

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

**ATIK LASTİK KATKILI GEOPOLİMER BETONUN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Abdussalam M. Hasan SARKAZ

**Danışman
Jüri Üyesi
Jüri Üyesi**

**Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ
Prof. Dr. Sırrı ŞAHİN
Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Y. BAYRAKTAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

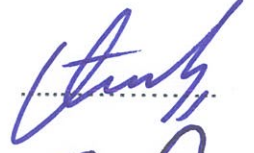
KASTAMONU – 2020

TEZ ONAYI

Abdussalam M. Hassan SARKAZ tarafından hazırlanan "**Atık Lastik Katkılı Geopolimer Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**" adlı tez çalışması **06/02/2020 tarihinde** 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. Sırrı ŞAHİN
Atatürk Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Y. BAYRAKTAR
Kastamonu Üniversitesi



Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Nur BELKAYALI



TAAHHÜTNAME

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

Abdussalam M. Hasan SARKAZ



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ATIK LASTİK KATKILI GEOPOLİMER BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Abdussalam M. Hasan SARKAZ

Fen Bilimleri Enstitüsü

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk MEMİŞ

İnşaat sektörü, modern altyapıların gerektirdiği sürdürülebilirliği karşılamak için giderek çevre dostu malzemelerin kullanımına yönelmektedir. Bu durum, özellikle son yirmi yılda, artan küresel ısınma sonucu gerçekleşen ve üretiminde yüksek miktarda CaO_2 gazı yaydığı bilinen Portland çimentosunun (PÇ) yaygın kullanımı konusundaki endişelerin bir sonucudur. Bu endişeleri ortadan kaldırmayı hedefleyen PÇ'ye alternative olarak görülen geopolimer betonların gelişimi, çevre dostu beton üretme yolunda umut verici bir malzeme olarak inşaat sektöründe önemini giderek arttırmaktadır. Bununla birlikte, geopolimer bağlayıcıları sıradan Portland çimentosuna alternatif olarak düşünmek, daha düşük sera gazı emisyonu ve düşük enerji tüketimi nedeniyle bazı uygulamalarda sıradan PÇ'ye potansiyel bir alternatif bağlayıcı haline gelen 'yeni' bir malzemedir. Diğer taraftan, atık lastikler ise, artan karayolu taşımacılığı ve araçların kullanımı sonucunda oluşan, çevre içinde acil önlem alınması gereken bir diğer atık sorunu olarak önemini korumaktadır. Atılan bu atık lastikler genellikle 'siyah kirlilik' yaratır, çünkü kolayca ve biyolojik olarak parçalanmazlar, çevre için potansiyel bir tehdit oluştururlar.

Bu amaçla hazırlanan bu tez kapsamında, endüstriyel bir atık ürünü olan yüksek fırın cürufu (YFC) ile üretilebilecek geopolimer betonlarda, atık lastik kullanılmasının etkisini hem taze hem de sertleştirilmiş betonda araştırmaktadır. Bu amaçla atık lastik (AL) farklı boyutları tanımlayan A (0-1 mm), B (1-2 mm), C (2-4 mm) ve D (0-4 mm) olarak dört tip, % 5, % 10 ve %15 oranlarında olmak üzere AL agrega ile yer değiştirilerek 12 karışım, kontrol grubu ile de toplam 13 karışım hazırlanmıştır. YFC içeriği tüm karışımlar için 800 kg/m^3 olarak sabit kullanılmış ve hazırlanan geopolimer betonlarda yayılma çapı, yoğunluk, su emme oranı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı dâhil olmak üzere taze hal ve sertleştirilmiş hal beton testleri yapılmıştır. Ayrıca dayanıklılık açısından $300 \text{ }^\circ\text{C}$, $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $900 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak 3 farklı yüksek sıcaklığın geopolimer betondaki etkisi incelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, AL değişimi nedeniyle ile yayılma çapında azalmaya neden olduğu, en kötü değer D tipi ve %15 karışımında 21 cm ölçülmüş ve lastik içeriğindeki artışın, karışımın işlenebilirliğini azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca basınç dayanımının artan orana bağlı olarak dayanımları beklenildiği üzere azalttığı görülmüştür. Buna rağmen karışımların en iyi değeri 3 günde $50,16 \text{ MPa}$ ve 7 günlük dayanımda ise $52,87 \text{ Mpa}$ iken 28 günlük dayanımlarda da $56,18 \text{ Mpa}$ ile B grubu ve %5 AL kullanımında gerçekleşmiştir. Su emme

oranlarında ise C tipi AL kullanılmasında %15,35 ve D tipi AL kullanılmasında ise %15,03'lük bir değerler elde edilmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık etkileri incelendiğinde kullanılan AL ve geopolimerin özellikleri nedeniyle 900 °C'de numunelerdeki hasarlar nedeniyle dayanımlar belirlenememiştir. Ancak daha düşük sıcaklık derecelerinde ise beklenildiği üzere sıcaklık arttıķa, basınç dayanımının düştüğü belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık sonrası dayanımlarda en iyi basınç dayanımı, karışım için 300 °C 'de 39.56 ile A tipi ve %5 AL kullanımında elde edilmiştir. Artan tane boyutu (2-4 mm) ise yüksek sıcaklık sonucunda dayanımda en fazla dayanımda azalışa neden olmuş ve 8,76 MPa gibi bir değer elde edilmiştir. Bu sonuçlar AL'lerin geopolimer betonlarda önlemler alınmak koşulu ile belirli orana kadar kullanılabilineceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, atık lastik, crf, yüksek sıcaklık, ultrases geçiş hızı, sodyum silikat, sodyum hidroksit

2020, 74 Sayfa
Bilim Kodu: 91

ABSTRACT

MSc.Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF WASTE TIRE ADDED GEOPOLIMER CONCRETE

Abdussalam M. Hasan SARKAZ
Kastamonu Üniversitesi
Graduate School of Natural And Applied Sciences
Department of Material Science and Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Selçuk MEMİŞ

The construction industry is increasingly turning to the use of environmentally friendly materials to meet the sustainability required by modern infrastructures. This is a result of concerns about the widespread use of Portland cement (OPC), which has been caused by increased global warming and is known to emit a high amount of CaO_2 gas in its production over the past two decades. The development of geopolymer concrete, which is considered as an alternative to OPC, which aims to eliminate these concerns, is increasing its importance in the construction sector as a promising material for producing environmentally friendly concrete. However, considering geopolymer binders as an alternative to ordinary Portland cement is a 'new' material that has become a potential alternative binder to OPC in some applications due to lower greenhouse gas emissions and low energy consumption. On the other hand, waste tires remain important as another waste problem caused by increased road transport and the use of vehicles, which requires immediate action for the environment. These waste tires, which are discarded, often cause 'black pollution' because they do not break down easily and biologically, they pose a potential threat to the environment.

This thesis it investigates the effect of using waste rubber in both fresh and hardened properties in geopolymer concrete that can be produced with blast furnace slag (GBFS), which is an industrial waste product. For this purpose, four types of waste rubber were used and these types included, A (0-1 mm), B (1-2 mm), C (2-4 mm) and D (0-4 mm), which define different sizes, are 5%, 10% and 15%. waste rubber was used as aggregate and totaly13 mixes were prepared with the control group. GBFS content has been used as a constant of $800 \text{ kg} / \text{m}^3$ for all mixtures. Fresh and hardened state concrete tests have been carried out, the conducted tests included; flow diameter, density, water absorption rate, flexural strength and compressive strength. In addition, the effects of 3 different elevated temperatures in the geopolymer concrete, as $300 \text{ }^\circ\text{C}$, $600 \text{ }^\circ\text{C}$ and $900 \text{ }^\circ\text{C}$, were investigated.

The obtained results within the scope of this study have indicated that flow diameter decreased due to the change of waste tire, the lowest value was 21 cm in D type and 15% mixture, and the increase in the tire content decreased the workability of the mixture. In addition, it was observed that the compressive strength decreased as expected due to the increasing rate of tyre rubber. Despite this, the highest value of

compressive strength was 50.16 MPa in 3 days and 52.87 MPa in 7-day strength, while in 28 days, by using group B and 5% waste tires; 56,18 MPa compressive strengths was achieved. In water absorption results, a value of 15.35% was achieved in the use of C type waste tires and 15.03% in the use of type D waste tires. In addition, when the high temperature effects were examined, flexural strength and compressive strength could not be determined due to the damage in the samples at 900 °C. However, at lower temperatures, as expected, it was determined that the compressive strength decreases as the temperature increases. The best compressive strength in high temperature strengths was obtained by using type A and 5% waste tires with 39.56 MPa at 300 °C. On the other hand, increased grain size (2-4 mm), caused a decrease in strength at the end of high temperature and a value of 8.76 MPa was obtained. These results revealed that waste tires can be used up to a certain rate, provided that precautions are taken in geopolymer concretes.

Key Words: Geopolymer mortar, tyre rubber, slag, compressive strength, flexural strength, elevated temperature, water absorption, ultrasonic pulse velocity, sodium silicate, sodium hydroxide

2020, 74 pages

Sciences Code: 91

TEŞEKKÜR

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

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

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

Abdussalam .M. SARKAZ
2020

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ ONAYI.....	ii
TAAHHÜTNAME.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ.....	6
2.1. Betonda Atık Lastik (AL) Kullanımı	6
2.2. Atık Lastik Sınıflandırması	6
2.3. Geopolimer Teknolojisi.....	8
2.4. Geopolimer Betonun Yapısı ve Özellikleri	9
2.5. Geopolimer Betonda Kullanılan Bileşenler	11
2.5.1. Kaynak Malzemeleri.....	12
2.5.1.1. Uçucu kül (UK)	12
2.5.1.2. Yüksek fırın cürufu (YFC)	13
2.5.1.3. Alkali sıvılar	13
2.6. Geopolimer Beton Üzerine Yapılan Bazı Çalışmalar	14
3. MATERYAL VE METOD	20
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikler	20
3.1.1. Yüksek Fırın Cürufu (YFC).....	20
3.1.2. Agregalar	21
3.1.3. Atık Lastik (AL)	22
3.1.4. Alkali Aktivatör	23
3.1.5. Su	25
3.2. Karışım Tasarımı	25
3.2.1. Numune Dökümü.....	26
3.3. Method.....	27
3.3.1. Yayılma Tablası Testi.....	27
3.3.2. Yoğunluk Testi	28
3.3.3. Porozite ve Su Emme Oranı Testi	29
3.3.4. Basınç Dayanımı Testi.....	30
3.3.5. Eğilme Dayanımı Testi	30
3.3.6. Ultrases Geçiş Hızı (UPV).....	31
3.3.7. Yüksek Sıcaklık Etkisi.....	32
4. TARTIŞMA VE BULGULAR	34
4.1. Yayılma Tablası Testi Sonuçları	34
4.2. Yoğunluk Testi	38
4.3. Porozite Testi.....	43
4.4. Su Emme Oranı Testi	46
4.5. Basınç Dayanım Testi	48
4.6. Eğilme Dayanımı Testi.....	54

4.7. Ultrases Geçiş Hızı (UPV) Testi	59
4.8. Yüksek Sıcaklık Etkisi Testi	62
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	66
5.1. Sonuçlar	66
5.2. Öneriler	66
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	74



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

AA	Aktif alkali
UK	Uçucu kül
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
GP	Cam tozu
GPC	Geopolimer betonu
GPM	Geopolimer Harcı
LOI	Akkor kaybı
PÇ	Geleneksel portland çimentosu
SH	Sodyum hidroksit
SS	Sodyum silikat
UPV	Ultrasonik ses geçiş hızı
W	Su

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Atık lastik türleri	7
Şekil 2.2. Geopolimerik yapı.....	10
Şekil 3.1. Karışımlarda kullanılan YFC	21
Şekil 3.2. Geopolimer üretiminde kullanılan agrega.....	21
Şekil 3.3. Atık lastik parçalanması	22
Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan AL tipleri	23
Şekil 3.5. Sodyum hidroksit peletleri	23
Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan Na ₂ SiO ₃ çözeltisi	25
Şekil 3.7. Çalışmanın karıştırma prosedürü	26
Şekil 3.8. Hobart karıştırıcısı.....	26
Şekil 3.9. Numune kür süreci	27
Şekil 3.10. Yayılma çapı testi.....	28
Şekil 3.11. Arşimet test ekipmanı.....	29
Şekil 3.12. Geopolimer beton basınç dayanım testi	30
Şekil 3.13. Eğilme test cihazı	31
Şekil 3.14. Ultrases geçiş sürelerinin belirlenmesi.....	32
Şekil 3.15. Yüksek sıcaklık (900 °C) testi örnekleri	33
Şekil 4.1. Yayılma çapındaki değişim	34
Şekil 4.2. Geopolimer betonların yayılma çaplarındaki değişim	35
Şekil 4.3. AL oranının yayılma çapına etkisi	35
Şekil 4.4. AL boyutunun yayılma çapına etkisi	36
Şekil 4.5. AL oranına ve tipine göre yayılma çapındaki değişim	36
Şekil 4.6. AL oranına ve tipine bağlı yayılma çapı	37
Şekil 4.7. Geopolimer betonda yayılma çapı ve AL yüzdesi arasındaki ilişki...	37
Şekil 4.8. AL katkılı geopolimer betonların yoğunluk değişimi	38
Şekil 4.9. Görünür yoğunluk ile AL yüzdesi arasındaki ilişki	39
Şekil 4.10. Geopolimer betonlarda yoğunluklardaki genel değişim	39
Şekil 4.11. Geopolimer betonlarda AL oranına göre görünür yoğunluk değişimi	40
Şekil 4.12. AL ilavesinin görünen yoğunluktaki değişimi	40
Şekil 4.13. AL tipi ve oranına bağlı görünür yoğunluk tahmini	41
Şekil 4.14. Geopolimer betonda AL oranının kütle yoğunluğuna etkisi.....	42
Şekil 4.15. AL tipi ve oranına bağlı kütle yoğunluk tahmini	42
Şekil 4.16. Geopolimer betonda AL oranının kuru hacim kütle yoğunluğuna etkisi	43
Şekil 4.17. AL tipi ve oranına bağlı kuru hacim kütle yoğunluk tahmini	43
Şekil 4.18. Geopolimer betonda porozitedeki değişim	44
Şekil 4.19. Geopolimer betonda AL oranının poroziteye etkisi.....	45
Şekil 4.20. Geopolimerin gözenekliliği ile AL arasındaki ilişki	45
Şekil 4.21. AL tipi ve oranına bağlı porozite tahmini	46
Şekil 4.22. Geopolimer betonda su emme oranındaki değişim	47
Şekil 4.23. Geopolimerin su emme oranı ile AL oranı arasındaki ilişki	47
Şekil 4.24. AL tipi ve oranına bağlı su emme oranı tahmini.....	48
Şekil 4.25. Geopolimer betonda basınç dayanımlarındaki değişim	50
Şekil 4.26. Geopolimer betonlarda zamana göre basınç dayanımı değişimi.....	50

Şekil 4.27. Geopolimerin basınç dayanımı ile AL oranları arasındaki ilişki	51
Şekil 4.28. Geopolimerlerde AL katkısına göre basınç dayanımı değişimi	51
Şekil 4.29. AL tipi ve oranına bağlı basınç dayanımı tahmini	52
Şekil 4.30. Geopolimer betonun basınç dayanımı ve AL oranı arasındaki ilişki	52
Şekil 4.31. Geopolimer betonun yayılma çapı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki	53
Şekil 4.32. Görünür yoğunluk ve basınç dayanımı arasındaki ilişki	53
Şekil 4.33. Geopolimer betonun su emme oranı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki	54
Şekil 4.34. Geopolimer betonda eğilme dayanımlarındaki değişim	55
Şekil 4.35. Geopolimer betonlarda zamana göre basınç dayanımı değişimi	55
Şekil 4.36. AL yüzdesi ile AL tipinin eğilme dayanımı ile ilişkisi	56
Şekil 4.37. Eğilme dayanımı ve AL oranının göre değişimi	56
Şekil 4.38. Eğilme dayanımı ile AL arasındaki ilişki	57
Şekil 4.39. Geopolimer betonun eğilme dayanımı ve AL arasındaki ilişki	57
Şekil 4.40. Geopolimer betonun eğilme dayanımı ve AL oranı arasındaki ilişki	58
Şekil 4.41. Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki	58
Şekil 4.42. Geopolimer betonda UPV değişimleri	59
Şekil 4.43. Geopolimerin UPV ile AL arasındaki ilişki	60
Şekil 4.44. AL tipi ve oranına bağlı UPV tahmini	61
Şekil 4.45. UPV ve basınç dayanımı arasındaki ilişki	61
Şekil 4.46. UPV ve porozite arasındaki ilişki	61
Şekil 4.47. UPV ve su emme oranı arasındaki ilişkisi	62
Şekil 4.48. Yüksek sıcaklıklarda geopolimer beton basınç dayanımları	63
Şekil 4.49. Geopolimer betonda yüksek sıcaklık sonrası dayanıma etkisi	64
Şekil 4.50. 300 °C'de geopolimer betonun basınç dayanımındaki değişim	64
Şekil 4.51. 600 °C'de geopolimer betonun basınç dayanımındaki değişim	65

TABLULAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Betonda AL kullanılmasının avantaj ve dezavantajları	6
Tablo 2.2. Lastik çeşitlerinin betonda kullanım yerleri	7
Tablo 3.1. YFC'nin kimyasal, fiziksel ve minerolojik özellikleri	20
Tablo 3.2. Agregada elek analizi	21
Tablo 3.3. Çalışmada kullanılan lastik tozu özellikleri	22
Tablo 3.4. Karışımlarda kullanılan değişkenler ve oranları	25
Tablo 3.5. Karışım tasarımı	26
Tablo 4.1. Yayılma çapı değerleri	34
Tablo 4.2. AL katkılı geopolimerlerde yoğunluklardaki değişim	38
Tablo 4.3. Geopolimer betonda porozite değerleri	44
Tablo 4.4. Geopolimer betonların su emme oranı değerleri	46
Tablo 4.5. Geopolimer betonların basınç dayanımı değerleri	49
Tablo 4.6. Geopolimer betonların eğilme dayanım değerleri	54
Tablo 4.7. Geopolimer betonda UPV değişimleri	59
Tablo 4.8. Beton kalitesinin sınıflandırılması (Erdoğan vd., 2017)	60
Tablo 4.9. Farklı sıcaklıklarda geopolimer betonun basınç dayanımı değerleri ...	63

1. GİRİŞ

Her geçen gün artan teknolojik gelişmelerin bir sonucu olarak ortaya çıkan atık miktarları önemli bir sorundur. Taşıt kullanımının artmasının bir sonucu olarak ortaya çıkan ve son yıllarda sayısını giderek arttıran atık lastik ve bertarafı ise çevresel bir sorun haline gelmiştir (Pacheco-Torgal, Ding ve Jalali, 2012). Dünyada yılda yaklaşık 1 milyon atık lastik üretilmektedir. 2030 yılına gelindiğinde, bu sayının 1,2 milyon adet/yıl'a ulaşması beklenmektedir (Thomas, Gupta ve Panicker, 2016). Dünya genelinde ise her yıl tahmini 1 milyar lastik kullanım ömrünün sonuna ulaşmakta ve 2030 yılına kadar 5 milyar tondan daha fazla atık oluşturması beklenmektedir. EUROSTAT raporuna göre, İngiltere'de 2016 yılında 1.246.447 ton araç atıkları üretilmiştir. Her yıl, miyadı dolmuş araçlar topluluk'ta 8 ila 9 milyon ton arasında değerli atık üretmektedir (Park vd., 2016; Sofi, 2018; Luhar, Chaudhary ve Luhar, 2019). Atık lastik, atık yönetiminin en zor bileşenlerinden biri haline gelmiş olup, sadece ABD'de yılda yaklaşık 273 milyon hurda lastiği olduğu da kayıt altına alınmıştır. Ayrıca, şu anda ülke genelinde yaklaşık 3 milyar kullanılmış lastik olduğu da tahmin edilmektedir. Diğer ülkelere bakıldığında da, araba sayısı son on yılda önemli ölçüde arttıran Çin örneğinde de otomobil endüstrisinin hızla gelişmesiyle birlikte geri dönüşümlü atık lastiklerin artan miktarı ve bunların 2012 yılında nakliyeden kaynaklanan atık lastik miktarı 280 milyon adet olduğu belirtilmiştir. Çin atık lastik miktarının yılda yaklaşık % 9 oranında sürekli bir artışta olduğuda görülmektedir (Richardson vd., 2011).

