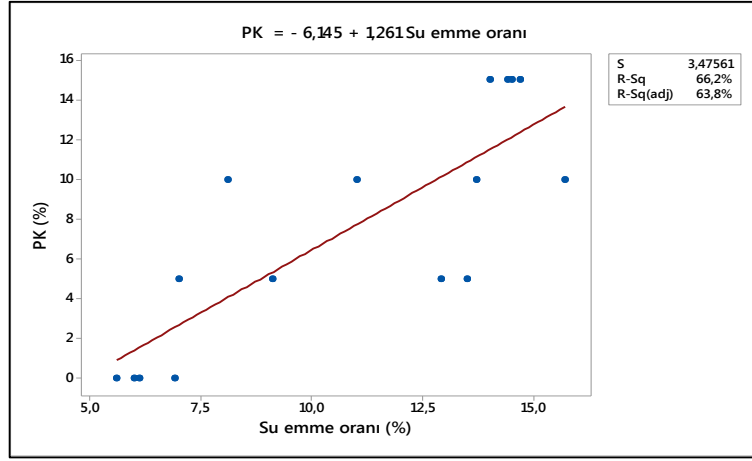
Şekil 4.22. Su emme oranlarındaki genel değişim



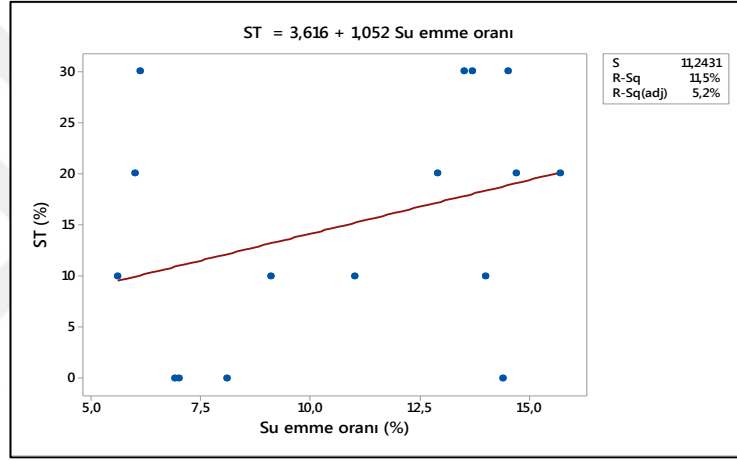
Şekil 4.23. Değişken parametrelere bağlı su emme oranlarındaki değişim

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 incelendiğinde 16 molaliteye kadar artan PK ve ST kullanımlardaki porizitedeki artış ve 18 molalitede porizitede artan malzeme oranına bağlı olarak %15 oranlarına varan azalış meydana gelmesi durumuna orantılı olarak artan porozitenin olduğu gruplarda su emme oranları da artmış ve birbiri ile uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Ayrıca yüksek oranda YFC kullanılmış grupların molalite değerlerine göre değişmekle birlikte en düşük su emme oranları bu gruplarda elde edilmiştir. Bu durum kullanılan malzemelerin inceliklerinin YFC ile aynı olmadığı ve mevcut geopolimer üretimine göre daha çok boşluk oluşmasını sağlayarak (Şekil 4.21) su emme oranlarında artışa neden olması ile açıklanabilir.



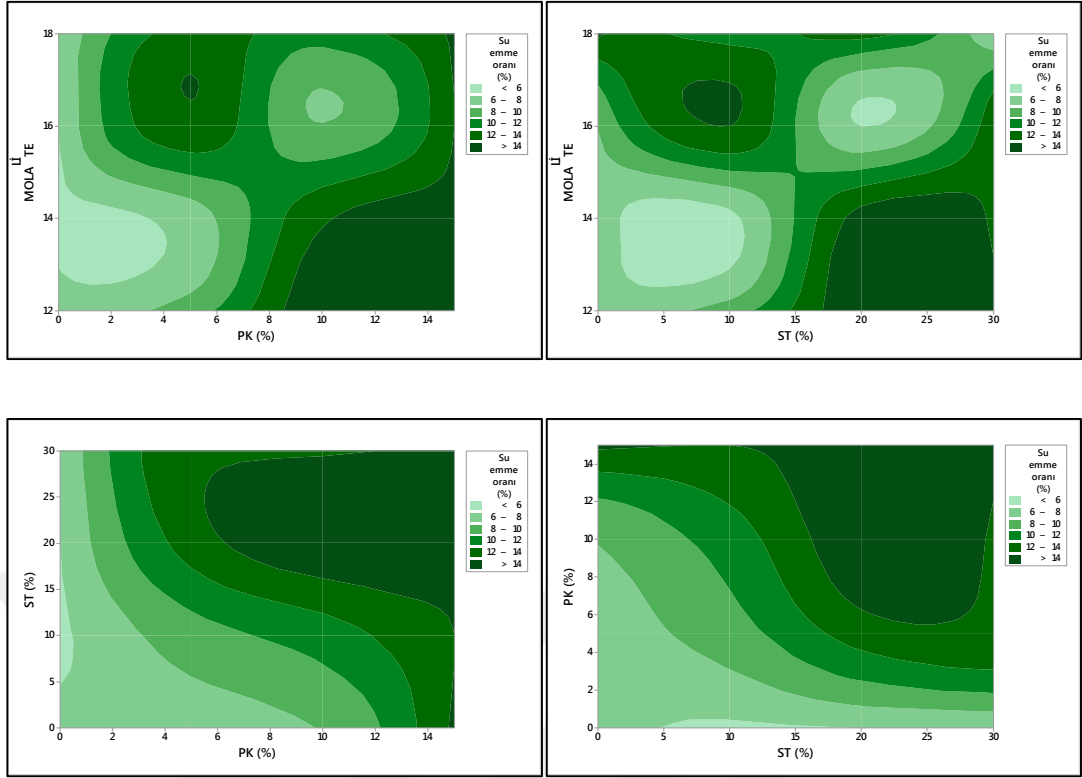


Şekil 4.23. PK ile su emme oranı arasındaki değişim



Şekil 4.24. ST ile su emme oranı arasındaki değişim

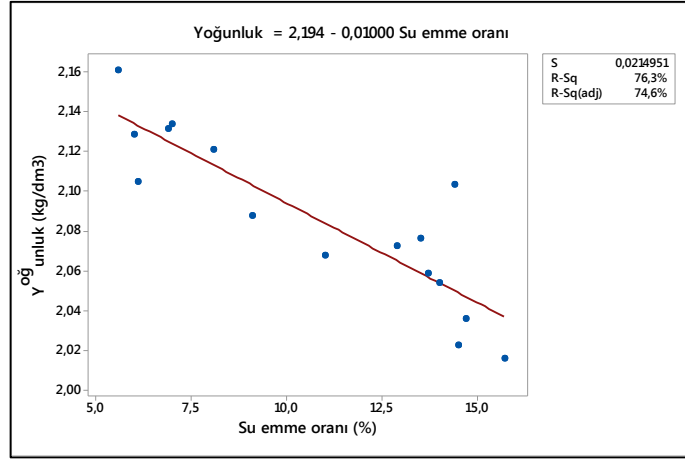
Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 incelendiğinde, istatistiksel açıdan su emme oranında bir artışın olduğu görülmüştür. PK ile su emme oranı (SEO) arasında  $PK = -6,145 + 1,261 \cdot SEO$  ilişkisi ST ile  $ST = 3,616 + 1,052 \cdot SEO$  ilişkileri olmasına rağmen, istatistiksel açıdan yüksek anlam değerine sahip bir regresyonel ilişkinin olmadığı, PK ve ST için değerlerin sırasıyla  $R^2 = \% 66,2$  ve  $R^2 = \% 11,5$  olarak belirlenmiştir. Bu değişimin kullanılan malzemelere bağlı olarak genel bir su emme oranında değişen oranlarda artış meydana gelmesine neden olmuştur.