Birçok ülkede atık lastiklerin gömülmesi, lastik gömülen toprağın üretkenlik ömrünü kısaltan ve ciddi ekolojik tehdide neden olan yaygın bir bertaraf etme yöntemidir. Bu nedenle, atık lastikleri etkin bir şekilde yeniden kullanmak, enerji tasarrufu ve çevreyi korumak için acil önem alınması gereken bir konudur (Yung, Yung ve Hua, 2013; Thomas ve Gupta, 2016). Atık lastikleri imha etmek küresel bir sorundur (Hernández-Olivares vd., 2002). Atık lastik imhası incelendiğinde, hammaddesinin çürümemesi nedeniyle büyük bir çevre sorununa neden bir malzeme olarak görülmektedir. Malzeme yığını sadece potansiyel olumsuz bir çevresel tehlike oluşturmamakta, aynı zamanda yangın tehlikesinin yanı sıra sıçan, fare, haşarat ve sivrisinekler gibi canlıların yaşadığı istenmeyen bir habitat oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Atık

lastik geri dönüştürme yöntemleri arasında kırıntı kauçuğunun mikro yapısı ve performansı asfaltı değiştirmesi nedeniyle yol asfaltı uygulamalarında kullanımı, termoplastik elastomerler üretme veya geri kazanılmış lastik yapma gibi çeşitli yöntemler içermektedir (Azmi vd., 2016). Günümüzde üretilen atık kauçuğun yalnızca küçük bir kısmı geri dönüştürülmektedir (Kotresh ve Belachew, 2014).

Çimento fırınlarında yakıt olarak kullanılması ve karbon siyahı üretilmesi de dahil olmak üzere atık lastiklerin geri dönüşümü için çeşitli yöntemler önerilmiştir (Hernández-Olivares vd., 2002; Way ve Evans, 2006). Yakımlarında bazı ülkelerde ayrıca yasa kısıtlamaları bulunmakla birlikte zehirli bir koku ve ölümcül gaz emisyonları yaratmasında bir diğer sorunu oluşturmaktadır. Dahası, karmaşık yapıları biyolojik bozulmalarına meydan okumaktır (Luhar, Chaudhary ve Luhar, 2019). Sonuç olarak, atıkların sistematik tüketimi, bu devasa atık yönetimi için en iyi yoldur. Bunlar büyük oranda ekonomik kayba ve çevre kirliliğine sebep olmasına rağmen teknik olarak uygulanabilir yöntemlerdir. Geri dönüşümlü kauçuğun yapı malzemelerine katkı maddesi olarak veya bu malzemelerin yerine kullanılması kirlilik açısından en uygun çözümlerden birisi olabilir. İlk örneklerden birisi olan kırıntı kauçuğu denemesi, asfaltın değiştiricisi olarak kullanılmıştır (Mohammadi ve Khabbaz, 2013). Bununla birlikte, yüksek viskozite ve üretimde gereken yüksek sıcaklık, yaygın olarak kullanılmasını işlevsiz hale getirmiştir (Flores-Medina ve Hernández-Olivare, 2014). Atık lastik kauçuğunun etkin bir şekilde tekrar kullanılması için olası çözümlerden biri, çimento esaslı malzemeye dâhil edilmesidir. Betondaki mineral agregaların atık lastik kauçuğuyla kısmen değiştirilmesi çevre kirliliği kontrol altına alabilir ve agrega kaynakları korunabilir (Thomas ve Gupta, 2015; Siddique ve Naik, 2004). Bu durum ışığında, bu atıkların bertarafında inşaat sektöründe kullanımıyla alakalı olarak betonda kayda değer miktarda atık kauçuğun kullanılıp kullanılmayacağını araştırmak mevcut bir sorunun çözümünde yardımcı olacaktır. Bu açıdan birçok araştırmacı, ilgilerini farklı atık lastik partikül boyutlarındaki lastik betonun mekanik özelliklerine ve toplam hacmin farklı oranlarına olan etkilerine odaklanmış çalışmaları ile kullanılabilirliğini ve atık oranını azaltmayı hedef almış çalışmaları ön plana çıkarmaktadır (Kotresh ve Belachew, 2014). Ayrıca bu atık lastiklerin bertarafında inşaat sektöründe kullanımının araştırıldığı hatta normal ve

yüksek dayanımlı betonlarda kullanılması bir çözüm olarak görülmektedir (Richardson vd., 2011).

Tipik bir otomobil lastiği yaklaşık % 40 doğal lastik ve % 60 sentetik lastik içeren bir malzeme olup, lastik kırıntısı olarak kullanılmadan önce, lastiğin çelik kasasından ayrılması gerekmektedir. Lastik kırıntısı ise hurda lastiklerden, yarı lastiklerden parçalama / kırma, taşlama işlemleri ile elde edilen bir malzemedir. Lastik kırıntı parçacık boyutları 4.75 mm ile 0.075 mm (Richardson vd., 2011). 'in altında değişmekte ve mikro-öğütme işlemi nedeniyle düzensiz şekilli, yırtılmış parçacıklar şeklindedirler (Azmi vd., 2016; Kotresh ve Belachew, 2014; Topçu ve Şengel, 2004).

Atık lastiklerin inşaat sektöründe yeniden kullanılmasını vurgulayan dünya çapında birçok çalışma ortaya çıkmıştır. Ayrıca birçok araştırmacı, farklı atık lastik partikül boyutlarındaki lastik betonun mekanik özelliklerine ve toplam hacmin farklı oranlarına olan etkilerine üzerine çalışmaları ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmalar, geri dönüşüm ile atıkların azaltılmasına katkı sağlayacak ve daha çevreci bir malzeme olarak betonda bu atıkların kullanılmasının etkilerini ortaya koyacaktır. Geçtiğimiz birkaç yıl boyunca, atık lastikleri çimento esaslı malzemelerle birleştirmek birçok araştırmacının temel konusunu oluşturmaktadır. Ancak günümüzde çimento esaslı malzemelere alternatif olabilecek farklı malzemelerde de bu atıkların kullanılması bertaraf konusunda avantajlar sağlayacaktır (Toutanji, 1996; Benazzouk vd., 2007; Su vd., 2015).

İnşaat sektöründe kullanılan yapı malzemelerinin başında beton gelmektedir. Beton temel özelliği yapımında kullanılan diğer malzemeler ile bağlayıcısı çimento sayesinde gerçekleşen C-S-H jelleri ile sıkı kimyasal bağlar oluşturması ve malzemeye kazandırdığı yüksek dayanım ile avantajlı bir malzeme olmasıdır. Ancak günümüzde bağlayıcı olarak çimento kullanılmadan beton üretimine bakıldığında geopolimer terimi ön plana çıkmaktadır. Geopolimer terimi, Raghuraman ve Davidovits (1978) tarafından, inorganik molekül zincirleri veya ağları ile karakterize edilen geniş bir malzeme yelpazesini temsil etmek üzere kullanılan bir terimdir. Dokuz farklı geopolimer olmasına rağmen uygulamada ulaşılabilirlik açısından en büyük potansiyel, beton yapıdaki Portland çimentosunun yerini tamamen alabilecek

alüminosilikat malzemelerin kullanılmasıyla oluşturulabilen grubudur (Davidovits, 2015). Bu geopolimerler, bir alkalın aktifleştirici çözelti içinde çözülebilen bir silis (Si) ve alüminyum (Al) kaynağı için termal olarak aktifleştirilmiş doğal maddelere (örneğin, kaolinit kil) veya endüstriyel ürünlere (örneğin uçucu kül veya cüruf) gereksinim duymaktadır. Bu malzemeler geopolimer içerisinde moleküler zincirler ve ağlar halinde polimerize olarak sertleştirilmiş bağlayıcı oluştururlar. Bu tür sistemler genellikle alkali ile aktifleşen çimentolar veya inorganik polimer çimentoları olarak adlandırılır. Rangan (2008) tarafından belirtildiği gibi, Polimerizasyon işlemi, üç boyutlu bir polimerik zincir ve halka yapısı ile sonuçlanan silikon-alüminyum mineralleri üzerinde alkali koşullar altında büyük ölçüde hızlı bir kimyasal reaksiyona sahiptir (Jaydeep ve Chakravarthy, 2013).

Sürdürülebilir endüstriyel ekoloji uygulaması, bir endüstri ürününün diğer endüstriyel uygulamalar için kaynak malzeme olarak kullanılmasını gerektirir. Bu, her iki sektör için çevresel parametrelere uymada yardımcı olacak bir durumdur. Ancak çevresel kaygılar bizi ileri teknoloji kullanarak dayanıklılığı ve kaynak verimliliğini artırarak malzeme tüketimini azaltmaya mecburda bırakan bir duruma sokmaktadır (Gourley, 2014; Bhowmick ve Ghosh, 2012). Geopolimer beton ise, dayanıklılığı ve çevresel sürdürülebilirliği ile tanınan bir malzemedir. Geopolimer beton üretiminde herhangi bir Portland çimentosu kullanılmamakta bunun yerine alkali aktivatör malzemeler kullanılmaktadır. Geopolimer beton üzerinde yoğun çalışma yapılmakta ve Portland çimentolu normal betonunun yerini alabilecek gibi görünmektedir. Araştırmalar, kimya alanından mühendislik uygulamalarına ve geopolimer betonun ticari üretimine doğru bir kullanım yelpazesi sunmaktadır (Jaydeep ve Chakravarthy, 2013).

Atık lastiğin başarılı bir şekilde kullanılması, lastiklerin imhasıyla ilgili çevresel ve sağlık sorunlarını ve imha etmek için gereken arazinin azaltılmasına, çevre korumasına ve lastik kauçuğunun yanmasından kaynaklanan karbon emisyonlarını azaltmaya yardımcı olacaktır. Atık lastik kullanılması, daha dayanıklı, daha ucuz (düşük malzeme maliyeti ve kolay üretim) ve daha az enerji harcayacağını düşündürmektedir (Way ve Evans, 2006). Bu çalışmanın amacı, geopolimer betonda öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (YFC), sodyum hidroksit (SH), sodyum silikat (SS), su ve çeşitli

oranlarda karıştırılan agregaları ile değişik boyutlara sahip AL kullanılmasının etkisini incelemektir.



2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1. Betonda Atık Lastik (AL) Kullanımı

Atık lastik kırıntıları inşaat teknolojisinde kullanımı açısından daha çok yol ve kaldırım yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu yan ürünün harç / beton karışımı bileşeni olarak kullanılması 90'lı yılların başından beri devam etmektedir. Güncel olarak, dünya çapındaki araştırmacılar tarafından birçok başarılı sonuçları bildirilmiş ve faydalarının bazıları aşağıdaki Tablo 2.1'de özetlenmiştir (McMahon, 1999).

Tablo 2.1. Betonda AL kullanılmasının avantaj ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
1. Düşük birim ağırlık (hafif beton)	1. Düşük basınç dayanımı
2. Aşınmaya karşı yüksek direnç	2. Düşük çekme dayanımı
3. Yüksek süneklik	3. Düşük eğilme dayanımı
4. Gevreklik artışı	
5. Yüksek elastikiyet, dayanıklılık ve esneklik	
6. Şokları ve titreşimi emme	
7. Çekmeyi ve çatlamayı iyileştirme	
8. Su geçirgenliğini arttırma	
9. İyi klorür iyonu emme direnci	

2.2. Atık Lastik Sınıflandırması

Betonda agrega olarak kullanılabilen atık lastik, kauçuğun boyutuna göre sınıflandırılabilir. Temel olarak, Siddique ve Naik (2004) tarafından, öğütülmüş lastik ve kırıntı lastik başta olmak üzere beş lastik agrega sınıflandırması vardır. Atık lastik sınıflandırması Tablo 2.2 ve Şekil 2.1'de verilmiştir (Ganjian, Khorami ve Maghsoudi, 2009).

Şekil 2.1. incelediğinde, kırılmış ve doğranmış lastik boyutuna bağlı bir sınıflandırmanın, kullanılmış lastiklerin parçalanması ve dönüştürülmesiyle üretilen bir süreci kapsadığı görülmektedir.

Tablo 2.2. Lastik çeşitlerinin betonda kullanım yerleri

Türleri	Boyut	Üretim Yöntemi	Betondaki Uygulaması
Doğranmış / Ufalanmış	<p><u>Doğranmış</u> Uzunluk : 300 – 430mm Genişlik : 100-150 mm</p> <p><u>Dilimlenmiş</u> : 100-230 mm : 13 – 76 mm</p>	Birincil, ikincil veya her iki parçalama işlemi	Çakıl yerine
Kırıntı lastik	0,425–4,75 mm	1. Kıracak mil 2. Granül 3. Mikro mil	Kum yerine
Öğütülmüş lastik	0,0075 – 0,475 mm	1. Magnetik ayırma 2. Eleme	Çimento yerine
Lastik lif	Uzunluk : 8,5 - 21,5mm Şerit : ≤ 8 mm	Doğranmış lastiklerden	Güçlendirilmiş fiber olarak



Şekil 2.1. Atık lastik türleri

2.3. Geopolimer Teknolojisi

Dünya nüfus artışı ile başa çıkmak için altyapı ve yapıların küresel gelişimi, devasa bir gereksinime yol açmaktadır. Beton Romalılarından bu tarafa gelişmekte olan ve yeryüzünde en fazla kullanılan bir yapı malzemesidir (Luhar, Chaudhary ve Luhar, 2018a; Luhar ve Gourav, 2016; Luhar ve Khandelwal, 2015). Temel olarak geleneksel Portland Çimentosu (PÇ) bağlayıcı olarak gereklidir ve dolayısıyla PÇ'ye olan talep de çoktur. Ancak PÇ, üretim sürecinde sadece doğal sınırlı mineral kömür kaynaklarının yüksek sıcaklıkta yakılmasıyla ve yüksek enerji tüketen bu fabrikalar sayesinde de CO₂'yi atmosfere yaymasıyla dünyayı ısıtan veya havayı kirleten oldukça çevreci olmayan bir bağlayıcıdır. Temel olarak araştırmacılar, bilim adamları ve mühendisler sürdürülebilir, dayanıklı, kullanıcı ve çevre dostu ve daha ekonomik olarak uygun olması gereken alternatif inşaat malzemeleri aramak ve alternatifler üzerinde çalışmaktadırlar. Tüm bu çıkmazlara bir çözüm yenilikçi geopolimerik yapı malzemeleri ile mümkün olma ihtimali vardır. Geopolimerler, geopolimerizasyon işlemi ile alkali ortamda düşük sıcaklıkta üretilen inorganik bir malzemedir. Doğal kayaların geosentezine benzer bir sentez yapar, böylece alüminyum ve silikat zengin öncülleri, geopolimerleri artırmak için alkali aktivatörlerle ısı vererek reaksiyona girer (Thokchom, Ghosh ve Ghosh, 2010; Luhar ve Khandelwal, 2015b; Luhar, Chaudhary ve Dave, 2016; Luhar, S. Chaudhary ve Luhar, 2018b).

Geopolimerler sadece mükemmel termal, ateş ve donma çözülme direnci göstermez, aynı zamanda altı kat daha az enerji ve dokuz kat daha az CO₂ emisyonuna neden olurlar (Luhar ve Khandelwal, 2015a; Mohammed vd., 2018; Luhar ve Khandelwal, 2016).