Şekil 4.25. Değişkenlere bağlı su emme oranı tahmini

Çalışma konusunu oluşturan geopolimer molalite, ST ve PK oranına bağlı olarak su emme oranını tahmin edilmesinde kullanılabilir kontuar grafik (Şekil 4.25) incelendiğinde; düşük su emme oranına sahip numunelerin ya %5-10 arasında ST kullanımında yada 14-15 molalite karışımında maksimum %4'e kadar PK kullanılması sağlanabileceği, ancak 18 molalite kullanılması durumunda da %10-12 PK veya %20-25 oranlarında ST kullanılırsa sağlanabildiği belirlenmiştir. Bu durum kullanılan malzeme oranına bağlı toplam kompasitenin azalması boşluk oranının artması ile gerçekleşmiştir. Şekil 4.26 incelendiğinde, azalan yoğunluk değerine bağlı olarak su emme oranında artış olduğu, bu artışın % 6,9'luk yoğunluktaki değişime karşılık yaklaşık 3 kat su emme oranına etkisinin olması da bu durumu desteklemektedir.

Geopolimerlerin yoğunluğu ile su emme oranı (SEO) arasında  $Y = 2,194 - 0,01SEO$  olan  $R^2 = \% 76,3$  ile istatistiksel açıdan anlam seviyesi yüksek bir ilişki olduğu da hesaplanmıştır.



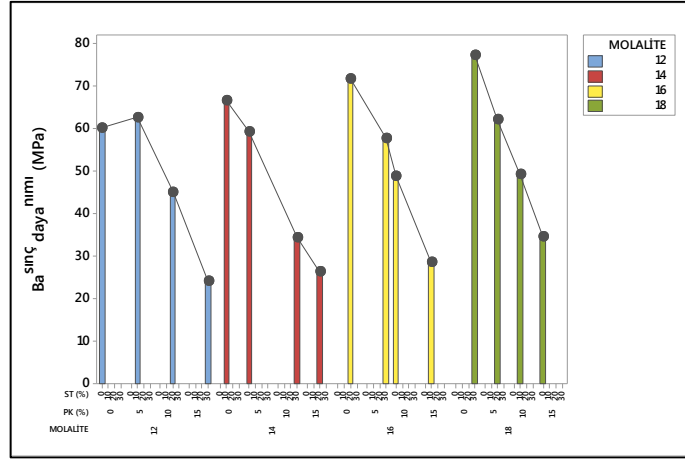
Şekil 4.26. Yoğunluk ile su emme oranı arasındaki ilişki

#### 4.5. Basınç Dayanımı Test Sonuçları

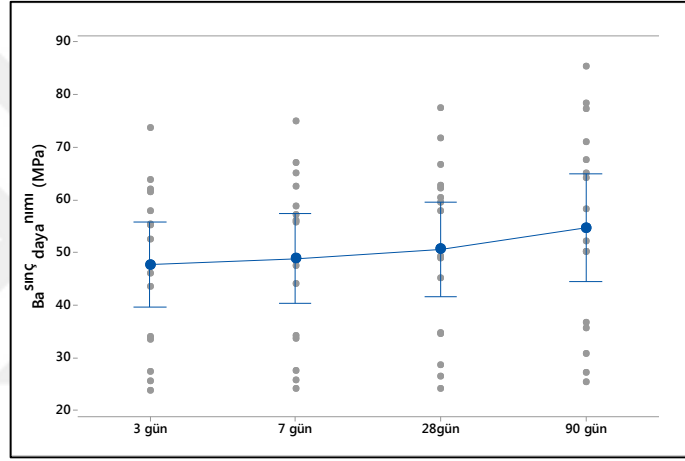
GP kullanımının etkisinin incelendiği bu tez çalışması kapsamında hazırlanan karışımlara ait basınç dayanımı değerlerindeki değişim Tablo 4.5, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'da verilmiştir.

Tablo 4.5. Geopolimer betonların basınç dayanımları

Karışım no	Basınç dayanımı (MPa)			
	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün
C0R0M12	55,40	56,1	60,33	67,61
C0R5M14	52,40	57,10	59,42	65,11
C0R10M16	46,10	48,30	48,91	50,10
C0R10M18	33,50	33,65	34,70	36,68
C10R0M14	61,40	65,10	66,74	77,32
C10R5M12	62,02	62,45	62,80	64,20
C10R10M18	47,41	47,50	49,30	50,20
C10R15M16	27,33	27,53	28,62	30,76
C20R0M16	63,77	66,97	71,71	78,38
C20R5M18	57,92	58,76	62,16	70,96
C20R10M12	43,47	44,10	45,21	52,20
C20R15M14	25,56	25,73	26,40	27,25
C30R0M18	73,70	74,93	77,40	85,31
C30R5M16	55,10	55,70	57,90	58,31
C30R10M14	33,98	34,21	34,55	35,61
C30R15M12	23,88	24,10	24,18	25,46



Şekil 4.27. Geopolimer beton basınç dayanımlarındaki değişim

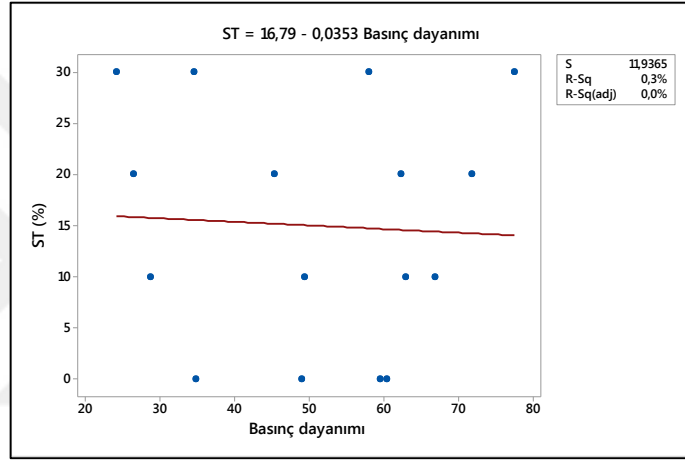


Şekil 4.28. Basınç dayanımlarındaki zamansal değişim oranı

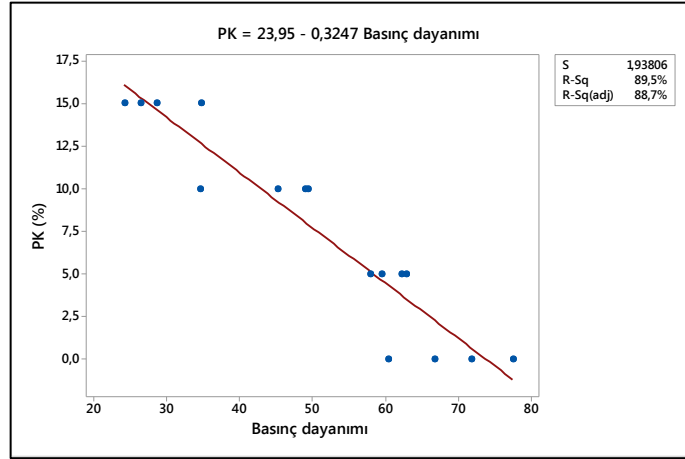
Geopolimer betonlarda değişen molalite değerlerine bağlı olarak değişen oranlarda kullanılan PK ve ST'nun etkilerinin gösteren kullanılmasının beton basınç dayanımlarındaki değişimlere etkileri (Tablo 4.5, Şekil 4.27, Şekil 4.28) incelendiğinde; dayanımlarda kullanılan %30 ST oranına sahip 18 mololitede maksimum 90 gün sonunda 85 MPa nihai dayanıma ulaşıldığı, ancak minimum dayanım değeri ise 12 mololitede hazırlanan ST %30 ve PK'nın %15 kullanıldığı grupta 25,46 MPa nihai dayanıma ulaşılmıştır. Bu gruplarda 90 günlük nihai dayanımlara ulaşılan değerler ile 3 günlük değerleri karşılaştırıldığında; maksimum dayanımın sağlandığı grupta 3. gününde dayanımının %89 sağladığı ve en düşük dayanım olan grupta da bu oranın %94 olarak gerçekleştiği görülmüştür. Nihai dayanımların yaklaşık %90'nına 3 günlük değerlerde ulaşılması ise bu çalışmada seçilen sıcak su kürü ile geopolimerlerin basınç dayanımlarında önemli bir etken olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca basınç dayanımlarındaki değişimin kullanılan

molalite değerine göre incelendiğinde 12 – 14 molalitede artan ST ve PK ya göre dayanımların azaldığı, ancak 16 – 18 molalite hazırlananlarda ise dayanımlarda artış meydana getirmek suretiyle katılan toz malzemelerin (SKTve PK) olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Bu durum düşük molalitede hazırlanan gruplarda karışıma girecek olan aktivatörlerin kullanılan toz malzemelere bağlı olarak yeterli olmadığı ve bu durumun dayanımlardaki düşüşe neden olan sebep olarak görülmüştür.

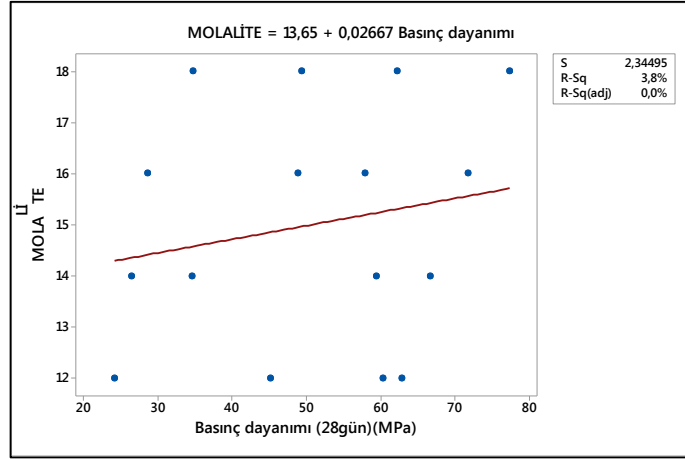
Basınç dayanımı üzerinde kullanılan malzemelerin etkileri Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31 'de verilmiştir.



Şekil 4.29. ST ile basınç dayanımı arasındaki değişim

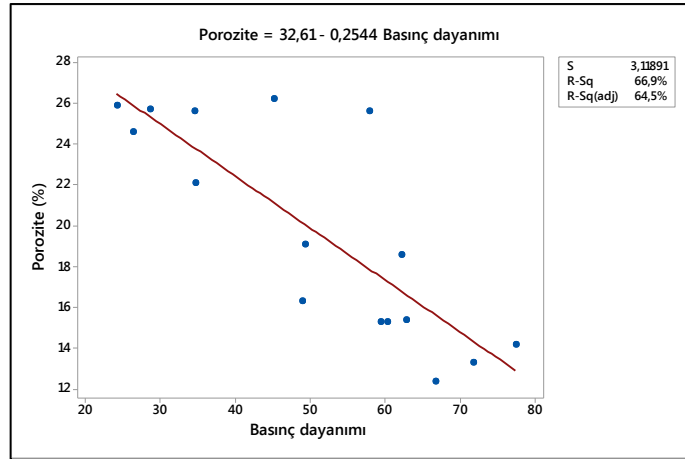


Şekil 4.30. PK ile basınç dayanımı arasındaki değişim



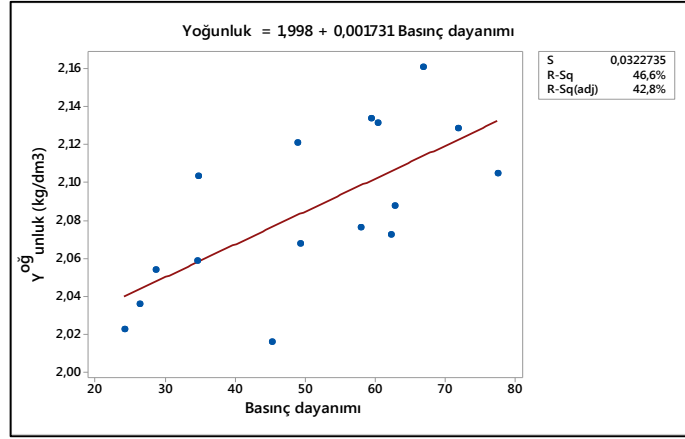
Şekil 4.31. Molalite ile basınç dayanımı arasındaki değişim

Geopolimerlerde kullanılan malzemeler ile basınç dayanımları arasındaki ilişki (Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31) incelendiğinde, ST kullanımının genel olarak dayanımlarda küçük bir azalışa neden olmasına karşılık, PK kullanımının basınç dayanımının (BD) etkisinin  $PK=16,79 - 0,3247 \cdot BD$  olan  $R^2=\% 89,5$  değeri ideal istatistiksel açıdan çok yüksek bir ilişkisinin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca molalitenin etkisi incelendiğinde yayılma çapı, yoğunluk, sporozite ve su emme oranlarına olan etkisinden daha fazla dayanıma etkisi olduğu ancak istatistiksel açıdan düşük olduğu belirlenmiştir. Bu farkın geopolimerizasyon sürecinde düşük molalitedeki gruplarda yeterli seviyede gerçekleşmeyen yapısal bağlar nedeniyle olabileceği öngörülmüştür.

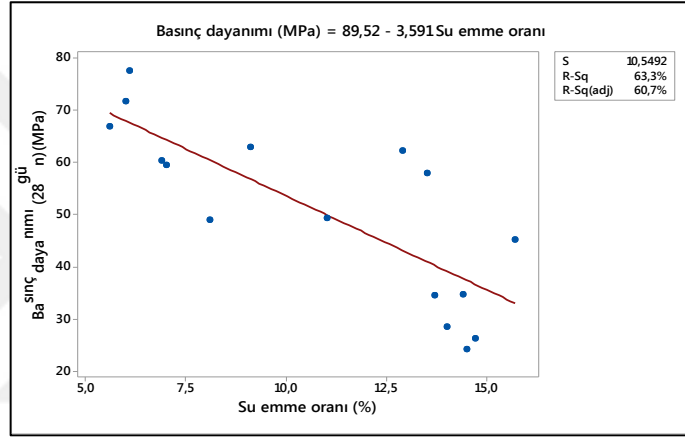


Şekil 4.32. Porozite ile basınç dayanımı arasındaki değişim

Basınç dayanımı ile porozite arasındaki ilişki Şekil 4.32' de verilmiştir. Porozite ile arasında  $P=32,61 - 0,2544 \cdot BD$  olan  $R^2=\% 66,9$ 'luk anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir.