Geopolimer bağlayıcılar, amorf bir üç boyutlu yapıya sahip olan bir alüminosilikat malzemenin konsantre bir alkali hidroksit (NaOH) ve / veya alkali-silikat (Na₂SiO₃) çözeltisi ile tepkimesiyle sentezlenen bir inorganik polimer sınıfıdır. Geopolimerizasyon işleminde alüminosilikat öncülünün doğası ve kimyasal bileşimi mekanik performansın belirlenmesinde kilit rol oynamaktadır. Genel olarak, geopolimer bağlayıcılarda arzu edilen bir dayanım gelişimini karşılamak için, üretiminde kullanılan temel malzemelerinde optimum oranda reaktif silis ve alümin

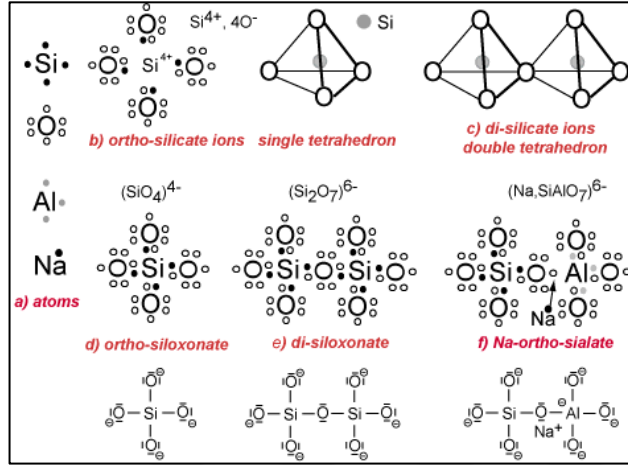
içeriği bulunmalıdır. Bu içeriğe sahip geopolimer üretimindeki atık malzemelerin kullanılması, atık yönetimi problemlerinin üstesinden gelmek için potansiyel bir çözüm yolu sunmakta ve son zamanlarda başarılı birçok alanda kullanılmaktadır (Xu ve Van Deventer, 2000; Davidovits, 1994; Gourley, 2003; Fernández-Jiménez ve Palomo, 2003). Geopolimerin başlıca avantajları incelendiğinde; üretiminde kullanılabilir ve faydalı uygulamalar için atık depolama alanlarındaki atık malzemelerin bol miktarda olması, Portland çimentosu üretimine atfedilen enerji ve CO₂ emisyonlarının kullanımında azalma ve doğal kaynakların korunması sayılabilir.

2.4. Geopolimer Betonun Yapısı ve Özellikleri

Bir alkali sıvı, jeolojik kökenli bir kaynak materyalinde veya UK, YFC ve pirinç kabuğu külü gibi yan ürün materyallerinde yüksek oranda bulunan silis (Si) ve alüminyum (Al) ile reaksiyona girmek için kullanılmaktadır (Palomo, Grutzeck ve Blanco, 1999). PÇ'den farklı olarak, geopolimer matris oluşumu ve dayanımlı için kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jelleri oluşturmaz, ancak dayanım elde etmek için silis ve alümin polikondenzasyonunda (değişik moleküllerin bir araya gelerek büyük molekül zinciri (polimeri) meydana getirmesi olayı) kullanır. Geopolimerin iki ana bileşeni kaynak materyaller ve alkali sıvılardır (Palomo, Grutzeck ve Blanco, 1999; Xu ve Van Deventer, 2000). Kaynak malzeme alümina-silikat bazlı olan ve aynı zamanda hem silis (Si) hem de alümin (Al) açısından zengin olan malzemeleri ifade etmektedir. Geopolimer betonunda UK, silis dumanı, pirinç kabuğu külü, YFC ve metakaolin gibi tamamlayıcı çimentolama malzemeleri Portland çimentosuna alternatif bağlayıcı olarak kullanılır. Bu çalışmada, UK ve YFC alternatif bağlayıcı olarak kullanılmıştır.

Geopolimerler üç boyutlu alumino-silikat malzeme yapısına sahiptir ve Si/Al oranına bağlı olarak gruplandırılırlar. Alümin oranı Si/Al:0 olan grup siloxo [-Si,-O, -Si,-O], "Si/Al:1" oranına ve [-Si,-O,-Al,-O] yapısına sahip ise sialate (sialik asit), "Si/Al:2" oranına ve [-Si,-O,-Al,-O,-Si,-O] yapısına sahip ise sialate-siloxo, "Si/Al:3" oranına ve [-Si,-O,-Al,-O,-Si,-O,-Si,-O] yapısına sahip ise sialate-disiloxo ve "Si/Al>3" oranına sahip ise sialate bağları (Şekil 2.2) oluştururlar. Bu süreç polimerleşme işlemi olarak ya da alkali olarak kullanılan Na⁺ veya K⁺ iyonlarının Al iyonlarıyla denge

oluşturması sürecinde Al ve Si atomunun dört yüzü (tetrahedral) yapı içerisinde dizilimi olarak açıklanabilir (Pacheco-Torgal vd., 2012; Memiş vd., 2017).



Şekil 2.2. Geolipolimerik yapı

Geopolimer, YFC gibi endüstriyel atık ürünlerini ve UK beton bağlayıcıya dönüştüren mükemmel bir alternatiftir. Geopolimer bağlayıcılar, geopolimer beton üretmek için agregalarla birlikte kullanılır. Erken dayanımları çok yüksek olduğundan altyapıları inşa etmek, onarmak ve ön döküm üniteleri için idealdir. Piriz süreleri kontrol edilebilir ve onarmaya gerek kalmadan çok uzun süre bozulmadan kalabilirler. Geopolimer beton, geleneksel betonun yerini alabilecek, çevresel olarak sürdürülebilir bir ürünün önemli bir elementini oluşturma potansiyeli olan inorganik polimer kompozitlerdir. Geopolimerin en büyük yararı polimerin endüstriyel ürünlerden faydalanması ve CO₂ emisyonunda % 90 a varan bir azalma, PÇ geopolimer çimento ile değiştirilmesiyle sağlanmasıdır. Geopolimerler doğal olarak meydana gelen makromolekülün sentetik bağlarını içeren inorganik ve organik olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Başlangıçta önerilen geopolimer, esas olarak saf inorganik materyale karşılık gelmektedir, ancak organik içerikli geomateryalleri içerecek şekilde genişletilebilir. Bu nedenle, geopolimerizasyon sırasında inorganik ve organik türler arasındaki çapraz bağlar göz önünde bulundurulmalıdır. Geopolimer teknolojisi düşük karbon ayak izi olan yeşil beton ve inşaat malzemesi üretimi için, otomobil, havacılık, metalurji, inşaat mühendisliği ve plastik endüstrisi gibi endüstriler alanında geniş bir uygulama alanına sahip bir malzemedir (Thomas ve Gupta, 2015).

Geopolimer beton, geleneksel betona göre bir dizi avantaja sahiptir. Bu avantajlar (Bagchi ve Jadhav, 2005):

1. Önemli ölçüde daha düşük CO₂ emisyonu
2. Daha iyi ısı yalıtımı özellikleri
3. Yüksek sıcaklık / yangın dayanımı
4. Genellikle çöplükte yer alan “atık” malzemeler için uygun bir kullanım alanı
5. Daha iyi basınç dayanımı sağlaması olarak sıralanmaktadır.

Ancak geopolimer betonunun sağladığı avantajların ve PÇ’lu betonunun yerini alacak süper betonmuş gibi görünmekle birlikte, bazı dezavantajları vardır (Bagchi ve Jadhav, 2005). Bu dezavantajlar;

- **Üretimi zordur;** geopolimer beton, özel işleme ihtiyaçları gerektirmesi ve oluşturulması son derece hassasiyet gerektirmesi ve insanlara zararlı olabilecek sodyum hidroksit gibi kimyasalların kullanılmasını gerektirir.
- **Yalnızca ön karışım malzemesi olarak satılmaktadır;** geopolimer beton, üretimdeki tehlikeleri nedeniyle piyasada sadece ön döküm veya ön karışım malzemesi olarak satılır.
- **Geopolimerizasyon süreci hassastır;** üretimindeki parametreler nedeniyle aşırı değişken olduğu kanıtlanmış olup, aynı özelliklerde malzeme üretilmesinde istikrar yoktur.
- **Üretimi tecrübe gerektirir;** geopolimer beton fikri ideal gibi görünsede, betonun karıştırılması ve uygulama sürecinde büyük uyuşmazlıklara neden olabilecek çok fazla değişken / dengesiz sorun vardır.

2.5. Geopolimer Betonda Kullanılan Bileşenler

Geopolimerler inorganik polimer ailesinin üyeleri olup geopolimer malzemenin kimyasal bileşimi doğal zeolitik malzemelere benzer. Ancak mikro yapı kristalimsi yerine şekilsizdir (Palomo, Grutzeck ve Blanco, 1999; Xu ve Van Deventer, 2000). Polimerizasyon işlemi, Si-O-Al-O bağlarından oluşan üç boyutlu bir polimerik zincir ve halka yapısı (Şekil 2.1) ile sonuçlanan Si-Al mineralleri üzerinde alkali koşullar

altında büyük ölçüde hızlı bir kimyasal reaksiyona neden olur. PÇ / puzolonik bağlayıcıların aksine, geopolimerler matris oluşumu ve dayanımı için kalsiyum silikat hidratlar (C-S-H) oluşturmaz. Yapısal dayanımı elde etmek için silis (Si) ve alüminin (Al) polikondansasyonunu ve yüksek alkali içeriğini kullanır. Bu nedenle, geopolimerler bazen alkali aktif alümina silikat bağlayıcılar olarak adlandırılır (Davidovits, 1994).

2.5.1. Kaynak Malzemeleri

Amorf formda çoğunlukla silis (Si) ve Alüminyum (Al) içeren herhangi bir malzeme, geopolimer üretimi için olası bir kaynak malzemedir. Geçmişte bazı mineral ve sanayi yan ürün malzemeleri araştırılmıştır. UK, YFC, kalsine kaolin gibi kaynak malzemeleri kalsine edilmemiş malzemelere kıyasla daha yüksek bir basınç dayanımı gösterdikleri belirlenmiştir (Barbosa, MacKenzie ve Thaumaturgo, 2000). Çeşitli yan ürünler arasında yalnızca düşük kalsiyumlu UK ve YFC, geopolimer betonun geliştirilmesi için potansiyel kaynak malzemeler olduğu kanıtlanmıştır (Xu ve Van Deventer, 2000).

2.5.1.1. Uçucu kül (UK)

UK kendi başına herhangi bir bağlayıcı özelliği yoktur ve reaktivitesi inceliğine, içinde bulunan reaktif silis yüzdesine ve yakıt olarak kullanılan kömür kalitesine bağlıdır. UK parçacıkları tipik olarak PÇ ve kireç parçacıklarından küresel ve daha incedir. Parçacık büyüklüğü 1 mikron ila 150 mikron arasında değişmektedir. Alt bitümlü kömürlerden elde edilen UK, ASTM C sınıfı UK veya yüksek kalsiyumlu UK; CaO içeriği yüzde 20'den fazladır. Bitümlü ve antrasit kömürlerinden elde edilen UK, ASTM F sınıfı UK veya düşük kalsiyum UK olarak adlandırılır. Düşük kalsiyumlu (ASTM F sınıfı) UK, yüksek kalsiyumlu (ASTM C sınıfı) UK'dan çok kaynak materyali olarak tercih edilir. Yüksek miktarda kalsiyum varlığı polimerizasyon sürecine etkileyebilir ve mikroyapısını değiştirebilir (Gourley, 2003). Geopolimer beton için uygun UK özellikleri Fernández-Jiménez ve Palomo (2003) tarafından çalışılmıştır. Bu araştırmacılar, kızdırma kaynama özellikleri üretmek için düşük kalsiyumlu UK kalitesinin, LOI'nin % 5'ten az olması, Fe₂O₃ içeriğinin % 10'dan az

olması ve düşük CaO içeriğinin tercihen % 5'ten az olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Reaktif silis içeriği % 40 - 50 arasında olmalıdır. UK inceliği, parçacıkların % 80-90'ı 45 µm'den küçük olacak şekilde olmalıdır. 10 µm altındaki partiküllerin UK reaktivitesine karar verdiğini, 7 ve 28 gün basınç dayanımına katkıda bulunduğunu bildirmiştir. 10 ila 45 µm arasındaki parçacıklar, 28 gün ila yaklaşık bir yıl boyunca yavaş yavaş reaksiyona girer; 45 µm üzerindeki parçacıklar inert olarak kabul edilir (Bagchi ve Jadhav, 2005)

2.5.1.2. Yüksek fırın cürufu (YFC)

İlk olarak betonda kullanımı 1853 yılında Almanya'da geliştirilen ve (Zhang ve Malhotra, 1996) 1900'lerin başından beri betonda çimentoya ikame bir malzeme olarak YFC kullanılmaktadır. YFC, Kuzey Amerika'da genel amaçlı beton olarak kullanıldığında, karışımlardaki bağlayıcı malzemenin yerine % 30 ila % 45'ini oluşturan temel bir malzeme olmuştur (Siegel vd. 2013) ve aynı zamanda cüruf çimentosu olarak da adlandırılan çimentoların temelini oluşturur. Yüksek demir fırını atığı cürufundan yapılır 45 µm daha az öğütülmüş olan granül malzeme, yaklaşık 400 ila 600 m² / kg Blaine yüzey alanına sahiptir. Öğütülmüş granül kumlama cürufu için nispi yoğunluk (özgül ağırlık) 2,85 ila 2,95 arasındadır. Yığın yoğunluğu ise 1050 ila 1375 kg / m³ (66 ila 86 lb / ft³) arasında değişmektedir.

2.5.1.3. Alkali sıvılar

Geopolimerizasyonda kullanılan en yaygın alkali sıvı, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikatın (Na₂SiO₃) bir kombinasyonudur (Xu ve Van Deventer, 2000); Bununla birlikte, potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikat (K₂O₃Si) da kullanılabilir. Alkali sıvı polimerizasyon sürecinde önemli bir rol oynar. Polimerizasyon, alkali sıvı, yalnızca alkalik hidroksitlerin kullanımına kıyasla çözünür silis içerdiğinde yüksek oranda meydana gelir, NaOH çözeltisine Na₂SiO₃ çözeltisi ilavesiyle hazırlanan alkali sıvı, UK ve çözelti arasındaki reaksiyonu artırır (Xu ve Van Deventer, 2000; Palomo, Grutzeck ve Blanco, 1999; Barbosa, MacKenzie ve Thaumaturgo, 2000; Gourley, 2003).

2.6. Geopolimer Beton Üzerine Yapılan Bazı Çalışmalar

Albitar vd., (2014) cüruf bazlı geopolimer betonun davranışı üzerine gerçekleştirdikleri deneysel bir çalışmalarında dikkate alınan temel parametreler YFC/UK oranı, YFC/nehir kumu oranı, alkali çözelti/bağlayıcı oranı ve küreleme yöntemidir. Hazırlanan karışımların mekanik özellikleri test edilmiş ve benzerlikleri ve farklılıkları belirlemek için Amerikan Beton Enstitüsü ve PÇ'lu betonu için belirlenen Avustralya Standartları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, % 75'e kadar bir bağlayıcı olarak kısmen YFC kullanılmasının normal bir beton mukavemeti sağlayabildiğini göstermiştir. Sonuçlar YFC esaslı geopolimer betonun mekanik özelliklerinin UK esaslı geopolimer betondakine benzer olduğu sonucuna varmıştır.

Koumoto (2019) yüksek basınç mukavemetli geopolimer beton üretmek için YFC mümkün olduğunca ince öğütülmesi gerektiğini bildirmiştir. Ayrıca UK veya YFC olarak her bağlayıcı için optimum bir değer (NaOH / Na₂SiO₃ oranı) olduğunu belirtmişlerdir.

Li ve Liu'nun çalışmasında (2007), YFC ve UK geopolimerler için bir katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada, YFC'nin dâhil edilmesinin geopolimerin 30 °C ve 70 °C'de 14 gün süreyle kür etkisinde basınç dayanımını %40'a varan oranlarda (sırasıyla 50 ve 70 MPa) önemli ölçüde artırabileceği bulunmuştur. % 70 YFC ilavesi sonrasında, özellikle 70 °C'de kürlenmiş örnekler için gözenek boyutunda bir artışa neden olduğu görülmüştür.

Gök ve Kılınc (2017) geleneksel betona alternatif olarak geopolimer beton ürettikleri bu çalışmalarında, UK ve YFC gibi pozolonik malzemeler alkalın sıvılarla aktive etmişler ve bağlanma özelliği kazandırmışlardır. Geopolimer beton üretiminde, puzolanik malzemeler, agregalar ve alkalın aktivatörleri kullanılmıştır. YFC miktarındaki artışın daha yüksek basınç dayanımı değerlerine yol açtığı bulunmuştur. YFC, çimento ağırlığınca % 25 oranında kullanıldığında, 67 MPa gibi yüksek basınç dayanım değerlerine ulaşıldığı görülmüştür.

Hadi, Farhan ve Sheikh (2017), YFC, UK, metakaolin (MK) ve silis dumanı (SD) kullanılarak bağlayıcı içeriği, alkalın aktivatörünün bağlayıcı içeriğine oranı, NaOH /

Na_2SiO_3 (SS/SH) oranı ve NaOH (SH) konsantrasyonunun geopolimer beton üzerindeki etkileri, priz süresini arttırmak için YFC'nin farklı oranlarda kısmi olarak değiştirilmesi için kullanılmıştır. YFC'nin UK, MK ve SD ile kısmi olarak değiştirilmesi priz süresini iyileştirdiği bulunmuştur. Ayrıca çalışma, UK'ün YFC bazlı geopolimer beton karışımına dahil edilmesinin, prekast konstrüksiyona ek olarak, ortam sertleştirme koşulları altında, yerinde inşaat için uygun bir geopolimer beton bağlayıcısı olarak bulunduğunu ve böylece ısı kürleme gerekliliğini ortadan kaldıracağını ifade etmişlerdir.

Humad vd., (2019) UK / YFC oranının, yüksek MgO içerikli YFC'lu alkali aktif beton serisinin özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Karışımlarda 1.0, 0.5 ve 0.25 alkali modülü (kütle oranı $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$) değerlerinde çeşitli miktarlarda SS ile aktive edilmiştir. Sonuçlar, UK içeriğindeki bir artışın başlangıç priz süresini uzattığını, ancak erken priz kuvvetinin azalmasına rağmen priz sona erme süresi üzerinde çok az etkisi olduğunu göstermiştir. Ayrıca aktivatör çözeltisinin 24 saat önce önceden karıştırılmasının pH'da önemsiz değişikliklere rağmen, 7 ve 28 günlük basınç dayanımını arttırdığını ifade etmişlerdir.