Şekil 4.33. Yoğunluk ile basınç dayanımı arasındaki değişim

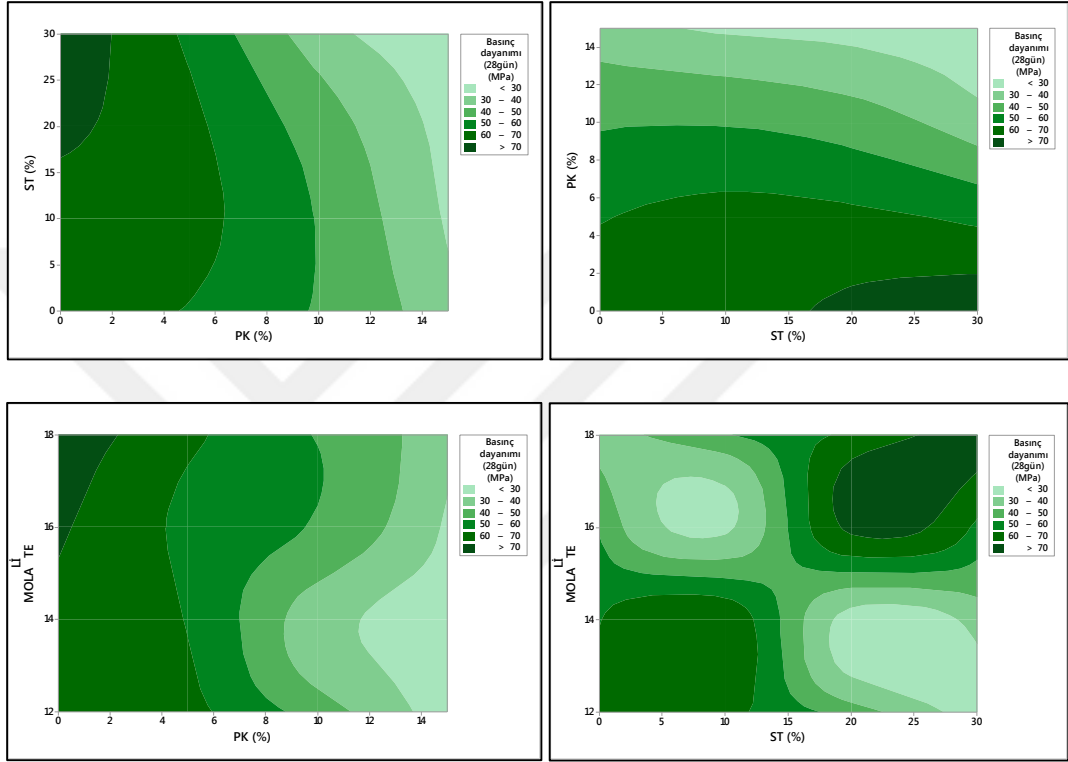


Şekil 4.34. Basınç dayanımı ve su emme oranı arasındaki ilişki

Şekil 4.33'te verilen yoğunluk ile arasındaki ilişki incelendiğinde ise;  $Y=1,998 - 0,001731.BD$  olan  $R^2=\% 46,6$ 'lık poroziteye göre daha düşük ve su emme oranı (Şekil 4.34) ile de  $BD = 86,52 - 3,591 SEO$  denklemi ile  $R^2=\% 63,3$ 'lük anlamlı bir ilişki elde edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında farklı molarite değerlerine sahip değişen oranlarda PK ve ST kullanımı ile elde edilebilecek geopolimer betonların kullanılabilir malzemeye göre tahmin edilmesinde yardımcı olabilecek olan Şekil 4.35 incelendiğinde; yüksek dayanımlar için 14-16 molarite ve 70 MPa üzeri dayanım için %2 PK veya 60 MPa üzeri dayanımlar için de %5 oranını geçmeyecek şekilde PK kullanımının etkili olacağı belirlenmiştir. 70 MPa üzeri dayanımlar için ayrıca ST kullanımında %15 ve üzeri oranlarında kullanılması durumunda sağlanacağı ancak 60 MPa ve üzeri dayanım hedeflenmesi durumunda da ST oranına bakılmaksızın çalışmaya konu her oranda

kullanımında istenilen değerin rahatlıkla sağlanacağı belirlenmiştir. Ancak ST kullanımlarında malzemenin hetorejen bir malzeme olması ve elde olmayan değişkenler de dikkate alındığında basınç dayanımları için yüksek molalite düşük toz ya da düşük molalite yüksek toz oranı kullanılmasında düşük dayanımlarda elde edilebileceği görülmüştür.



Şekil 4.35. Değişkenlere bağlı basınç dayanımı tahmini

#### 4.6. Yüksek Sıcaklık Etkisi Deney Sonuçları

Geoplimer örneği 90 günlük basınç dayanımından önce fırında ısıtılmış ve sonrasında işleme tabi tutulmuştur. Tüm örnekleri kapsayan basınç dayanımı testi sonuçları Tablo 4.6.'de sunulmuştur.

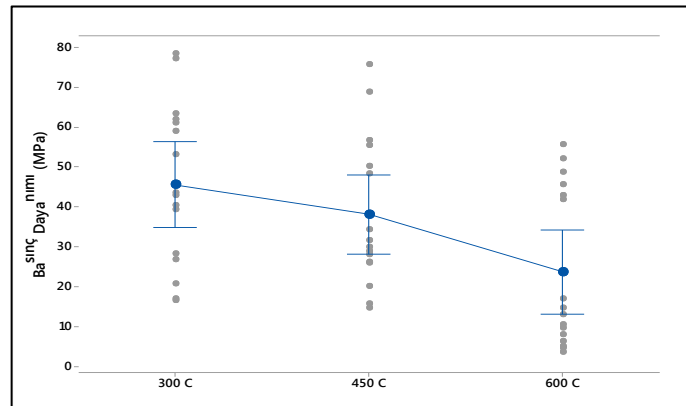
Yangın dayanımı değerleri incelendiğinde (Tablo 4.6), 300°C, 600°C ve 900°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin sıcaklığa bağlı olarak dayanımlarında genel olarak dayanım kaybı yaşadıkları görülmüştür. Ancak 300°C de tüm gruplarda dayanımlar 16,73 MPa ile 78,38 MPa arasında değiştiği ve bu değişimin sırasıyla ST %30 PK %15 ve 12 molalite hazırlanan grupta en düşük dayanım, 16 molalitede %20



ST kullanılan grupta ise en yüksek dayanım elde edilmiştir. Bu durum 450°C de sırasıyla 14,84 MPa ve 75.70 MPa, 600 °C’de ise 3.64 MPa ile 12 molalite, ST %20, PK %10 kullanılan grupta ve 55.64 MPa 18 molalite, ST %30, PK %0 olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca 300°C’de gerçekleşen dayanım kayıpları hesaplandığında maksimum kaybın %37.43 ile ST %20, P %15 ve 14 molalite olan grupta gerçekleştiği belirlenmiştir. 450°C de ise bu kaybın %59.03 ile ST %20, PK %5 ve 18 molalite hazırlana grupta 600 °C de %93.02 maksimum kayıpla ST %20, PK %10 ve 12 molalite olan grupta tespit edilmiştir. Sıcaklığın 300°C den 600°C’ye çıkarılması durumunda dayanım kaybı olmasına (Şekil 4.36) rağmen karışıma ilave edilen ST ve PK’nın olumlu etkisinin çok az miktarda olduğu görülmüştür.