Qiu vd., (2019) yeni bir dolgu malzemesi olarak UK/YFC bazlı geopolimerin potansiyelini araştırmışlardır. Sonuçlar, reaksiyon ürünlerinin ve geopolimerin kuvvetlerinin, NaOH konsantrasyonuna ve kaynak malzeme tiplerine bağlı olduğunu göstermiştir. Çökme, priz sona erme süresi ve priz oranı UK içeriğinin bir fonksiyonu olarak artmıştır. Bununla birlikte, UK içeriğindeki artış, YFC'den daha düşük reaktivite nedeniyle geri dolgu malzemesinin basınç dayanımını ve mikro yapısını azaltmıştır.

Mehta ve Siddique (2018), sürdürülebilir geopolimer betonun geliştirilmesi için YFC ve pirinç kabuğu külü gibi endüstriyel yan ürünleri kullanmışlardır. Sonuçlar, PÇ'lu betonunun yerini alabilen ve böylece CaO_2 emisyonlarını azaltabilen, 3 günlük yaklaşık 60 MPa ile yüksek basınç dayanımlı, YFC ve pirinç kabuğu külü kullanarak geopolimer betonun gelişimini incelemiştir. Ayrıca, % 15'lik bu optimum içerikte basınç ve eğilme dayanımlarındaki artış, klorür geçirgenliği ve kapilaritedeki azalmaya neden olmuştur.

Azmi vd., (2016) farklı kırıntı kauçuğu yüzdesinin UK bazlı geopolimer betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu araştırma, çevre dostu, hafif ve dayanıklı bir ürün olarak kauçuklu geopolimer beton üretmeye çalışmıştır. Geopolimer betondaki ince agregaların yerine geçmek için 73 µm ila 375 µm arasında değişen boyutlarda kırıntı kauçuğu kullanılmıştır. Kırıntı kauçuğunun değiştirilmesi UK bazlı geopolimer betonda % 0, % 5, % 10, % 15 ve % 20'olarak kullanılmıştır. UK alkalin aktivatörüne oranı 2.5 ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ 'a oranı 2.0 olarak sabit tutulmuştur. Sonuçlar, kırıntı kauçuk karışımı için tüm basınç mukavemetinde bir azalma olduğunu, ancak yine de normal kauçuklu betondan daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca çalışmada kauçuklu geopolimer betonun bazı yapısal olmayan uygulamalarda uygun bir çözüm olduğu belirtilmiştir.

Pandya, Shah ve Dave (2018), kauçuk miktarını artırarak ve bunu farklı oranla değiştirerek % 5, % 10, % 15, % 25 ve % 50 kullanmışlar ve basınç dayanımının kademeli olarak azaldığı sonucuna varmışlardır. Geopolimer beton karışımında erken dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. Basınç dayanımındaki azalma, normal optimum karışımında elde edilen dayanıma göre kauçuğun potansiyel kullanımının beton için yüksek basınç dayanımı aranan yerlerde kullanılamayacağını bildirmişlerdir.

Shen vd., (2013) çalışmasında, kaplama sürtünme malzemesi olarak bir polimer-kauçuk agregası modifiyeli gözenekli beton hazırlamışlardır. Dayanım, gerilme-şekil değiştirme, aşınma direnci, darbe direnci ve mikroyapısı incelenmiştir. Sonuçlar, kauçuk-agrega modifiye edilmiş gözenekli betonun, kauçuk agreganın mineral agregayla optimum değiştirme oranına sahip olduğunu, mineral agregalı sıradan betonun polimer modifiyeli gözenekli betondan daha yüksek eğilme ve basınç dayanımına sahip olduğunu göstermiştir.

Bravo ve De Brito (2012), kullanılan lastiklerden dayanıklılık açısından yapılmış beton agregası içeren betonun performansını araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonuçları, doğal agregaya ile kullanılmış lastik kauçuk agregasının değiştirilmesinden basınç mukavemetinin % 15 değiştirme oranı için dayanımda yaklaşık % 50'lik bir azalma ile oldukça etkilendiğini göstermiştir.

Benazzouk vd., (2007), kauçuk atık parçacıkları ile havalandırılmış çimento kompozitinin fiziko-mekanik özelliklerini araştırmıştır. Hacme göre çimento yerine farklı miktarlarda kauçuk parçacıkları içeren malzeme ile hazırlanan betonun birim ağırlığında önemli bir azalma sağladığı, böylece yük taşıyan bir duvarla uyumlu bir basınç dayanımı seviyesine yol açtığı görülmüştür. Eğilme dayanımındaki azalma, basınç mukavemetindeki azalmadan daha düşük ve matristeki hava boşluklarının ve kauçuk parçacıklarının mevcudiyetinin, kompozitin yüksek bir ses yalıtım seviyesini gösteren esneklik, dinamik modülünü azalttığını göstermiştir.

Issa ve Salem (2013) 'de yapılan çalışmada, geri dönüştürülmüş malzemelerin, beton karışımlarındaki kırma kum yerine % 0 ila % 100 arasında değişen ince agregalar için kauçuk yerine ikame edilmesi araştırılmıştır. Hacimce % 25'e kadar ince agregaların kırıntı kauçuğu ile değiştirilmesi ile kabul edilebilir bir basınç dayanımı elde edilmiştir. Basınç dayanımı açısından, kum yerine % 25'ten düşük kauçuk içeriklerinde iyi sonuçlar kaydedilmiş ve daha düşük ağırlıklara sahip malzemeler üretilmiştir.

Gupta, Sharma ve Chaudhary (2015), ince agregaların atık kauçuk lifleri ile değiştirilmesinin betonun darbe direnci üzerindeki etkisini incelemiştir. Silis dumanı da çimentonun yerini kullanılmış, üç farklı su çimentosu için altı değiştirme seviyesi % 0, % 5, % 10, % 15, % 20 ve % 25 ve sisli dumanı/çimento oranları da % 0, % 5 ve % 10 göz önünde bulundurulmuştur. Çalışma, atık kauçuğun betonun darbe direncini ve sünekliğini arttırmak için sürdürülebilir bir malzeme olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Taha, Asce ve El-wahab (2009) tarafından yapılan çalışmada, kaba ve ince agregaların kauçuk betondaki farklı hacim değiştirme seviyeleri ile yontulmuş ve ufalanmış lastik kauçuk parçacıkları kullanılmıştır. Atık lastik parçacıklarının optimal değiştirme oranının seçilmesinin arzu edilen mukavemete sahip betonlar verebileceği sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca çalışma, kaba veya ince agreganın değiştirilmesi olarak lastik matris parçacıklarının beton matrisine dahil edilmesinin, taze beton slump değeri ve birim ağırlığında bir azalmaya ve hava içeriğinde de bir artışa neden olduğunu ifade

etmişlerdir. AL beton partiküllerinin değiştirme seviyesi arttıkça betonun basınç dayanımı önemli ölçüde azalmıştır.

Youssif, Mills ve Hassanli (2016) beton üretmek için önceden işlenmiş kırıntı kauçuğu kullanmışlar ve işlem, NaOH çözeltisi ve silis dumanı katkı maddeleri kullanılarak beton çimento içeriğinin artırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. % 0 ve % 20 AL içeriğiyle hazırlanan on beş beton karışımı için kısa ve uzun süreli basınç dayanımları ve çekme dayanımları ölçülmüştür. Sonuçlar, NaOH çözeltisi kullanılarak 0.5 saatlik kauçuk ön işleminin, çimentonun ağırlıkça yerini alan % 0 silika dumanının ve 350 kg / m³ çimento içeriğinin, beton performansını arttırmak için bu değerlendirme aralığında en iyi alternatifler olduğunu göstermiştir.

Khaloo, Dehestani ve Rahmatabadi'nin (2008) çalışmasında, lastik talaşları, kırıntı kauçuğu ve lastik talaşları ile kırıntı kauçuğu kombinasyonlarından oluşan lastik-kauçuk parçacıkları, betondaki mineral agregatların yerine kullanılmıştır. Bu parçacıklar, toplam mineral agrega hacminin % 12.5, % 25, % 37.5 ve % 50'sini yerine kullanılmıştır. Sertleştirilmiş beton numuneleri üzerinde yapılan dayanım testinin sonuçları mukavemette büyük düşüşler olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada betonun kırılma davranışında artan kauçuk içeriğinde önemli bir azalma da görülmüştür.

Aly vd. (2019), kırıntı lastiğinin farklı yüzdelere her ikisinin kısmi bir ikamesi olarak etkisini araştırmış; sertleştirilmiş özellikler (basınç, çekme ve eğilme dayanımı) ve YFC esaslı geopolimer betonun (çimento ile değiştirilmesi; öğütülmüş tanecikli YFC, Na₂SiO₃ ve NaOH ile aktive edilmesiyle hazırlanmıştır. Bu çalışma, YFC esaslı geopolimer betonun basınç dayanımının, kırıntı kauçuk içeriğinin % 10'a kadar artırılmasıyla hafifçe artırılabilirliğini, bu da yapısal elemanlarda kullanılacak yüksek basınç dayanımına sahip ürünler ve atıkların yapısal olarak çevre dostu karışımına yol açabileceğini göstermiştir. NaOH ön işleminin kırıntı kauçuk parçacıkları üzerindeki olumlu etkisi nedeniyle kırıntı kauçuğu yüzdesinin beton üzerindeki olumsuz etkisine ve ayrıca kırıntı kauçuğu yüzdesinin % 10'dan fazla artması, artan yüzdenin etkisinden dolayı basınç dayanımının azalmasına neden olacağı görülmüştür.

Park vd., (2016) çalışmalarında, UK'lü geopolimer betondaki geri dönüştürülmüş lastiklerden kırıntı lastiği kullanmışlardır. Varyans sonuçları, % 95 güven aralığında UK'lü geopolimer betonda % 5'e kadar eşit hacimde kırıntı kauçuğu ile değiştirilebileceğini göstermiştir. Ayrıca regresyon modeli, kauçuk değiştirme ile diğer parametreler arasındaki korelasyonun anlamlı olduğu görülmüştür.



3. MATERYAL VE METOD

3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikler

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan YFC, lastik kırıntısı, sodyum hidroksit (SH), sodyum silikat (SS), ekstra su ve kullanılan agrega gibi malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

3.1.1. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Deney programında kullanılan mineral katkıları, öğütülmüş granül bir YFC olup, Türkiye'deki Ereğli Demir-Çelik Fabrikası'ndan sağlanmıştır. Kimyasal bileşimi aşağıdaki Tablo 3.1 de verilmiştir. YFC'nin özgül ağırlığı 2,95 ve yaklaşık 4989 cm²/g Blaine yüzey alanına sahip olup, kullanılan öğütülmüş tanecikli YFC Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. YFC'nin kimyasal, fiziksel ve minerolojik özellikleri

Kimyasal özellikleri	Elde edilen sonuçlar (%)	EN 197-1 Standart limit değerleri	Test yöntemi
MgO	5.75	Maks. 18	TS EN 196-2
S(sülfür)	0.54	Maks. 2.0	TS EN 196-2
SO ₃	0.19	Maks. 2.5	TS EN 196-2
Kızdırma kaybı	0.09	Maks. 3.0	TS EN 196-2
CL	0.0185	Maks. 0.1	TS EN 196-2
Nem	0.06	Maks. 1.0	TS EN 15167-1 EK A
Na ₂ O	0.056	-	TS EN 196-2
K ₂ O	0.28	-	TS EN 196-2
Na ₂ O Eşdeğer	0.74	-	TS EN 196-2
Fiziksel özellikleri			
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2.95	-	TS EN 196-6
İncelik (cm ² /g)	4989	Min. 2750	TS EN 196-6
Mineralojik özellikleri			
LOI	0.09	Maks. 3.0	TS EN 196-2



Şekil 3.1. Karışımlarda kullanılan YFC

3.1.2. Agregalar

Beton hacminin %70-80'i oluşturan agregalar beton özellikleri üzerinde güçlü etkiye sahiptirler. Agregalar, kırma taş gibi doğal kayadan ve kumdan elde edilen granül malzemelerdir (Junaid vd., 2015). Geopolimer kompozitlerin üretilmesinde de hacmin büyük çoğunluğunu oluşturan ince agrega karışımı kullanılmıştır. Bu karışımdaki agregalar;

- İnce agrega, 0,075mm - 5 mm'lik elek arası
- Silis kumu, 0-2,0 mm arası agrega

Araştırmada kullanılan ince agrega karışımları Şekil 3.2'de ve genel özellikleri Tablo 3.2'de özetlenmiştir.

Tablo 3.2. Agrega elek analizi

Özellikleri	İnce agrega
Özgül ağırlık	2.7-2.8
Su emme oranı (%)	0.3-2.5
İncelik modülü	2-4



Şekil 3.2. Geopolimer üretiminde kullanılan agrega

3.1.3. Atık Lastik (AL)

Bu deneysel çalışma boyunca kullanılan atık lastik malzemeleri yerel bir geri dönüşüm tesisinden toplanmış ve eleme suretiyle istenen boyuta getirilmiştir. Öğütme işlemini yapan makine Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Atık lastik ile ilgili özellikler Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Çalışmada kullanılan lastik tozu özellikleri

Lastik özellikleri	
Yoğunluk	0,64 -0,83
Boyut	80 μm – 4 mm
Uzama (%)	420
Çelik lif oranı	0%
Lastik	54%
Karbon siyahı	29%
Tekstil	2%

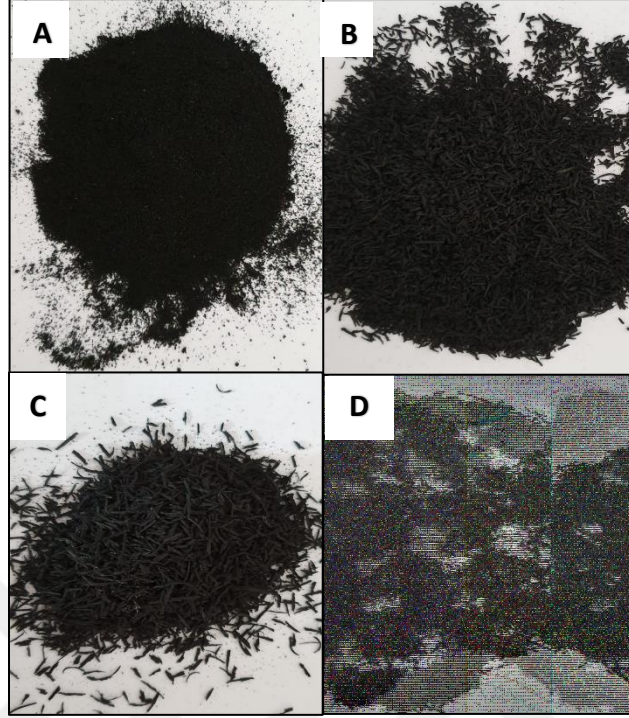


Şekil 3.3. Atık lastik parçalanması

Partikül büyüklüğünün ortalama çapı, yaklaşık 80 μm - 4 mm arasında ve yoğunluk ise ortalama olarak 0,682 g/cm³ olarak kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada AL çapına göre üç boyuta ayrılarak kullanılmıştır. Bu gruplar sırasıyla:

- A = Toz lastik (<1mm),
- B= 1-2 mm ,
- C= 2-4 mm ,
- D= A+B+C (Eşit miktarda karışım)

Bu deneysel çalışma boyunca kullanılan atık lastik Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan AL tipleri

3.1.4. Alkali Aktivatör

Kostik soda olarak da bilinen NaOH, genellikle topaklar, granüller veya pullar şeklinde bulunan beyaz bir malzemedir (Gourley, 2003). NaOH, suda ve yüksek alkalın aktivatör seviyelerinden dolayı oldukça çözünür; geopolimer karışımlarında sıklıkla kullanılır. Bu çalışmada kullanılan SH Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Sodyum hidroksit peletleri

NaOH çözeltisinin hazırlanmasında NaOH topakları, hacimsel bir şişede su içinde çözülmüş ve kullanılan NaOH konsantrasyonu ile Na_2SiO_3 karışımlarının kombinasyonu ile alkali aktivatör, diğer bileşiklerle karıştırılmadan 24 saat önce

hazırlanmıştır (Meyer, 2009). Hazırlanan 16 mol NaOH ve Na₂SiO₃ tüm gruplarda aynı olacak şekilde eşit oranda karıştırılarak alkali aktivatör, diğer bileşiklerle karıştırılmadan hemen önce hazırlanmıştır.

NaOH çözeltisinin hazırlanmasında, NaOH topakları (Şekil 3.5) (küçük, yuvarlak, bir NaOH (SH) maddesinin sıkıştırılmış kütlesi) belirli hacimdeki su içinde çözülmesiyle hazırlanmıştır. Bu amaçla 640 gr NaOH 1 litre su içerisinde çözülmüş ve NaOH ilavesi, geopolimerizasyon sürecini arttıran bir malzeme olduğu için 24 saat çözelti bekletilmiştir.

Molaliteyi hesaplamak için kullanılan denklem, molalitesi hesaplanacak olan çözünen mol oranlarının oranı ve verilen çözünen maddeyi çözmek için kullanılan çözücü hacmidir. 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 litre olup, çözeltinin molalitesi:

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

Bu çalışmada, bir alkalın aktivatörü olarak NaOH ile karıştırılmış Na₂SiO₃ kullanılmıştır. % 97 saflıkta topak halinde NaOH ve Na₂O'dan oluşan Na₂SiO₃; % 13, SiO₂; % 30 ve H₂O; % 3.8, özgül ağırlık 1.35 (20 °C'de) bu çalışmada Şekil 3.6'da gösterildiği gibi kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan Na_2SiO_3 çözeltisi

3.1.5. Su

Standart TS-EN 1008, (2003) 'e dayanarak bu çalışmada karışımlar için Kastamonu Üniversitesi Kampüsü musluk suyu kullanılmıştır.

3.2. Karışım Tasarımı

Bu çalışma, YFC ve AL kırıntısı kombinasyonu ile hazırlanan geopolimer beton karışımlarının etkileri üzerine kapsamlı bir deneysel araştırma sunmaktadır. Bu amaçla ön deneme karışımları ile belirlenmiş olan AL/İnce agrega oranı olarak 3 grup, farklı boyutlarda kullanılan AL tipi olarak ta 4 grup (A, B, C ve D) ve referans grubu olmak üzere (Tablo 3.4) 13 adet geopolimer beton karışımı tasarlanmıştır. Karışımlarda ince agrega, su, SS, SH, AL ve YFC kullanılmıştır.