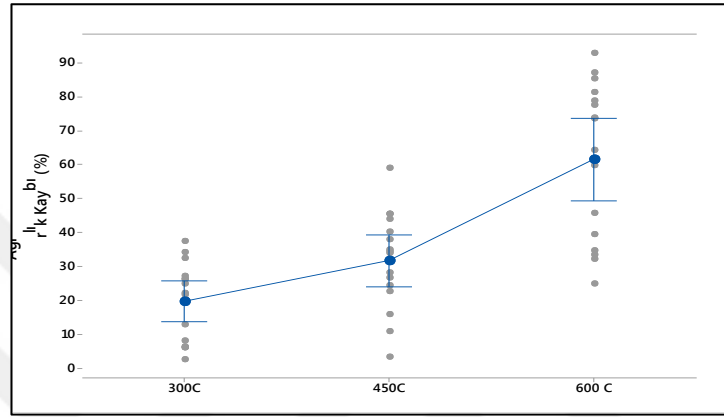
Tablo 4.6.Yüksek sıcaklıklar sonrası dayanımlar

Grup No.	300°C (MPa)	450°C (MPa)	600°C (MPa)
C0R0M12	63,48	56,85	45,74
C0R5M14	61,16	50,32	48,88
C0R10M16	43,60	29,96	6,40
C0R10M18	27,00	26,33	14,77
C10R0M14	77,32	68,86	41,99
C10R5M12	58,97	48,42	17,01
C10R10M18	39,37	28,08	10,57
C10R15M16	20,76	20,16	8,07
C20R0M16	78,38	75,70	52,09
C20R5M18	53,28	29,07	42,88
C20R10M12	40,58	34,46	3,64
C20R15M14	17,05	14,84	9,73
C30R0M18	61,98	55,46	55,64
C30R5M16	43,00	31,72	13,05
C30R10M14	28,36	26,06	5,18
C30R15M12	16,73	15,79	4,72

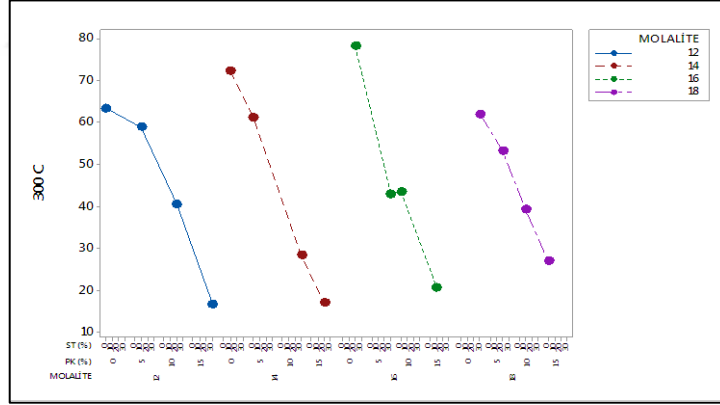


Şekil 4.36.Yüksek sıcaklık etkisine bağlı dayanım kaybı değişimi

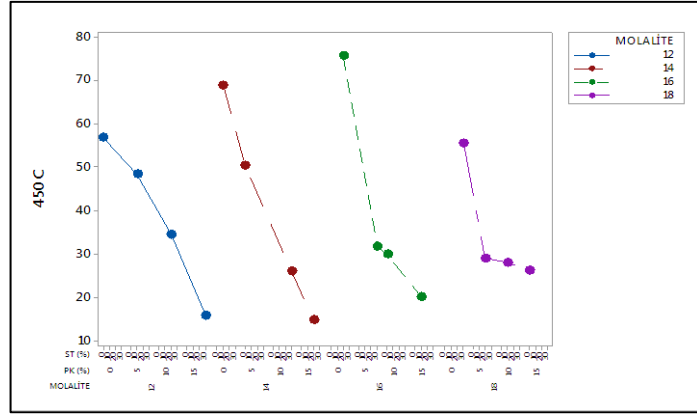
Yüksek sıcaklığın geopolimerlerde oluşturduğu kaybın ağırlık olarak belirlenmesinde verilen Şekil 4.37 incelendiğinde; 300 °C’de meydana gelen ağırlık kaybının ortalama %20 olduğu, artan 2 kat sıcaklık değerinde ise sıcaklıkla doğru orantılı olarak 3 kat daha fazla ağırlık kaybı yaşanmıştır. Bu durum geopolimerlerde geopolimerizasyon sonucu oluşan kimyasal bağların sıcaklık etkisi ile geopolimer örneklere göre daha çabuk bozulma ve daha zayıf bağ oluşturması ile açıklanabilir.



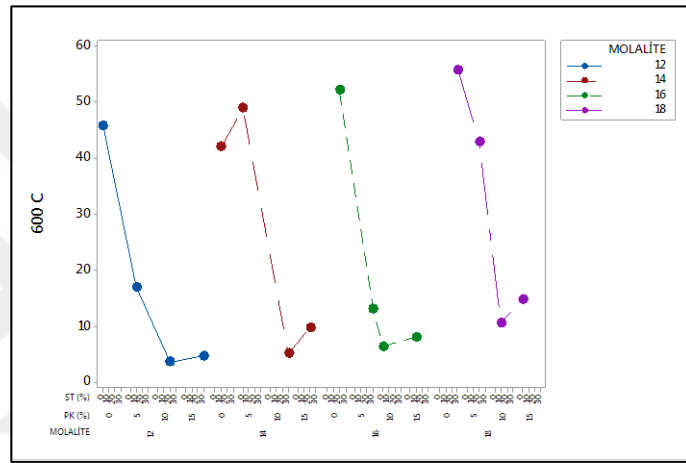
Şekil 4.37. Yüksek sıcaklık etkisine bağlı ağırlık kaybı değişimi



Şekil 4.38. 300°C’de basınç dayanımı değişimi



Şekil 4.39. 450 °C'de basınç dayanımı değişimi



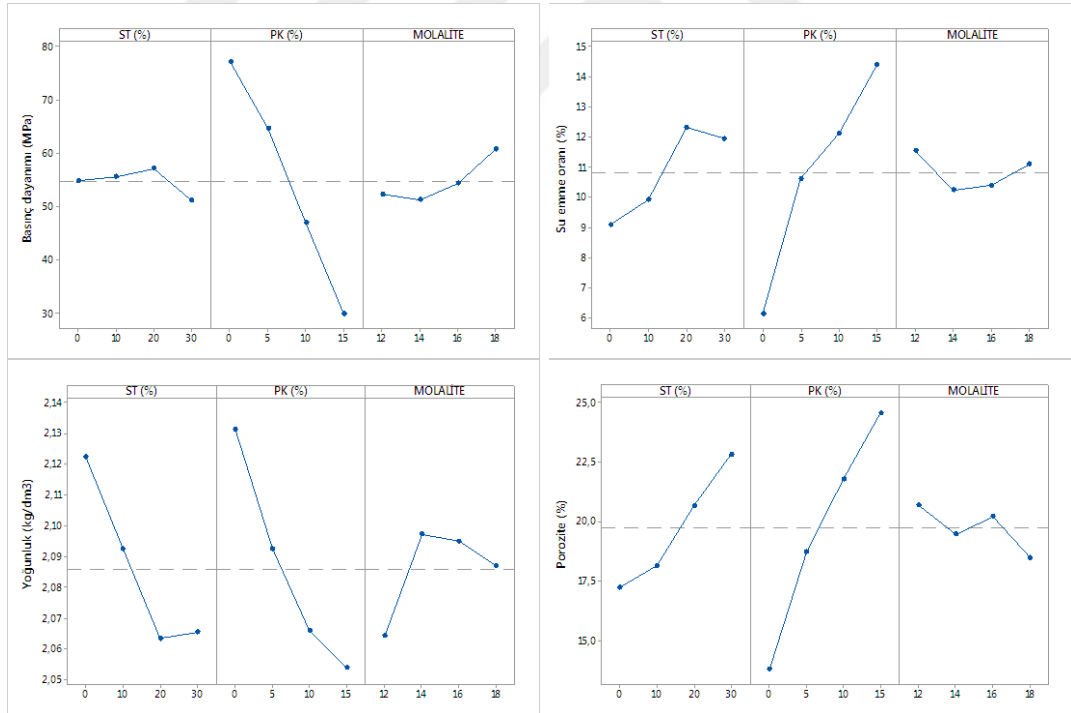
Şekil 4.40. 600 °C'de basınç dayanımı değişimi

Yüksek sıcaklık etkisi sonuçları, doğası ve ısıya dirençli bileşimi nedeniyle uçucu kül katkısı açısından analiz edilmiştir. Sıcaklık derecesi arttıkça (Şekil 4.38, Şekil 4.39 ve Şekil 4.40) 600°C'de ölçülen yüksek sıcaklığa dayanım değerinin düşüş eğilimi gösterdiği görülmektedir. Genellikle bütün numuneler 300°C ila 600°C arasında ısıtıldığında ortalama %37 oranında basınç dayanımı kaybetmektedirler ve 600°C'nin üstünde hemen hemen hiç basınç toleransı kalmamaktadır. İlk aşamadaki dayanıklılık artışının sıcaklık artışı 600°C'ye çıktığında azaldığı açıkça görülmektedir. Birçok araştırmacı beton tepkimesini yüksek sıcaklıkta test etmiş ve sıcaklığın başlangıç aşamasında (400°C'ye kadar) dayanımda bir artış olduğunu ve daha sonra düşüş eğilimi olduğunu gözlemlemiştir.