Tablo 3.4. Karışımlarda kullanılan değişkenler ve oranları

Değişken	Miktarı
AL / İnce agrega	% 5 – % 10 – % 15
AL tipi	A - B - C - D

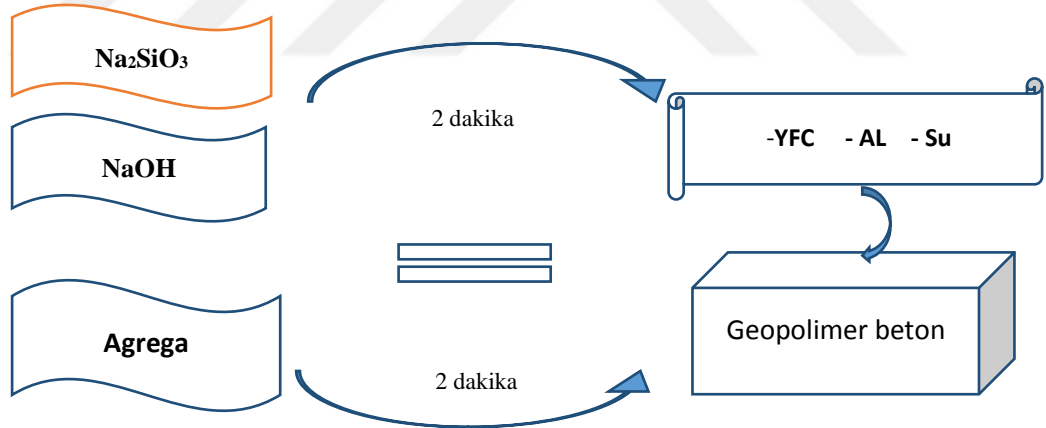
TS-EN196-1 ile uyumlu olarak ince agrega kum, su, AL, YFC, SH ve SS kullanılmıştır. Karışım tasarım verileri Tablo 3.5'de verilmiştir.

Tablo 3.5. Karışım tasarımı

Karışım no	YFC (g/dm ³)	Ince agrega (g/dm ³)	AL (g/dm ³)	AL boyutu (mm)	SS (g/dm ³)	SH (g/dm ³)	Su (g/dm ³)	Karışım zamanı (dak.)
REF.	800	1200	0	-	150	150	130	6
A1	800	1090	75	0-1	150	150	130	6
A2		980	150					
A3		870	225					
B1	800	1090	75	1-2	150	150	130	6
B2		980	150					
B3		870	225					
C1	800	1090	75	2-4	150	150	130	6
C2		980	150					
C3		870	225					
D1	800	1090	75	0-4	150	150	130	6
D2		980	150					
D3		870	225					

3.2.1. Numune Dökümü

Karışımlar, Şekil 3.7'de verilen karışım prosedürüne göre hazırlanmıştır.

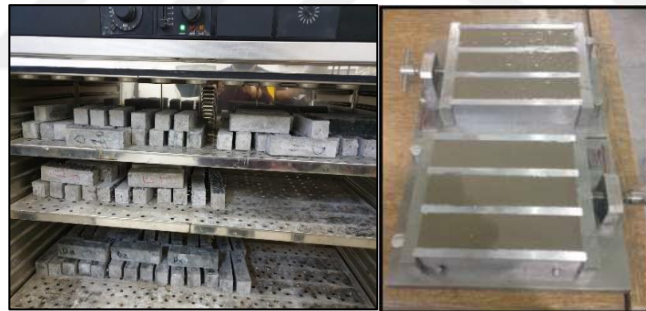


Şekil 3.7. Çalışmanın karıştırma prosedürü



Şekil 3.8. Hobart karıştırıcısı

Geopolimer beton karışımında Hobart karıştırıcısında (Şekil 3.8) hazırlanmıştır. Geopolimer beton üretiminde, karışım sırası ve süresi, tüm karışımlarda aynı homojenliği sağlamak tüm gruplarda homejenlik açısından sabit tutulmuştur. Ayrıca her karışım için, Tablo 3.5'te gösterilen değerler dikkate alınarak gerekli malzeme ağırlıkları hazırlanmıştır. İlk karışım kuru karışım olacak şekilde kum ve ince agregaların iki dakika boyunca karıştırılmasından sonra ikinci olarak, homojen bir şekilde karışması için YFC ve AL karışımlara ilave edilmiş ve iki dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Üçüncü adımda ise, alkali aktivatörleri (SH, SS) ve su ilave edilerek son kez iki dakika daha karıştırılmıştır. Elde edilen geopolimer harcı 4x4x16 cm boyutlarındaki standart kalıplara yerleştirilerek prizma örnekler elde edilmiştir. Dökümden sonra, geopolimer numuneleri, alkali aktivatör çözeltisinin buharlaşmasını önlemek için, standart kalıpların üzeri 24 saat boyunca bir cam tabaka (Şekil 3.9) ile kapatılmıştır. Kalıplardan çıkarılan numuneler kür süreci için etüv içinde 24 sa 70 °C'de bekletilmiş, sonra test edilene kadar örnekler 25 ± 3 °C'de laboratuvar koşullarında bekletilmiştir.



Şekil 3.9. Numune kür süreci

3.3. Method

3.3.1. Yayılma Tablası Testi

Yayılma tablası deneyi, engellerin olmadığı durumlarda harcın yatay serbest akışını değerlendirmek için kullanılır. Test yöntemi, çöküşün belirlenmesi için yapılan test yöntemine dayanmaktadır ve bu deneyde dairenin çapı (Şekil 3.10) betonun dolmuş kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Bu testte bir koni harçla doldurulur ve temiz ve kuru olan dairesel akış tablasının ortasına yerleştirilir 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. Harcın müteakip çapı iki dikey boyutta ölçülür ve ortalama son çap olarak rapor edilir.



Şekil 3.10. Yayılma çapı testi

3.3.2. Yoğunluk Testi

Beton numunelerinin yoğunluğu ASTM C642-97 'ye göre belirlenmiştir. Yoğunluk, en az 24 saat etüvde 105 ± 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 = Doygun yüzey numune ağırlığı, g

C = Kaynatılan numune ağırlığı, g

D = Su içindeki numune ağırlığı, g

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

3.3.3. Porozite ve Su Emme Oranı Testi

Betonun porozitesi su, hava, asit ve bazı 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 105 ± 5 ° C'de 24 saat boyunca kuru ağırlığı belirlenmekte, daha sonra numuneler içi su dolu kaptan 24 saat bekletilerek doymun hale gelmesi sağlanmıştır. Ayrıca numuneler su içerisinde kaynatılarak soğuması beklenilmiş ve arşimet yöntemiyle su içerisindeki ağırlıkları (Şekil 3.11) belirlenmiştir. Numunelerin porozite ve su emme oranlarının ölçülmesinde ise eşitlik (3.5) ve (3.6) kullanılmıştır:



Şekil 3.11. 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. Basınç Dayanımı Testi

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 kürlenmesini tamamlamasından sonra, Şekil 3.12'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 (mm²)

σ : Basınç dayanımı (N/mm²)



Şekil 3.12. Geopolimer beton basınç dayanım testi

3.3.5. Eğilme Dayanımı Testi

Geopolimer betonların eğilme dayanımı değerleri TS EN 1015-11 standardına göre belirlenmiştir. Eğilme dayanımı deneyi geopolimer numunelerin döküm yönü olmayan

yan yüzeylerine tek noktadan yükleme yapılması suretiyle tayin edilmiştir. Tek noktadan yükleme yapılacak olan 40x40x160 mm boyutlarındaki prizma numuneler yan yüzeylerinden presinin mesnet silindirlerinin üzerine yerleştirilmiştir. Mesnet silindirlerinin açıklığı 10 cm olmakla birlikte yük numunenin orta noktasından mesnet silindirlerinin eksenlerine dik olacak şekilde uygulanmıştır. Geopolimer betonların eğilme dayanım değerleri ise çimento presinde (Şekil 3.13.) numunenin kırılmasına neden olan yükün numune kesitinde meydana getirdiği momentin kesit mukavemet momentine bölünmesi ile tayin edilmiştir.



Şekil 3.13. Eğilme test cihazı

3.3.6. Ultrases Geçiş Hızı (UPV)

Ultrases geçiş hızı (UPV) deney metoduyla harcın veya betonun dayanım değerleri tam olarak belirlenmemektedir. Ancak bir harç veya beton numunenin bir tarafından diğer bir tarafına geçen ses üstü dalganın geçiş süresi, numunelerin içerisinde bulunan boşluklar ve numunelerin yoğunluğu ile ilişkilidir. Daha boşluksuz ve dolu bir harç veya betondan ses üstü dalganın geçiş süresi daha kısadır. Ses üstü dalganın geçiş süresinin daha kısa olması harcın veya betonun genellikle daha kaliteli olduğunu, dayanımının daha yüksek ve dayanıklılığının daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, UPV ölçümleri, Şekil 3.14'te gösterilen cihazla gerçekleştirilmiştir. Ultrases geçiş süresi belirlenmeden önce numunelerin ölçüm yapılacak yüzeyleri temizlenmiştir. Ayrıca, okumaların daha iyi yapılabilmesi için cihazın başlıklarına bir jel sürülmüştür. Daha sonra bu cihazın alıcı ve verici başlıkları her bir numunenin karşılıklı yüzeylerine tutulmuş ve numuneden ultrases geçiş süreleri okunmuştur. Her bir numunede en az iki okuma yapılmıştır. Daha sonra 3 numuneden okunan değerler ile UPV değerleri belirlenmiştir. UPV ölçümleri ASTM C 597 (2009) standardına

uygun olarak yapılmıştır ve süresi mikrosaniye (μs) cinsinden ifade edilir. UPV değeri, ses üstü dalgaların numunenin bir tarafından diğer tarafına geçiş süresine bağlı olarak eşitlik 3.8 ile hesaplanır.

$$UPV = \frac{S}{t} \times 10 \quad (3.8)$$

Eşitlikte;

UPV : ultrases geçiş hızı (km/s),

S : numunesinin ses dalgası gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzeyi arasındaki uzaklığı (cm) ve

t : ses üstü dalganın gönderilmiş olduğu numune yüzeyinden, dalganın alındığı yüzeye kadar geçen zamanı (μs) ifade etmektedir.



Şekil 3.14. Ultrases geçiş sürelerinin belirlenmesi

3.3.7. Yüksek Sıcaklık Etkisi

Betonun yangın anında kalacağı yüksek sıcaklıklardaki davranışsal performansı, betonun yapısal bütünlüğünü koruyacak, yangına dayanıklılıktan ödün vermeyecek ve ısı saldırısından kusursuz koruma sağlayacak şekilde olması gerekir. Bu betonu yangına karşı güvenilir bir malzeme yapar. Yapısal malzemelerin ve montajların yangın derecesi, genel olarak testler ve temel birimler olarak ölçüm değerlerindeki belirtmektedir. 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 900 °C olacak şekilde sırasıyla numuneler 300 °C, 600°C ve 900°C yüksek sıcaklıklarda (Şekil 3.15) 1 saat süreyle ve ani dayanım kayıplarına mani olmak için de oda sıcaklığında yavaş bir soğumaya bırakılmışlardır. Bu süreç sonunda numunelerin basınç dayanımları belirlenmiş ve 28 günlük numune değerleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.15. Yüksek sıcaklık (900 °C) testi örnekleri

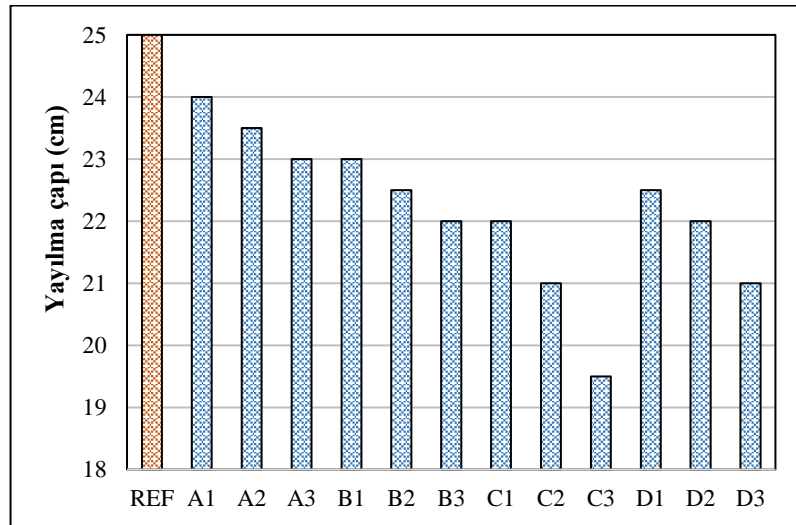
4. TARTIŞMA VE BULGULAR

4.1. Yayılma Tablası Testi Sonuçları

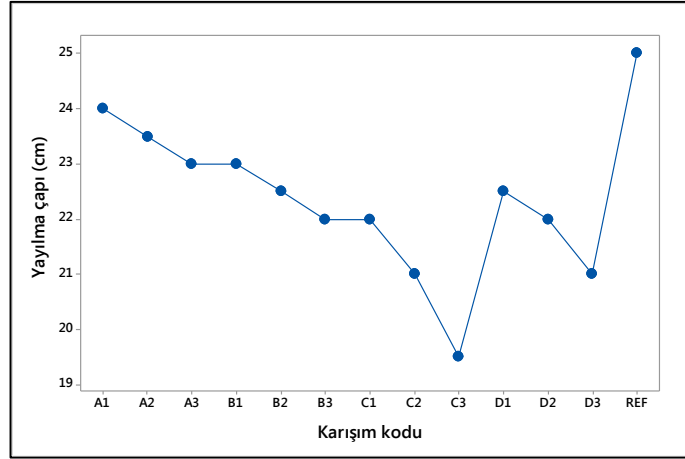
Yayılma tablası deneyi geleneksel olarak en çok kullanılan deneylerden birisidir. Geopolimer harcın kalıba doldurulduğu bir kesik koninin 25 düşüşten sonraki yayılma çapı ölçülür. Bu deney sonucunda numulerdeki yayılma çapı 19,5 ila 25 cm arasında değişmektedir. Geopolimer harçlarda AL kullanımı sonucu yayılma çapındaki değişimler Tablo.1, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Yayılma çapı değerleri

Karışım no	Yayılma çapı (cm)
REF	25,0
A1	24,0
A2	23,5
A3	23,0
B1	23,0
B2	22,5
B3	22,0
C1	22,0
C2	21,0
C3	19,5
D1	22,5
D2	22,0
D3	21,0

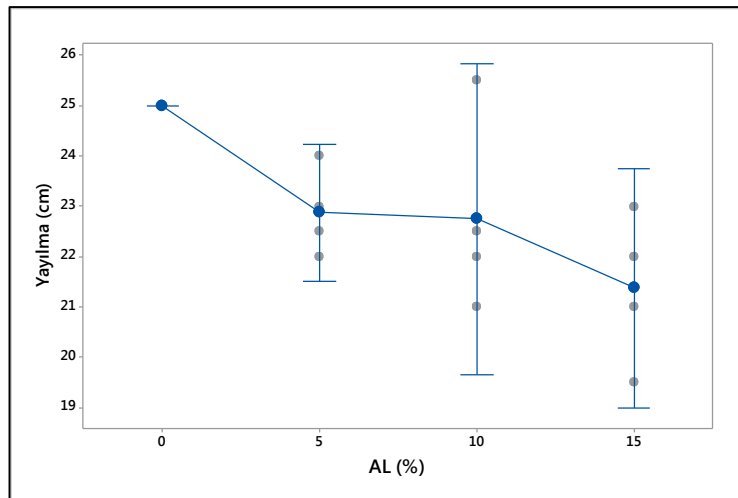


Şekil 4.1. Yayılma çapındaki değişim

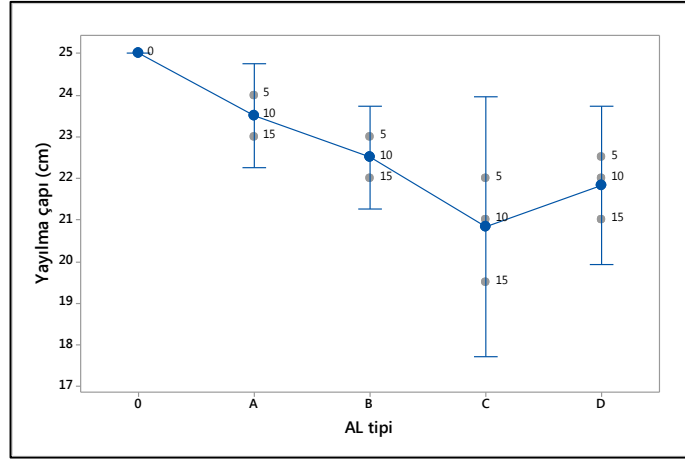


Şekil 4.2 Geopolimer betonların yayılma çaplarındaki değişim

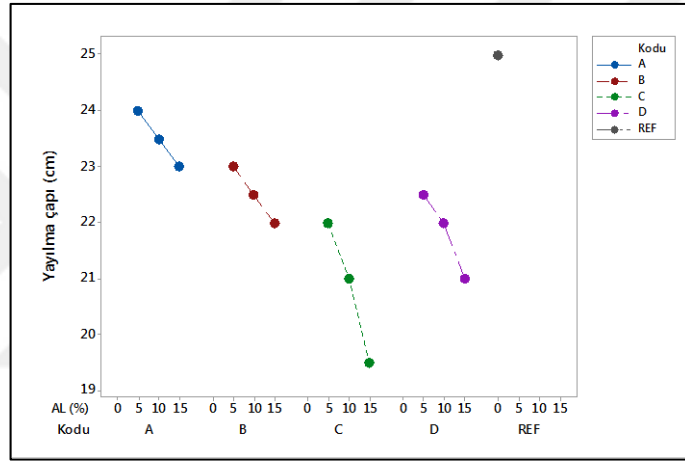
Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 incelendiğinde kullanılan AL boyutundaki değişime paralel olarak yayılma çapında negatif yönlü bir değişim olduğu, kullanılan AL miktarı ve AL boyutu arttıkça yayılma çapında azalış meydana geldiği görülmüştür. Geopolimerlerde kullanılan AL oranının etkisi Şekil 4.3'te verilmiş olup, %5 oranında AL kullanımında yayılma çapının referans karışıma göre ortalama %8 azaldığı, artan orana bağlı olarak bu değişimde artışı belirlenmiştir. AL'in % 15 oranında kullanımında ise yayılma çapında ortalama % 14 düşüş tespit edilmiştir. Yayılma çapının ortalama değeri AL %5 kullanımında 23 cm, % 10 kullanımında 23 cm ve %15 kullanımında da 21 cm olduğu söylenebilir. Genel olarak, AL yüzdesinin yayılma çapı ile akışkanlığı üzerinde olumsuz etkiye sahiptir.