#### 4.7. Taguchi Optimizasyonu

Taguchi optimizasyon metodunu kullanarak, yapılandırılmış deneysel çalışma da basınç dayanımı yoğunluk su emme oranı ve porozite değerlerinden elde edilen optimum sonuçlar Şekil 4.41’de ve bu sonuçlara ait optimum seviyeleri ise Tablo 4.7, Tablo 4.8, Tablo 4.9 ve Tablo 4.10’da verilmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; optimizasyonlarda bazen mevcut deneylerden herhangi biri olabilirken, bu çalışma kapsamında yapılan deneylerin haricinde başka Tablo 4.7, Tablo 4.8, Tablo 4.9 ve Tablo 4.10’da verilen 3 farklı karışımda elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında basınç dayanımı için optimum sonuca ST % 20, PK %0 ve molarite 18’de, yoğunluk ve su emme oranı için optimum sonuca ST % 0, PK %0 ve molarite 14’te ve porozite için optimum sonuca da ST % 0, PK %0 ve molarite 16’da ulaşılmıştır.



Şekil 4.41. Taguchi optimizasyonu kontrol faktör grafikleri

Tablo 4.7. Basınç dayanımı için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri

Kontrol faktörleri	Simge	Birim	Optimum Seviye	Optimum değer
Seramik tozu	ST	%	3	20
Pirin kabuğu külü	PK	%	1	0
Molalite	m	%	2	18

Tablo 4.8.Yoğunluk için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri

Kontrol faktörleri	Simge	Birim	Optimum Seviye	Optimum değer
Seramik tozu	ST	%	1	0
Pirin kabuğu külü	PK	%	1	0
Molalite	m	%	2	14

Tablo 4.9. Su emme oranı için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri

Kontrol faktörleri	Simge	Birim	Optimum Seviye	Optimum değer
Seramik tozu	ST	%	1	0
Pirin kabuğu külü	PK	%	1	0
Molalite	m	%	2	14

Tablo 4.10.Porozite için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri

Kontrol faktörleri	Simge	Birim	Optimum Seviye	Optimum değer
Seramik tozu	ST	%	1	0
Pirin kabuğu külü	PK	%	1	0
Molalite	m	%	3	18

Taguchi optimizasyon sonucu elde edilen değerlerin kontrol için yapılan doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar, yapılan optimizasyonun başarısını yansıtmaktadır. Bu doğrultuda optimal şartların tahmin edildiği ve hesaplamalar sonucu elde edilen değerler ile doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen değerler ulaşıldığı görülmüş ve sonuçlar Tablo 11’de sunulmuştur.

Tablo 4.11. Kontrol faktörleri için optimum sonuçlar ve doğrulama deneyleri

Deney	Taguchi Optimizasyonu	Tahmin edilen			Gerçek değer		
		ST	PK	m	ST	PK	m
Basınç dayanımı (MPa)	Seviye	3	1	2	3	1	2
	Değer	0	0	14	0	0	14
	Sonuç	83,7075			81,24		
Yoğunluk (kg/dm <sup>3</sup> )	Seviye	1	1	2	1	1	2
	Değer	0	0	14	0	0	14
	Sonuç	2,7118			2,68		
Su emme oranı (%)	Seviye	1	1	2	1	1	2
	Değer	0	0	14	0	0	14
	Sonuç	3,85			4,3		
Porozite (%)	Seviye	1	1	3	1	1	3
	Değer	0	0	16	0	0	16
	Sonuç	10.1			11,17		

Doğrulama deney sonuçlarında elde edilen gerçek değerler incelendiğinde basınç dayanımı, yoğunluk, su emme oranı ve porozite için elde edilen bütün sonuçların yeterli olduğu ve Taguchi optimizasyonunun başarıyla uygulandığı belirlenmiştir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Atık seramik tozu (ST) ve pirinç kabuğu külünün (PK), geopolimer beton içerisinde kullanılabilirliğinin ve ideal kullanım oranlarının araştırıldığı bu çalışma kapsamında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Geopolimer betonlarda yayılma çapının artışında PK kullanımının etkisinin olmadığı, aksine yayılma çapının ancak yüksek molalite ve yüksek oranda ST kullanımında mümkün olduğu, PK kullanımında yayılma çapının artışından ziyade azaldığı 20 cm 'den küçük değerler ulaşabileceği,
- Geopolimer betonlardaki değişik molalitelere hazırlanan karışımlarda yüksek oranda PK ve ST kullanılmasında minimum yoğunlukların elde edildiği, ancak artan molalite ile bu yoğunluklarda küçük bir artışın olduğu belirlenmiştir. Yüksek yoğunlukların ise 12 - 14 gibi düşük molalite seviyelerinde hazırlanan karışımlardaki maksimum %2 -3 PK ve % 5-15 arası ST kullanılmasında sağlanabileceği,
- Porozitenin ya 12-14 gibi düşük molalitede %6 PK veya %10 ST oranlarının geçilmemesi durumunda minimum olabileceği, yükselen oranlarında ise porozitede artışlara neden olacağı,
- Su emme oranlarındaki artışta PK'nın etkisinin ST kullanımından daha çok olduğu, poroziteyle bağlantılı olarak porozitenin yüksek seviyelerinde yüksek su emme oranına sahip geopolimer elde edilebileceği,
- Basınç dayanımları düşük porozite ve su emme oranları düşük olan gruplarda 50 MPa üzeri dayanımların elde edilebileceği, PK etkisinin ST kullanımından basınç dayanımı üzerine daha çok etkili olduğu ve 70 MPa üzeri dayanım için 14-16 molalite ile %2 PK veya %15 ST ya da 60MPa üzeri dayanımlar için de %5 oranını geçmeyecek şekilde PK kullanımının etkili olacağı,
- Yüksek sıcaklık etkisinde ise PK kullanımının etkisinden ST kullanımının etkisinin geopolimer malzemeler üzerinde daha çok etkisinin olacağı,

- Taguchi optimizasyon metodunu kullanarak, yapılan deneysel çalışma da basınç dayanımı yoğunluk su emme oranı ve porozite değerlerinden elde edilen optimum sonuçlara göre sırasıyla basınçta ST % 20, PK %0 ve molalite 18’de, yoğunluk ve su emme oranında ST % 0, PK %0 ve molalite 14’te ve porozite ise ST % 0, PK %0 ve 16 molalitede ulaşılabileceği görülmüştür.

Ayrıca bu çalışma kapsamında kullanılan PK ve ST kullanımlarının geopolimer malzemelerde kullanılması durumunda yeterli dayanıma sahip malzemeler elde edilebileceği, ancak yüksek sıcaklık etkisi olabilecek yerlerde yeterli önlemlerin alınmasıyla kullanılabilir bir malzemedir.

### 5.1. Öneriler

Geopolimer betonlarda PK ve ST ile molalitenin etkisinin araştırıldığı bu çalışmada ayrıca aşağıda verilen hususlarda dikkate alınması fayda sağlayacaktır.