Şekil 4.3. AL oranının yayılma çapına etkisi



Şekil 4.4. AL boyutunun yayılma çapına etkisi

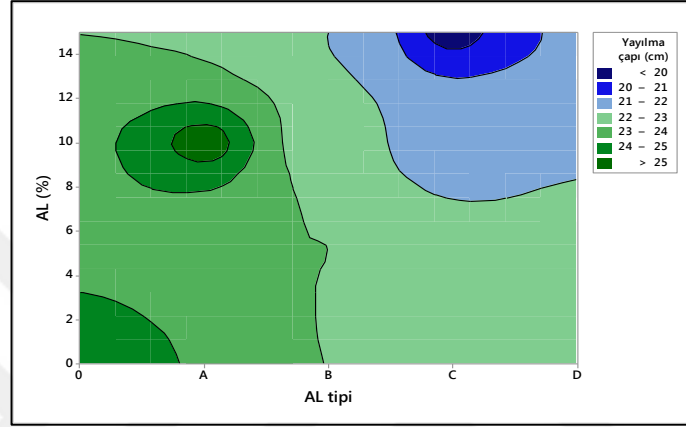


Şekil 4.5. AL oranına ve tipine göre yayılma çapındaki değişim

AL boyutunun yayılma çapı üzerindeki etkisinin belirlenmesinde Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 incelendiğinde, AL boyutu 0-1 mm arası olan A tipi karışımların standart sapması ile boyutu 1-2 mm arası olan B tipi karışımların standart sapmasına yakın olduğu, artan orana bağlı olarak ± 3 cm 'lik bir değişime neden olduğu tespit edilmiştir. Ancak artan AL boyutunda (2-4 mm) standart sapmanın artan kullanım oranına bağlı olarak $\pm 6,5$ cm lik bir değişim ile düzensiz bir akışkanlık sergilemiştir. Buna rağmen 0-4 mm lik homojen bir karışım boyutunda AL kullanımını ifade eden D tipi karışımlarda ise standart sapmanın ± 4 cm arasında değiştiği, B tipi karışıma yakın yayılma çapı değerleri elde edildiği tespit edilmiştir.

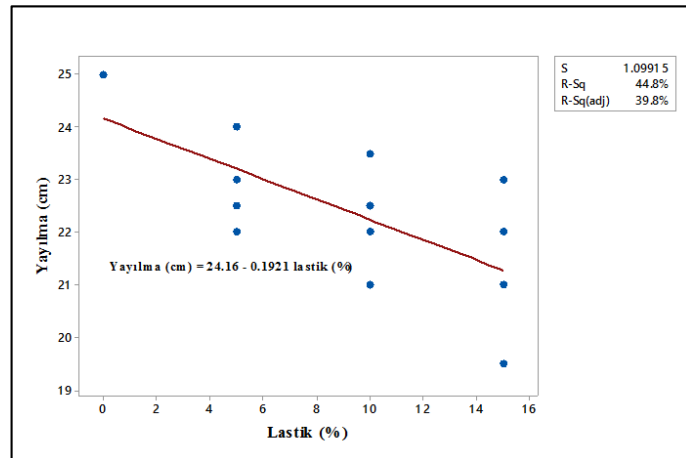
Geopolimer betonda AL kullanılmasında değişken parametrelere göre yayılma çapının belirlenmesinde yararlanılabilecek kontuar grafiği incelendiğinde (Şekil 4.6),

geopolimer beton AL tipi ve yüzdesinin yayılma üzerine etkisi olduğu, yerleşme sıkıntısı olabilecek yerlerde daha çok A veya B tipini ifade eden 0-2 mm boyutlarındaki AL kullanılmasının daha etkili olacağı görülmüştür. Aksi hallerde %10 ve üzeri oranlarında AL kullanımında boyuta bakılmaksızın yayılma çapında azalmaya neden olduğu, bu durumun AL tanelerinin birbiri üzerinden kayma gerçekleştirmemesi ile yayılma çapında azalışa neden olması ile açıklanabilir.



Şekil 4.6. AL oranına ve tipine bağlı yayılma çapı

İstatiksel olarak AL katkısının yayılma çapına etkisi incelendiğinde ise (Şekil 4.7) bağımsız değişken (yayılma) ve bağımlı değişken (Lastik kauçuğun yüzdesi) arasında AL arttığında, yayılma akışının azaldığı ve $R^2 = 44,8$ lik bir ilişki ile $Yayılma = 24,16 - 0,1921 AL$ bağıntısı ile istatistiksel açıdan önem seviyesi düşük bir ilişki olduğu belirlenmiştir.



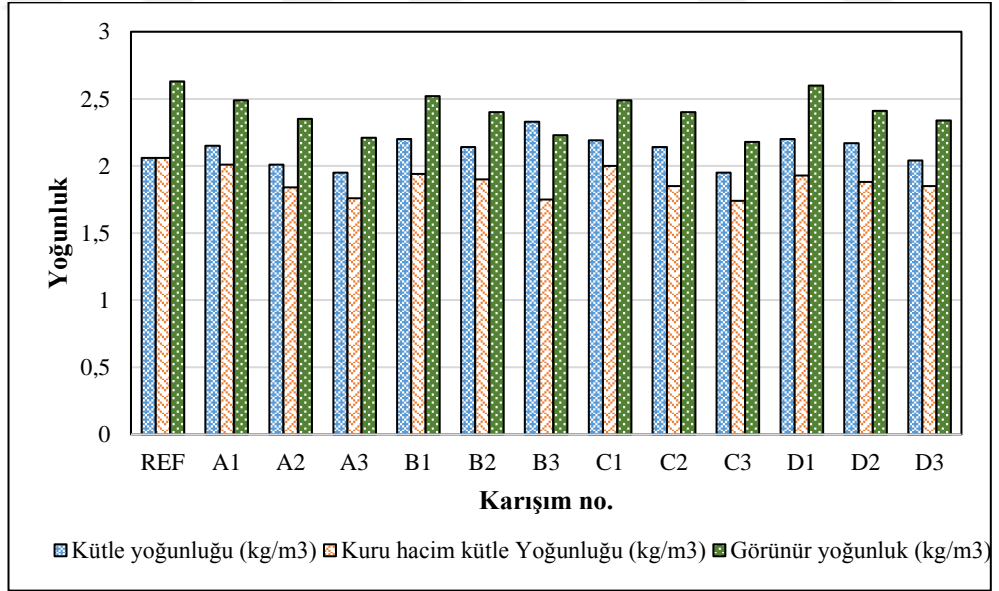
Şekil 4.7. Geopolimer betonda yayılma çapı ve AL yüzdesi arasındaki ilişki

4.2. Yoğunluk Testi

Beton numunelerin yoğunluğu (ASTM C642,97)'ye göre belirlenmiş olup geopolimer betonların yoğunluklarındaki değişimler Tablo 4.2 ve Şekil 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.2. AL katkılı geopolimerlerde yoğunluklardaki değişim

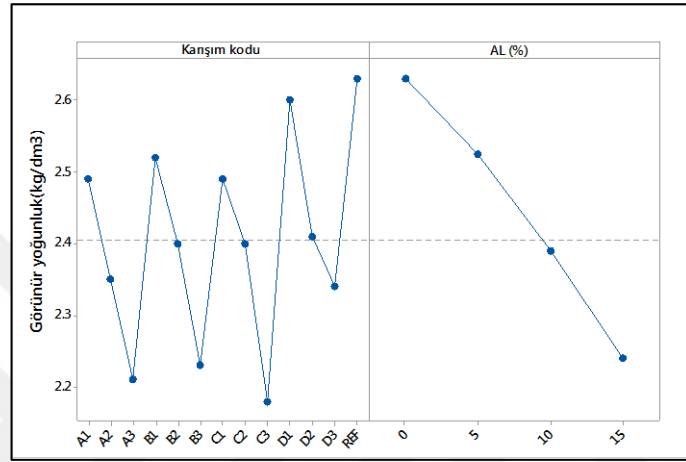
Karışım	Kütle yoğunluğu (kg/m ³)	Kuru hacim kütle Yoğunluğu (kg/m ³)	Görünür yoğunluk (kg/m ³)
REF	2.06	2.06	2.63
A1	2.15	2.01	2.49
A2	2.01	1.84	2.35
A3	1.95	1.76	2.21
B1	2.20	1.94	2.52
B2	2.14	1.9	2.40
B3	2.33	1.75	2.23
C1	2.19	2.00	2.49
C2	2.14	1.85	2.40
C3	1.95	1.74	2.18
D1	2.20	1.93	2.60
D2	2.17	1.88	2.41
D3	2.04	1.85	2.34



Şekil 4.8. AL katkılı geopolimer betonların yoğunluk değişimi

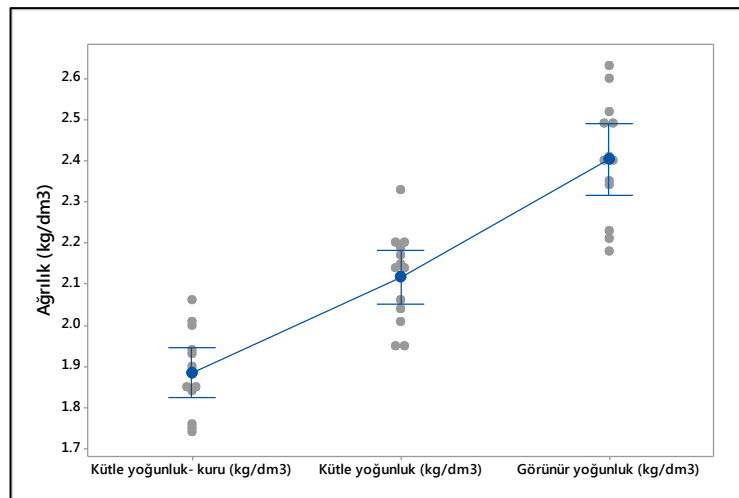
Geopolimer betonlarda AL kullanımına bağlı yoğunluk değişimleri incelendiğinde (Tablo 4.1 ve Şekil 4.8), görünür yoğunluk, kütle yoğunluğu ve kuru hacim kütle yoğunluğu farklı oranlarda ve boyutta kullanılan AL miktarındaki artışa bağlı olarak

tüm gruplarda görünür yoğunluk ve kütle yoğunluklarının azaldığı görülmüştür. Ayrıca Şekil 4.10 incelendiğinde; karışımlarda kullanılan AL oranına paralel olarak yaklaşık %15'lik görünür yoğunluktaki azalmaya neden olduğu, en yüksek yoğunluğun 2,63 kg/m³ ile referans karışımında elde edilmişken en düşük yoğunluğunda 2-4 mm boyutunda AL kullanılması durumunda da 2,18 kg/m³ olarak gerçekleşmiştir.



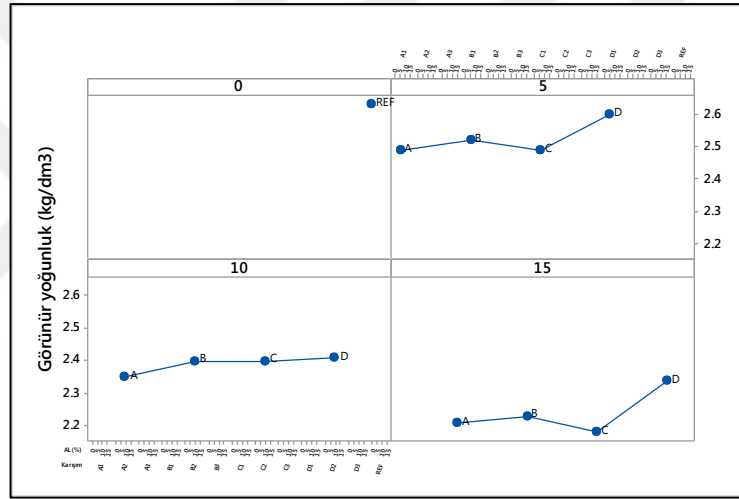
Şekil 4.9. Görünür yoğunluk ile AL yüzdesi arasındaki ilişki

Şekil 4.10 incelendiğinde, ortalama değer olarak kuru hacim kütle yoğunluğunun 1.9 kg/dm³, kütle yoğunluğu ve görünen yoğunluğun sırasıyla 2.1 kg/dm³ ve 2.4 kg/dm³ olduğu ve mevcut kütle yoğunluğun kuru hacim kütle yoğunluğundan yaklaşık % 25 daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

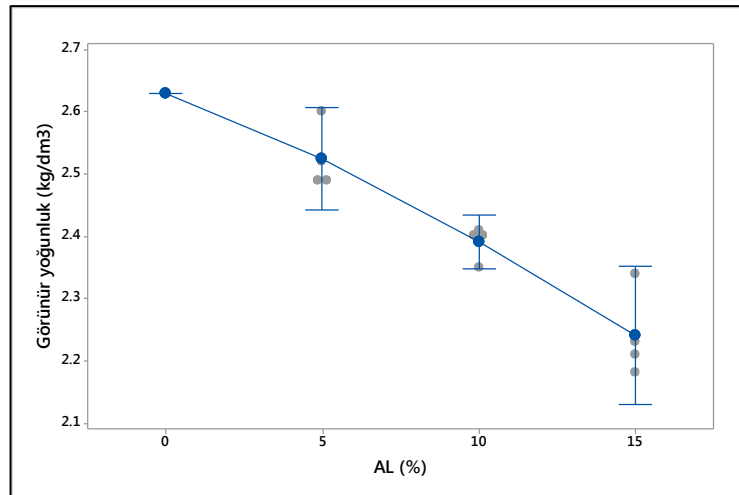


Şekil 4.10. Geopolimer betonlarda yoğunluklardaki genel değişim

Geopolimer betonlarda AL kullanım oranı daha detaylı incelendiğinde (Şekil 4.11); AL kullanımına bağlı olarak artan AL boyutunun çok küçük değişimler olmak üzere görünür yoğunluklarda artışa neden olduğu görülmektedir. Ancak istatistiksel açıdan gruplar ortalaması dikkate alındığında (Şekil 4.12) standart sapması değişkenlik göstermesine karşılık görünür yoğunluklarda AL katkısının düşüşe neden olduğu belirlenmiştir. AL katkısı düşük yoğunluğu nedeniyle % 15 kullanımında yaklaşık 2.2 kg/m³, % 10 kullanımında 2.4 kg/m³, % 5 kullanımında 2.53 kg/m³ ve hiç kullanılmaması durumunda ise % 2.65 kg/m³ görünür yoğunluk değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Yoğunluk açısından, AL kullanımı görünür yoğunluk üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir.

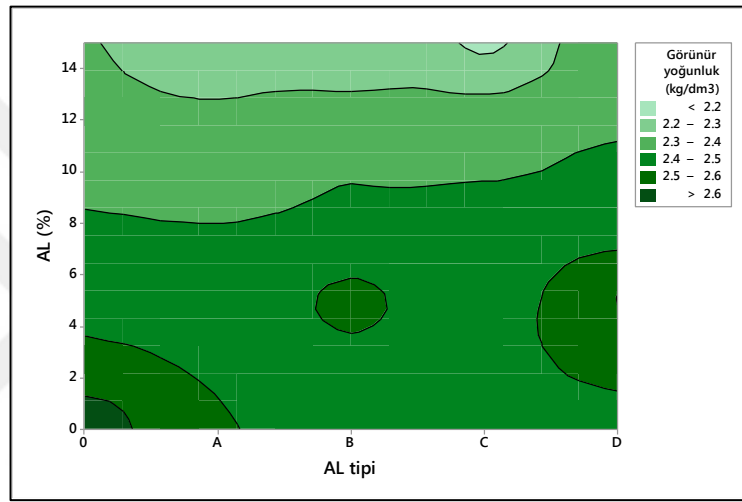


Şekil 4.11. Geopolimer betonlarda AL oranına göre görünür yoğunluk değişimi



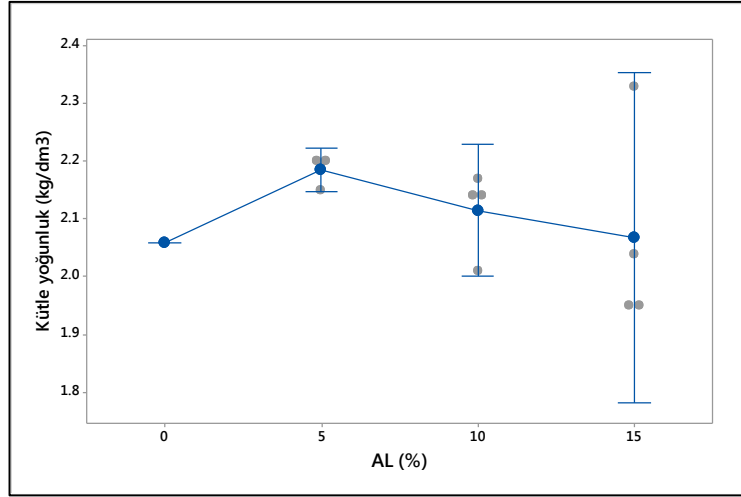
Şekil 4.12. AL ilavesinin görünen yoğunluktaki değişimi

Geopolimer betonların görünür yoğunluklarının tahmin edilmesinde kullanılacak kontuar grafik (Şekil 4.13) incelendiğinde, geopolimer betonun AL tipinin kullanımından ziyade kullanılan AL oranının görünür yoğunluktaki değişime daha çok etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yoğunluğu yüksek geopolimer beton ($>2,4 \text{ kg/m}^3$) üretiminin istenilmesi durumunda AL oranının %8'i geçmemesi halinde mümkün olabileceği, aksi takdirde düşük yoğunlukların elde edileceği belirlenmiştir. Ayrıca, görünür yoğunluk değerinin $2,2 \text{ kg/m}^3$ 'den az olmasının ise iri lastik boyutunda $>\%14$ değerinde kullanılması ile mümkün olabileceği görülmüştür.



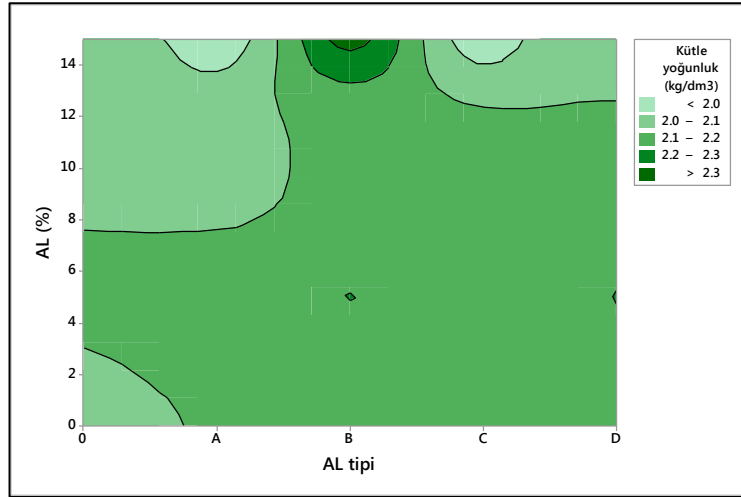
Şekil 4.13. AL tipi ve oranına bağlı görünür yoğunluk tahmini

Geopolimer betonlarda AL katkısının kütle yoğunluğuna etkisi incelendiğinde (Şekil 4.14), 0-1 mm lik kullanılmasında kütle yoğunluğunda yaklaşık %10'luk bir artışa neden olduğu görülmüştür. Ancak değişen boyuta bağlı olarak kütle yoğunluklarında azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Bu azalmanın tane boyutuna bağlı olarak hem boşlukları tamamen kaplaması hem de yerini aldığı malzemelerden daha düşük yoğunluğa sahip olması ile geopolimer beton kütle yoğunluğunun azalmasına sebep olmasıyla açıklanabilir.

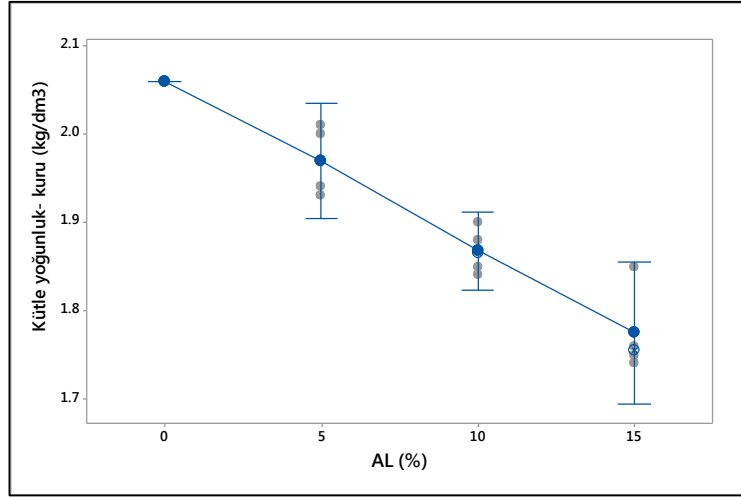


Şekil 4.14. Geopolimer betonda AL oranının küttele yoğunluğuna etkisi

Geopolimer betonların küttele yoğunluklarının tahmin edilmesinde Şekil 4.15 incelendiğinde, geopolimer betonun 0-1 mm AL tipinin kullanılması durumunda küttele yoğunluğu değışkenlik gösterebileceği ancak diğer boyutlarda kullanılması durumunda ise görünür yoğunlukta kullanılabilir maksimum %8 'lik bir AL kullanımında 2,1 kg/m³ ve 2,2 kg/m³ arası küttele yoğunlukları elde edilebileceği görülmüştür.

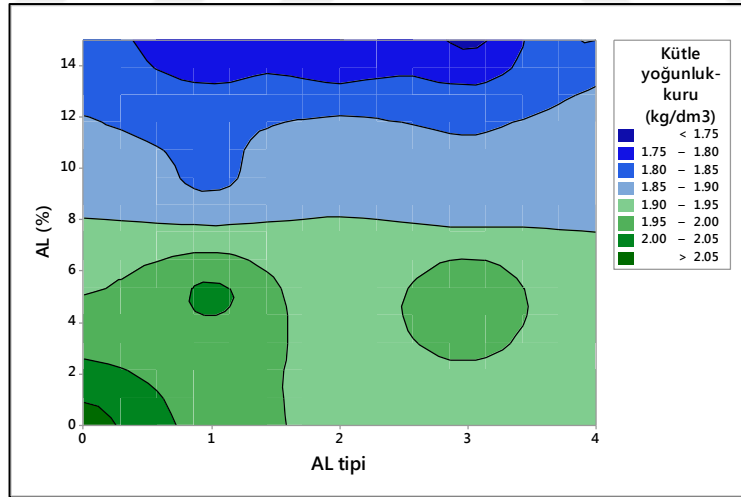


Şekil 4.15. AL tipi ve oranına bağlı küttele yoğunluk tahmini



Şekil 4.16. Geopolimer betonda AL oranının kuru hacim kütle yoğunluğuna etkisi

Şekil 4.16 incelendiğinde, kuru hacim kütle yoğunluğunun görünür yoğunlukla benzer değişime sahip olduğu, artan AL kullanımına bağlı kuru hacim yoğunluğunda azalmanın olacağı belirlenmiştir. Ayrıca Şekil 4.17 incelendiğinde 1.8 kg/m³ ve üzeri kuru hacim kütle yoğunluğu elde edilebilmesinin sadece %8'e varan oranlarında AL kullanımında mümkün olabileceği görülmüştür.



Şekil 4.17. AL tipi ve oranına bağlı kuru hacim kütle yoğunluk tahmini

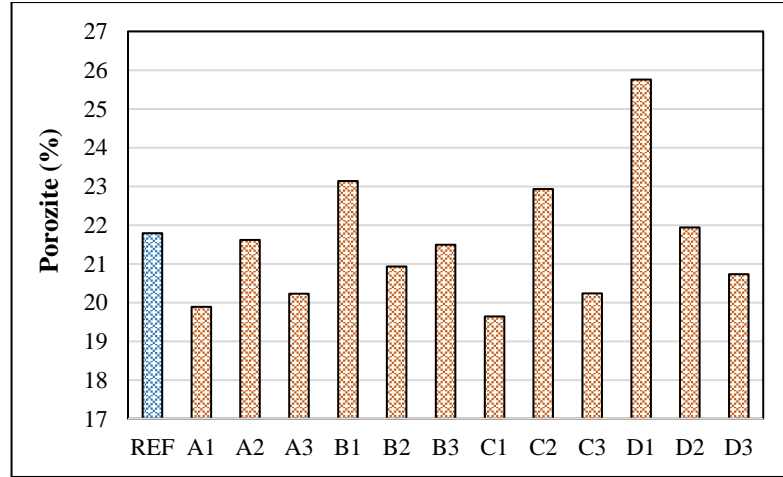
4.3. Porozite Testi

Porozite, gözeneklerle dolu ve genellikle yüzde olarak ifade edilen betonun toplam boşluk hacminin oranını tanımlamak için kullanılır. Tablo 4.3 ve Şekil 4.18 incelendiğinde, geopolimer betonlarda AL katkısı ile üretilmesinde porozite

değerlerinin yaklaşık %19 ile %25,76 arasında normal betonlara kıyasla çok yüksek bir değer elde edilmiştir. Bu değerlerin elde edilmesinde geopolimer matrisi içerisinde kullanılan malzemelerden dolayı kompasitenin tam sağlanamadığı ve dolayısıyla AL partikülleri ile malzeme içerisinde boşluklu bir yapı ile poroz bir malzeme oluştuğu görülmüştür. Ancak AL tipi ve oranına bağlı olarak ta referans karışımına kıyasla genelde porozitede azalma olduğu da tespit edilen bir diğer sonuçtur.

Tablo 4.3. Geopolimer betonda porozite değerleri

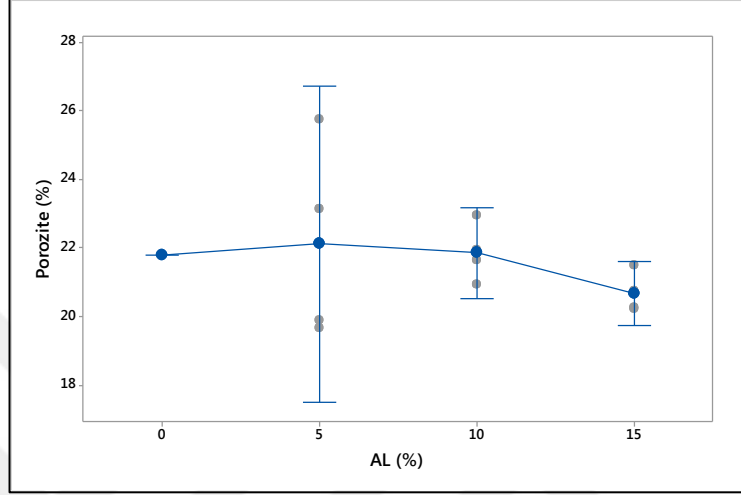
Karışım	Porozite (%)
REF	21.79
A1	19.89
A2	21.62
A3	20.23
B1	23.14
B2	20.93
B3	21.49
C1	19.64
C2	22.93
C3	20.24
D1	25.76
D2	21.94
D3	20.73



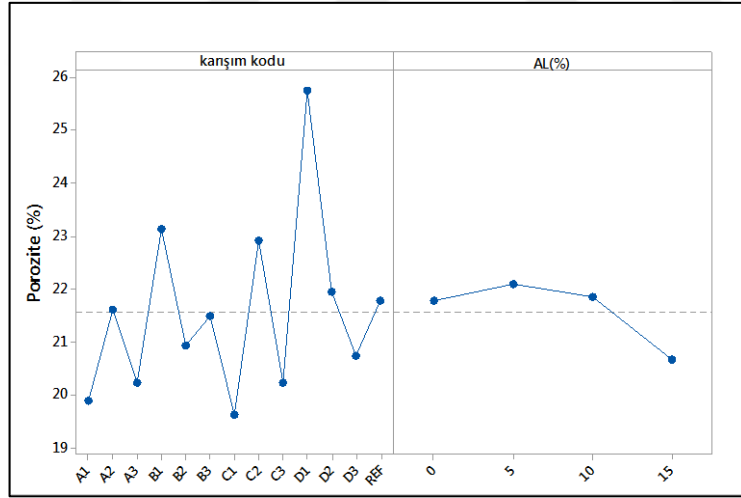
Şekil 4.18. Geopolimer betonda porozitedeki değişim

Geopolimer betonlarda AL oranının etkisinin değerlendirildiği Şekil 4.19 ve Şekil 4.20 incelendiğinde, istatistiksel ortalamalara bağlı olarak geopolimer betonlarda %5 oranında AL kullanılmasının standart sapması da yüksek olan bir boşluk oranına neden olduğu, ancak daha yüksek oranda kullanılmasında ise beklenilen aksine artan

kullanım oranına bağılı olarak ta giderek boşluk oranının da azaldığı görülmektedir. Bu durum kullanılan AL malzemesinin geopolimer üretiminde kullanılan malzemeler ile ideal bir gradasyon sağlamada yüksek oranda AL kullanılması gerektiğini ortaya koymaktadır.



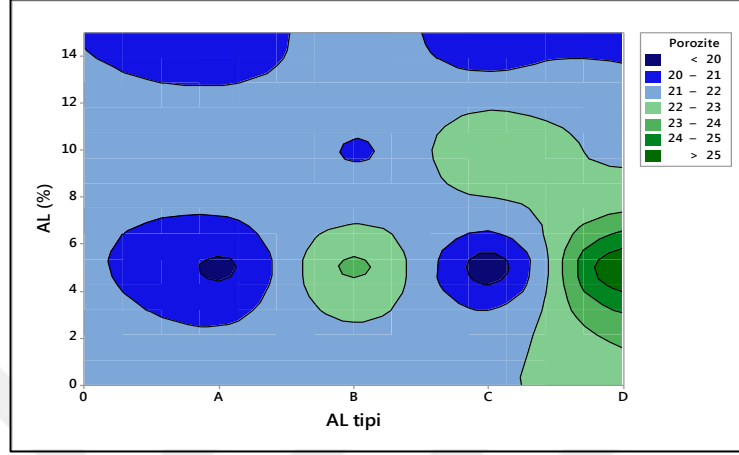
Şekil 4.19. Geopolimer betonda AL oranının poroziteye etkisi



Şekil 4.20. Geopolimerin gözenekliliği ile AL arasındaki ilişki

Geopolimer betonlarda AL katkısı ile porozitenin belirlenebilmesi için Şekil 4.21 incelendiğinde, kullanılan AL tipinin önemli olduğu ve kullanılan tipe göre porozitede önemli değişimlerin olabileceği görülmektedir. Ayrıca %3 ile %6 oranları arasında kullanılması durumunda ya yüksek poroziteye sahip bir malzeme ya da düşük poroziteye sahip bir malzeme elde edilebileceği görülmüştür. Bu durumun kullanılan boyutlara bağılı olarak değişen, geopolimer malzeme içerisinde de ideal bir doluluk

sağlayamayarak boşluk oranında artışa neden olabileceği ya da tane boyutu sayesinde malzemeler arasında boşlukları bir nebze azaltmak suretiyle porozitede düşüşe neden olabilmesiyle açıklanabilir.



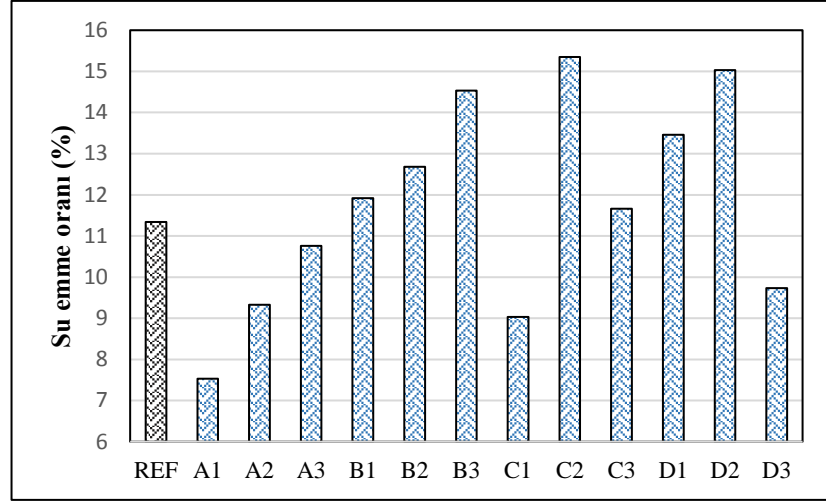
Şekil 4.21. AL tipi ve oranına bağlı porozite tahmini

4.4. Su Emme Oranı Testi

Geopolimer betonlarda kullanılan AL katkısı sonucu su emme oranlarındaki değişimler Tablo 4.4 ve Şekil 4.22’de verilmiştir.

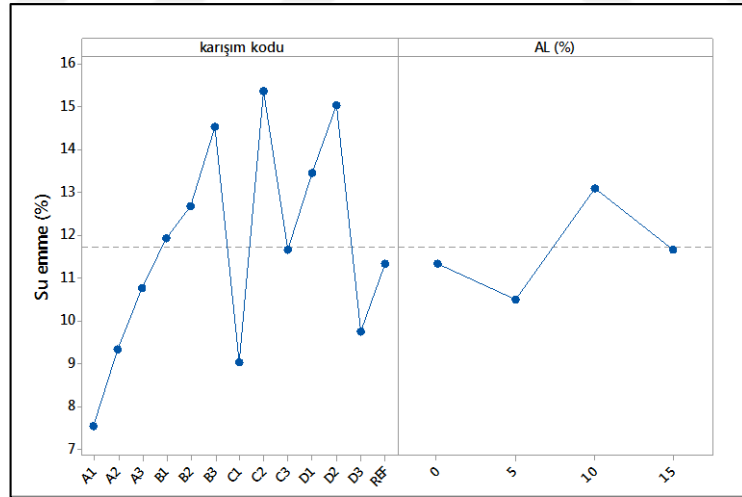
Tablo 4.4. Geopolimer betonların su emme oranı değerleri

Karışım	Su emme oranı (%)
REF	11.34
A1	7.53
A2	9.33
A3	10.76
B1	11.92
B2	12.68
B3	14.53
C1	9.03
C2	15.35
C3	11.66
D1	13.46
D2	15.03
D3	9.73



Şekil 4.22. Geopolimer betonda su emme oranındaki değişim

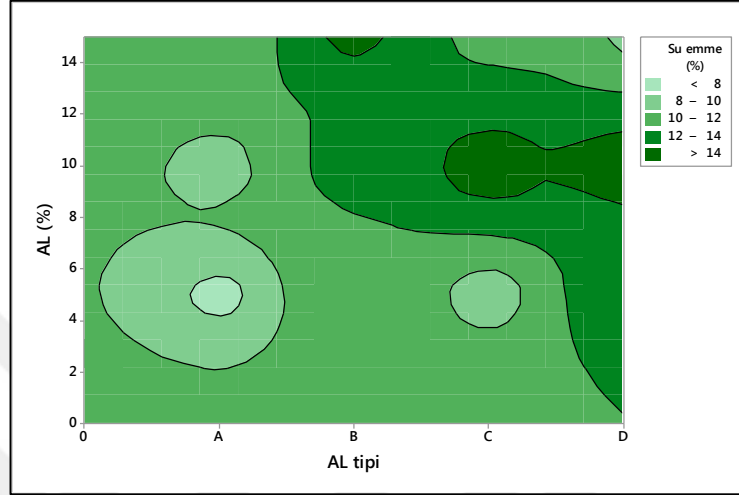
Tablo 4.4 ve Şekil 4.22 incelendiğinde, D11 karışımında maksimum su emme oranı değeri % 15.35 ile C1 karışımında, en düşük değer %7.53 olarak A1 karışımında belirlenmiş olup, AL kullanılmasında su emme oranında azalmaya eden olabileceği tespit edilmiştir. Ancak bunun koşulunun ise ideal bir AL boyutu ve oranına bağlı olabileceği görülmüştür.