- Kullanılan malzeme oranları arası farkın azaltılarak optimum oranın daha hassas araştırılması,
- Çalışmada kullanılan YFC, ST ve PK gibi malzemelere ayrıca uçucu kül, metakaolin gibi malzeme karışımları ilave edilerek etkilerinin araştırılması,
- Geopolimer betonlarda akışkanlaştırıcı gibi sıklıkla beton üretimlerinde kullanılan kimyasalların kullanılabilirliğinin etkisi,
- Karışımlarda kullanılan SS ve SH aktivatörleri yerine aktivatörlerin etkisinin belirlenmesinde POH ve  $P_2SiO_3$  kullanımı,
- Çalışmada kullanılan kür şartına ilave olarak farklı kür şartlarının karşılaştırılması,
- Kullanılan PK ve ST’nun farklı incelik seviyelerinde öğütülerek kullanılmasında geopolimer malzemeye etkisi
- Optimizasyon karışımlarının hazırlanmasında ve deneylerin gerçekleştirilmesinde farklılık olma ihtimalinin araştırılması,
- Bu çalışma ile geopolimer betonların özelliklerinin belirlenmesinde yapılan deneyler dışındaki deneyler (permeabilite, SEM gibi) ile malzeme özelliklerinin daha detaylı araştırılmalıdır.

## KAYNAKÇA

- Al Muhit, B. A., Foong, K. Y., Alengaram, U. J., & Mohd, Z. J. (2013). Geopolymer concrete : A building material for the future. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 13(1), 2013.
- Albitar, M., Mohamed Ali, M. S., Visintin, P., & Drechsler, M. (2017). Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. *Construction and Building Materials*, 136(January), 374–385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.056>
- Anderson, D. J., Smith, S. T., & Au, F. T. K. (2016). Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 117, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.153>
- Arnold, M. C., de Vargas, A. S., & Bianchini, L. (2017). Study of electric-arc furnace dust (EAFD) in fly ash and rice husk ash-based geopolymers. *Advanced Powder Technology*, 28(9), 2023-2034.
- Ash, F. L. Y. (2011). Aggregate & Cementitious Products. 2–5. [http://www.asa-inc.org.au/uploads/default/files/asa\\_rds\\_1.pdf](http://www.asa-inc.org.au/uploads/default/files/asa_rds_1.pdf)
- ASTM C 1437-07. (2009). American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. Annual Book of ASTM Standards, 6–7.
- ASTM C 293-02. (2002), American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading), 1–3. <https://doi.org/10.1520/D1635>
- ASTM C 642. (1997). American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. Annual Book of ASTM Standards, (March), 1–3.
- ASTM, C. 1585-04. (2004). American Society for Testing and Materials, Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes. ASTM International.
- ASTM, C. 642-13. (2013). American Society for Testing and Materials, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete.
- Awoyera, P. O., Akinmusuru, J. O., Dawson, A. R., Ndambuki, J. M., & Thom, N. H. (2018). Microstructural characteristics, porosity and strength development in ceramic-laterized concrete. *Cement and Concrete Composites*, 86, 224–237. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.017>
- Cong, X., & Zhou, W. (2018). Utilisation of water quenched slag as fine aggregate in alkali activated mortar. *Construction and Building Materials*, 189, 498-511.



- Damineli, B. L., Agopyan, V., & John, V. M. (2010). A new strategy for mitigation of CO<sub>2</sub> emissions by reducing the cement consumption of ordinary concretes. In *W108-Special Track 18th CIB World Building Congress May 2010 Salford, United Kingdom* (p. 121).
- Darsanasiri, A. G. N. D., Matalkah, F., Ramli, S., Al-Jalode, K., Balachandra, A., & Soroushian, P. (2018). Ternary alkali aluminosilicate cement based on rice husk ash, slag and coal fly ash. *Journal of Building Engineering*, *19*, 36-41.
- Dash, M. K., Patro, S. K., & Rath, A. K. (2016). Sustainable use of industrial-waste as partial replacement of fine aggregate for preparation of concrete – A review. *International Journal of Sustainable Built Environment*, *5*(2), 484–516. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.04.006>
- Devi, V. S., & Gnanavel, B. K. (2014). Properties of concrete manufactured using steel slag. *Procedia Engineering*, *97*, 95-104.
- El-Dieb, A. S., & Kanaan, D. M. (2018). Ceramic waste powder an alternative cement replacement—Characterization and evaluation. *Sustainable Materials and Technologies*, *17*, e00063.
- El-Gamal, S. M. A., El-Hosiny, F. I., Amin, M. S., & Sayed, D. G. (2017). Ceramic waste as an efficient material for enhancing the fire resistance and mechanical properties of hardened Portland cement pastes. *Construction and Building Materials*, *154*, 1062-1078.
- Erdoğan, S. T. (2014). Are geopolymers environmentally friendly? Materials of Construction Laboratory, METU Department of Civil Engineering, *Ankara. Cement Concrete World*, *107*, 32–44.
- Fleury, M., Sissmann, O., Brosse, E., & Chardin, M. (2017). A Silicate Based Process for Plugging the Near Well Bore Formation. *Energy Procedia*, *114*(November 2016), 4172–4187. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1558>
- Geng, Y., Zhao, M., Yang, H., & Wang, Y. (2019). Creep model of concrete with recycled coarse and fine aggregates that accounts for creep development trend difference between recycled and natural aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, *103*(April), 303–317. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.013>
- Group, H. B. M. (2017). Australasian (iron and steel) Slag Association Membership Annual Survey Results January to December 2016. (December 2016), 1–4.
- Guo, Y., Xie, J., Zhao, J., & Zuo, K. (2019). Utilization of unprocessed steel slag as fine aggregate in normal- and high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, *204*, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.178>

- Guo, Y., Xie, J., Zheng, W., & Li, J. (2018). Effects of steel slag as fine aggregate on static and impact behaviours of concrete. *Construction and Building Materials*, 192, 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.129>
- Habert, G., d’Espinose de Lacaillerie, J.B., Roussel, N., 2011. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*. 19: 1229-1238.
- Hafez, A. I., Khedr, M. M. A., Mohammed, M. S., Osman, R. M., & Sabry, R. M. (2017). Utilization of rice hHafez, A. I., Khedr, M. M. A., Mohammed, M. S., Osman, R. M., & Sabry, R. M. (2017). Utilization of rice husk ash and ceramic wastes in manufacturing of developed cement bricks. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(9),. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(9), 2854–2862.
- Huseien, G. F., Sam, A. R. M., Mirza, J., Tahir, M. M., Asaad, M. A., Ismail, M., & Shah, K. W. (2018). Waste ceramic powder incorporated alkali activated mortars exposed to elevated Temperatures: Performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 187, 307-317.
- Hwang, C. L., Damtie Yehualaw, M., Vo, D. H., & Huynh, T. P. (2019). Development of high-strength alkali-activated pastes containing high volumes of waste brick and ceramic powders. *Construction and Building Materials*, 218, 519–529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.143>
- Kamseu, E., à Moungam, L. B., Cannio, M., Billong, N., Chaysuwan, D., Melo, U. C., & Leonelli, C. (2017). Substitution of sodium silicate with rice husk ash-NaOH solution in metakaolin based geopolymer cement concerning reduction in global warming. *Journal of cleaner production*, 142, 3050-3060.
- Kaur, K., Singh, J., & Kaur, M. (2018). Compressive strength of rice husk ash based geopolymer: The effect of alkaline activator. *Construction and Building Materials*, 169, 188-192.
- Kett, I. (2009). Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (C 109). *Engineered Concrete*, 29–31. <https://doi.org/10.1201/9781420091175-c5>
- Komnitsas, K. A. (2011). Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities. *Procedia Engineering*, 21, 1023-1032.
- Kralj D., (2009). Experimental study of recycling lightweight concrete with aggregates containing expanded glass, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 87, pp. 267-273
- Liew, Y. M., Heah, C. Y., Li, L. yuan, Jaya, N. A., Abdullah, M. M. A. B., Tan, S. J., & Hussin, K. (2017). Formation of one-part-mixing geopolymers and geopolymer ceramics from geopolymer powder. *Construction and Building Materials*, 156, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.110>

- Liang, G., Zhu, H., Zhang, Z., & Wu, Q. (2019). Effect of rice husk ash addition on the compressive strength and thermal stability of metakaolin based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 222, 872-881.
- Masi, G., Rickard, W., Vickers, L., Bignozzi, M.C., Riessen, A., 2014. A comparison between different foaming methods for synthesis of light weight geopolymers, *Ceramics International*, 40: 13891-13902.
- Matori, K. A., Haslinawati, M. M., Wahab, Z. A., Sidek, H. A. A., Ban, T. K., & Ghani, W. A. W. A. K. (2009). Producing Amorphous White Silica from Rice Husk. *Journal of Basic and Applied Sciences*, 1(3), 512–515.
- Medina, C., Frías, M., & Sánchez De Rojas, M. I. (2012). Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 31, 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.075>
- Medina, C., del Bosque, I. S., Frías, M., & de Rojas, M. S. (2018). Design and characterisation of ternary cements containing rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials*, 187, 65-76.
- Mistry, B. (2016). Properties and Industrial Applications of Rice husk. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 6(10), 2677–2679.
- Mehta, A., & Siddique, R. (2018). Sustainable geopolymer concrete using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash: strength and permeability properties. *Journal of cleaner production*, 205, 49-57.
- Nimwinya, E., Arjhan, W., Horpibulsuk, S., Phoo-ngenkham, T., Poowancum, A., 2016. A sustainable calcined water treatment sludge and rize husk ash geopolymer. *Journal of Cleaner Production*. 119: 128-134
- Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., Pothisiri, T., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2019). Influence of rice husk ash on mechanical properties and fire resistance of recycled aggregate high-calcium fly ash geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 119797.
- Padhi, R. S., Patra, R. K., Mukharjee, B. B., & Dey, T. (2018). Influence of incorporation of rice husk ash and coarse recycled concrete aggregates on properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 173, 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.270>
- Penteado, C. S. G., Viviani De Carvalho, E., & Lintz, R. C. C. (2016). Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 112, 514–520. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.142>
- Rajamane, N. P., Nataraja, M. C., & Lakshmanan, N. (2016). (e.g. aluminosilicate gels, glasses, and zeolites).An introduction to geopolymer concrete An introduction to geopolymer concrete. (May).

- Ren, J., Guo, S. Y., Su, J., Zhao, T. J., Chen, J. Z., & Zhang, S. L. (2019). A novel TiO<sub>2</sub>/Epoxy resin composited geopolymer with great durability in wetting-drying and phosphoric acid solution. *Journal of Cleaner Production*, 227(May), 849–860. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.203>
- Sturm, P., Gluth, G. J. G., Brouwers, H. J. H., & Kühne, H. C. (2016). Synthesizing one-part geopolymers from rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 124, 961-966.
- Sánchez, F. A. L., Sousa, V. C. de, Rocha, T. L. A. de C., Calheiro, D., Fernandes, I. J., Camacho, A. L. D., & Moraes, C. A. M. (2017). Characterization of Silica Produced from Rice Husk Ash: Comparison of Purification and Processing Methods. *Materials Research*, 20, 512–518. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-1043>
- Shalini, A., Gurunarayanan, G., & Sakthivel, S. (2016). Performance of rice husk ash in geopolymer concrete. *Int J Innov Res Sci Tech*, 2, 73-77.
- Soltani, N., Bahrami, A., Pech-Canul, M. I., & González, L. A. (2015). Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials. *Chemical Engineering Journal*, 264, 899–935. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.056>
- Subaşı, S., Öztürk, H., & Emiroğlu, M. (2017). Utilizing of waste ceramic powders as filler material in self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 149, 567–574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.180>
- Suhendro, B. (2014). Toward green concrete for better sustainable environment. *Procedia Engineering*, 95, 305-320.
- Sun, J., Feng, J., & Chen, Z. (2019). Effect of ferronickel slag as fine aggregate on properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 206, 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.187>
- Thomas, B. S. (2018). Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(July 2016), 3913–3923. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.081>
- Tong, K. T., Vinai, R., & Soutsos, M. N. (2018). Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders. *Journal of cleaner production*, 201, 272-286.
- TOY, H. C. (1924). the Permeability of Concrete. *Selected Engineering Papers*, 1(20). <https://doi.org/10.1680/isenp.1924.15131>
- TS EN 206-1. (2002). Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- Vásquez, A., Cárdenas, V., Robayo, R. A., & de Gutiérrez, R. M. (2016). Geopolymer based on concrete demolition waste. *Advanced Powder Technology*, 27(4), 1173-1179.
- Villaquirán-Cacedo, M. A., & de Gutiérrez, R. M. (2018). Synthesis of ceramic materials from ecofriendly geopolymer precursors. *Materials Letters*, 230(July), 300–304. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.07.128>
- Villaquirán-Cacedo, M. A., & de Gutiérrez, R. M. (2018). Synthesis of ceramic materials from ecofriendly geopolymer precursors. *Materials Letters*, 230, 300-304.
- Walkley, B., Ke, X., Hussein, O. H., Bernal, S. A., & Provis, J. L. (2019). Incorporation of strontium and calcium in geopolymer gels. *Journal of Hazardous Materials*, 382, 121015. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121015>
- Xie, X., Lu, G., Liu, P., Wang, D., Fan, Q., & Oeser, M. (2017). Evaluation of morphological characteristics of fine aggregate in asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 139, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.044>
- Yaragal, S. C., Basavana Gowda, S. N., & Rajasekaran, C. (2019). Characterization and performance of processed lateritic fine aggregates in cement mortars and concretes. *Construction and Building Materials*, 200, 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.072>
- Yüksel, I., Bilir, T., & Özkan, Ö. (2007). Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate. *Building and Environment*, 42(7), 2651–2659. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.003>
- Yaseri, S., Verki, V. M., & Mahdikhani, M. (2019). Utilization of high volume cement kiln dust and rice husk ash in the production of sustainable geopolymer. *Journal of Cleaner Production*, 230, 592-602.
- Zareei, S. A., Ameri, F., Shoaie, P., & Bahrami, N. (2019). Recycled ceramic waste high strength concrete containing wollastonite particles and micro-silica: A comprehensive experimental study. *Construction and Building Materials*, 201, 11-32.
- Zhang, Z. (2014). The Effects of Physical and Chemical Properties of Fly ash on the Manufacture of Geopolymer Foam Concretes Zuhua Zhang. 1–248.
- Zhou, W., Yan, C., Duan, P., Liu, Y., Zhang, Z., Qju, X., Li, D., 2016. A comparative study of high and low Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fly ash based geopolymers: The role of mix proportion factors and curing temperatures
- Živica, V., Palou, M. T., & Križma, M. (2015). Geopolymer cements and their properties: a review. *Building Research Journal*, 61(2), 85-100.

Zou, Y., & Yang, T. (2019). Rice Husk, Rice Husk Ash and Their Applications. In Rice Bran and Rice Bran Oil. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812828-2.00009-3>



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mohamed Ahmed Mohamed-BILAL

Doğum Yeri ve Yılı : 29.03. 1987 / BRAAK-LIBYA

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce, Arapça

E-posta : mhamed2018@gmail.com



### Eğitim Durumu

Lise : Afrika Birliği Lisesi - Sebha / Libya, 2006

Lisans : Yüksek Kapsamlı Meslekler Enstitüsü Eshatee /Libya, 2011