Şekil 4.23. Geopolimerin su emme oranı ile AL oranı arasındaki ilişki

Şekil 4.23 incelendiğinde, referans geopolimer betonun su emme oranı %11,34 olarak belirlenmişken, 0-1 mm tane boyutna sahip A grubu lastik kullanımında artan kullanım oranıyla artmakla birlikte referans numunesinden yaklaşık %5 daha az su emme oranı değeri elde edilebileceği belirlenmiştir. Geopolimer betonlarda AL'in B tipi kullanılmasında artan atık kullanımına bağlı olarak yükselen bir değişim olmakla

birlikte, C tipi lastik kullanılması durumunda su emme oranında tamamen bir değişkenlik olduğu tespit edilmiştir. Bu durum belirli bir boyut arasındaki tanelerin yeterince kompakteyi sağlayamayacağı ve dolayısıyla su emme oranında artışa neden olmaktadır.



Şekil 4.24. AL tipi ve oranına bağlı su emme oranı tahmini

Su emme oranlarının belirlenmesinde kontuar grafik (Şekil 4.24) incelendiğinde, geopolimer betonun porozite sonuçları ile uyumlu olarak düşük su emme oranlarının yaklaşık %5 oranlarında A veya C tipi AL kullanılmasıyla sağlanabileceği, aksi takdirde değişen AL boyutu ve oranlarında kullanılmasında %14 ve üzeri su emme oranları elde edilebilen bir geopolimer beton üretilebileceği tespit edilmiştir.

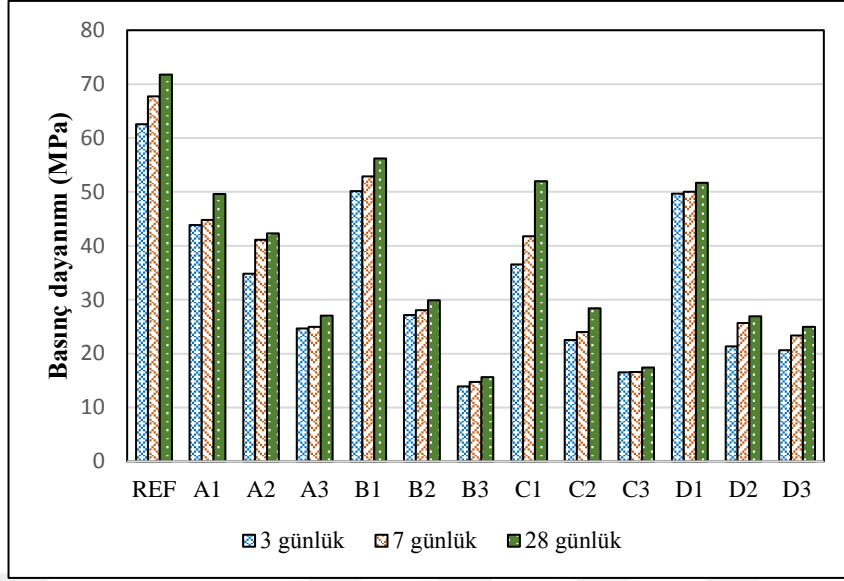
4.5. Basınç Dayanım Testi

Geopolimer betonların basınç dayanımını incelemek için, $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarındaki standart prizma beton örnekleri hazırlanmış ve TS-EN196-1 özelliklerine göre test edilmiş olup, geopolimer karışımlarının ortalama basınç dayanımı değerleri Tablo 4.5 ve Şekil 4.25'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Geopolimer betonların basınç dayanımı değerleri

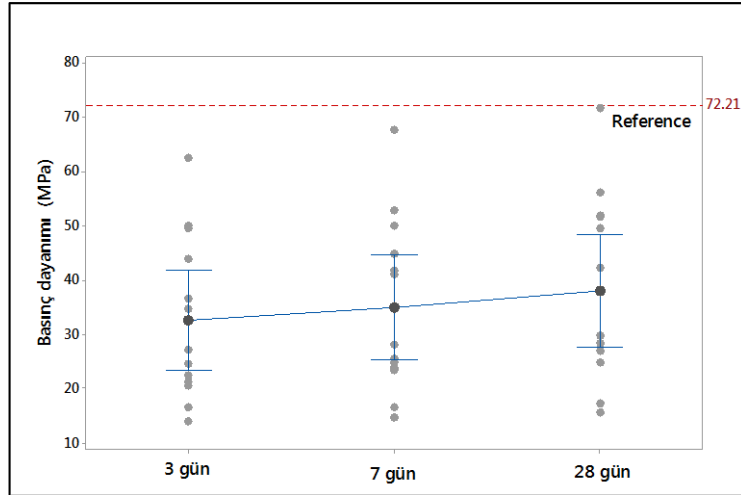
Karşım	3 günlük basınç dayanım (MPa)	7 günlük basınç dayanımı (MPa)	28 günlük basınç dayanımı (MPa)
REF	62.54	67.71	71.79
A1	43.85	44.78	49.61
A2	34.84	41.14	42.33
A3	24.68	24.94	27.03
B1	50.16	52.87	56.18
B2	27.16	28.07	29.91
B3	13.91	14.77	15.64
C1	36.53	41.75	51.97
C2	22.52	23.99	28.39
C3	16.50	16.56	17.42
D1	49.66	50.05	51.68
D2	21.33	25.65	26.92
D3	20.63	23.35	24.97

Tablo 4.5 ve Şekil 4.25 incelendiğinde en iyi karışım değerlerinin, 3 günde ve 7 günde sırasıyla 50,16 MPa ve ise 52.87 Mpa dayanımlar ile B1 karışımında elde edilmiştir. Ayrıca 28 günde 56.18 MPa dayanım değerine yine aynı grupta (B1) ulaşılmıştır. Kullanılan AL oranına bağlı olarak referans grubuna göre yaklaşık 15-20 MPa arası dayanım kayıpları olmasına rağmen, artan kullanım oranlarındaki değişim her %5 lik AL kullanımında yaklaşık %50 oranında geopolimer beton basınç dayanımlarında azalmaya neden olduğu görülmüştür. Diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, (Park vd., (2016), çalışma, kırıntı kauçuğun dahil edilmesinin, basınç dayanımlarında ve sertliğinde bir azalmaya yol açtığını ve çimento harcının kırılma davranışını daha sünek bir şekilde geliştirdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca kumu kısmen kırıntı kauçuğu ile değiştirdikten sonra basınç dayanımını araştırmışlardır. Çalışmalar, ince agrega hacminin % 5,% 10,% 15 ve% 20 miktarının parça lastik ile değiştirilmesi ile gerçekleştirildiği çalışmadaki % 20'lik kullanımında basınç dayanımında % 31'e varan bir azalma olmuştur. Kritik parametreyi tanımlamak ve ince agreganın değiştirilmesinin etkisini bulmak için regresyon modelleri de önerilmiştir. Lastik muhtevastaki artışla basınç dayanımının azaldığı bulunmuştur (Wang ve Song, 2015). AL oranının % 10'dan fazla artması, kırıntı lastik parçacıkları üzerindeki NaOH ön işleminin davranışına karşı artan kırılma, AL'nin beton üzerindeki etkisine bağlı olarak basınç dayanımının azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.25. Geopolimer betonda basınç dayanımlarındaki değişim

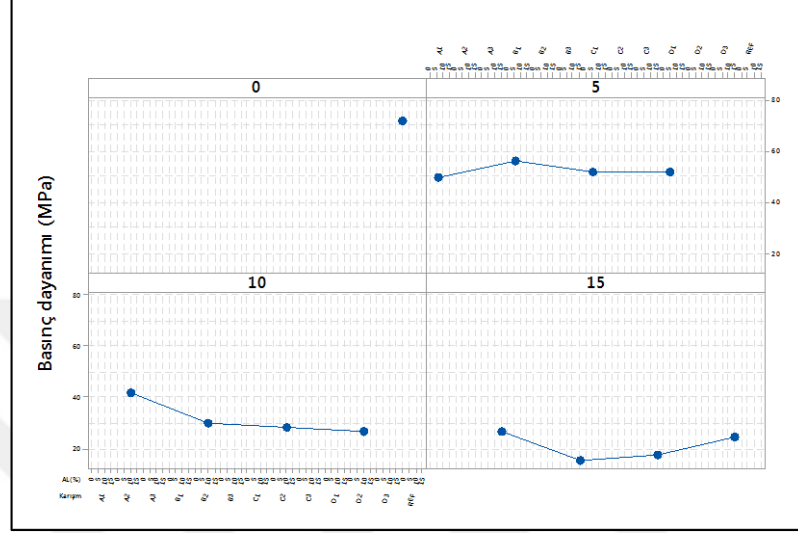
Geopolimer betonlarda AL kullanılması ile basınç dayanımlarındaki zamansal değişim Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde kür süresi arttıkça, basınç dayanımının arttığı, bu artış oranının %10-15 arasında olduğu görülmüştür. Bu durum geopolimer betonda AL kullanılmasından ziyade kür şartlarının etkisi ile ilk 3 günde betonların gerekli dayanımlarının yaklaşık %80-90'nın sağladıkları tespit edilmiştir.



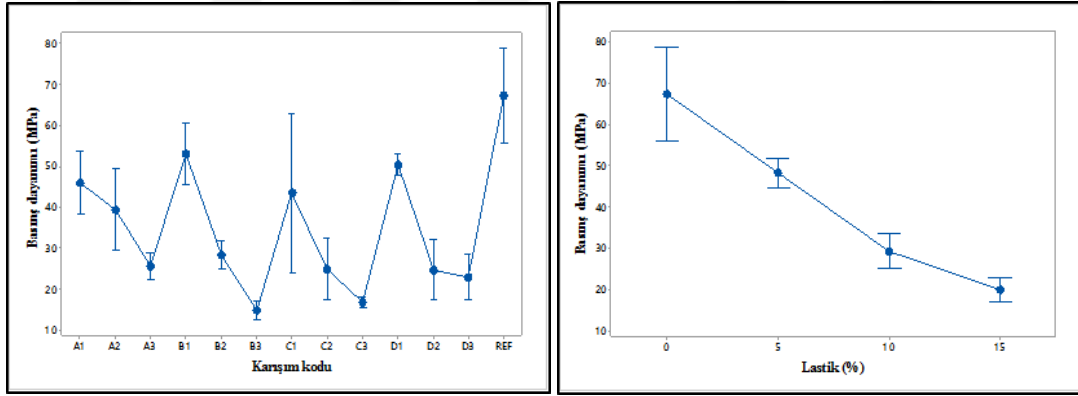
Şekil 4.26. Geopolimer betonlarda zamana göre basınç dayanımı değişimi

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28 incelendiğinde, AL miktarının kullanımının artmasına karşılık betonun basınç dayanımının kademeli olarak azalttığı görülmüştür. Bu durum, lastik kırıntı içeriği arttıkça dayanım azalmasının, geopolimer harç ve lastik kırıntı

arasındaki bağ eksikliğinden kaynaklanmasıyla açıklanmıştır. Ayrıca kırıntı lastik ile karışım arasında bağlanma eksikliği olan ve uygulanan yükün yönüne dik yüksek iç gerilmeye yol açan geopolimer beton karışımındaki gözeneklilik veya zayıf noktalarının artmasıdır.

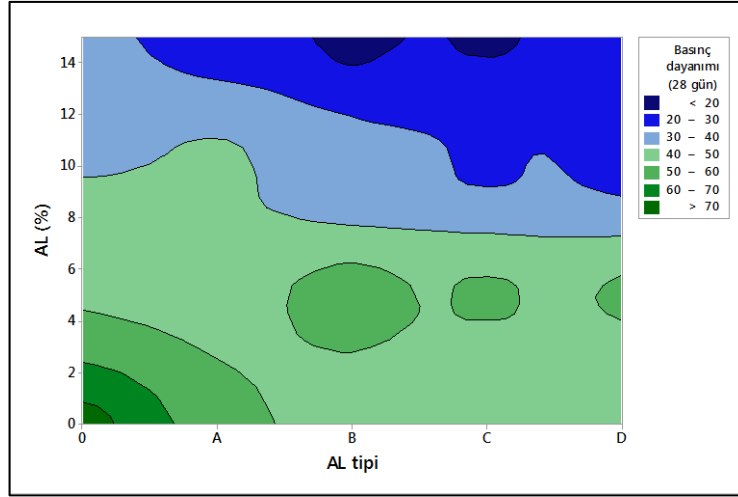


Şekil 4.27. Geopolimerin basınç dayanımı ile AL oranları arasındaki ilişki



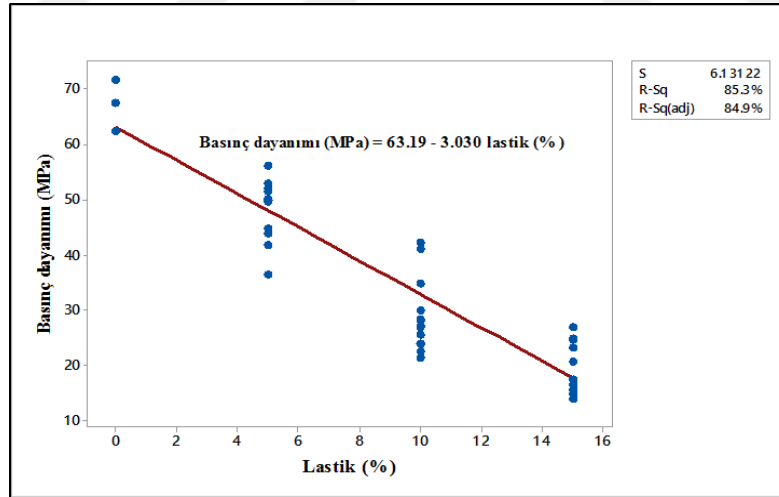
Şekil 4.28. Geopolimerlerde AL katkısına göre basınç dayanımı değişimi

Bu kontuar grafiği (Şekil 4.29) incelendiğinde, geopolimer betonun AL tipinin ve oranının betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisini göstermekte olup, su emme oranı ve porozitede belirlenen %8 oranında AL kullanılması durumunda 40-50 MPa arası basınç dayanımlarının elde edilebileceği tespit edilmiştir. Ancak daha yüksek dayanımların elde edilebilmesi için kullanılacak AL tipinin ve oranının sırasıyla A tipi ve %4-5 oranını geçmemek suretiyle sağlanabileceği belirlenmiştir.



Şekil 4.29. AL tipi ve oranına bağlı basınç dayanımı tahmini

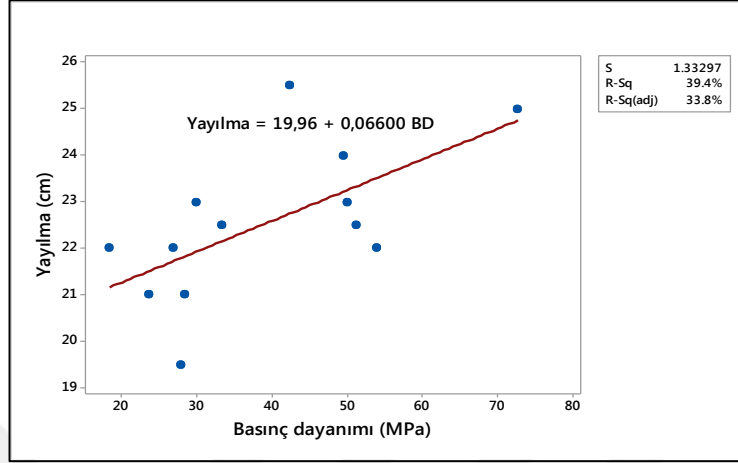
İstatiksel olarak geopolimer beton ile AL oranı arasındaki regresyonel ilişki incelendiğinde (Şekil 4.30), artan AL kullanım oranına bağlı olarak $R^2 = 83,5$ değeri ile “basınç dayanımı = $63,19 - 3,03.AL$ ” ile yüksek önem seviyesinde etkili bir parametre olduğu belirlenmiş olup, bu durum AL kullanımı ile basınç dayanımındaki beklenen düşüş ile ilişkisi teyit edilmiştir.



Şekil 4.30. Geopolimer betonun basınç dayanımı ve AL oranı arasındaki ilişki

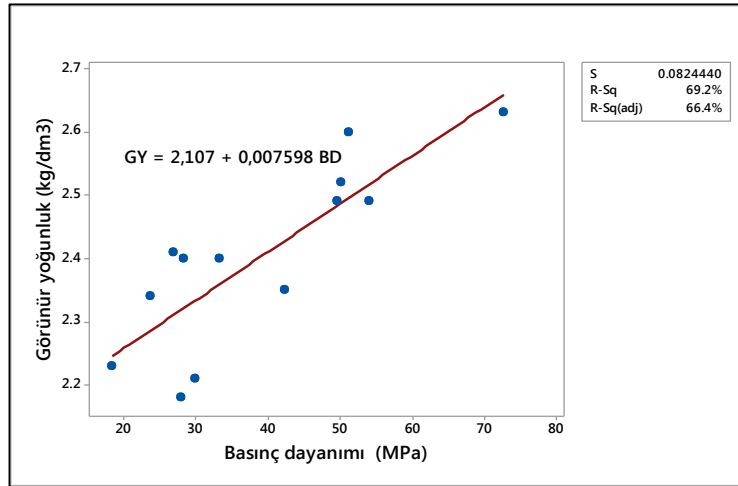
Şekil 4.31'de, yayılma çapı ile basınç dayanımı arasındaki regresyonel ilişki verilmiş olup, artan yayılma çapına karşılık dayanımlarda da artış olduğu görülmüştür. Bu durumun daha akışkan bir karışım sayesinde daha dolu bir geopolimer beton elde edilmesinden kaynaklanması olarak yorumlanmıştır. Ayrıca istatiksel ilişkisi

incelendiğinde, yayılma akışının $R^2 = \% 39.4$ ve “yayılma = $19.96 + 0.066 \cdot \text{basınç dayanımı}$ ” ili zayıf bir ilişki tespit edilmiştir.



Şekil 4.31. Geopolimer betonun yayılma çapı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

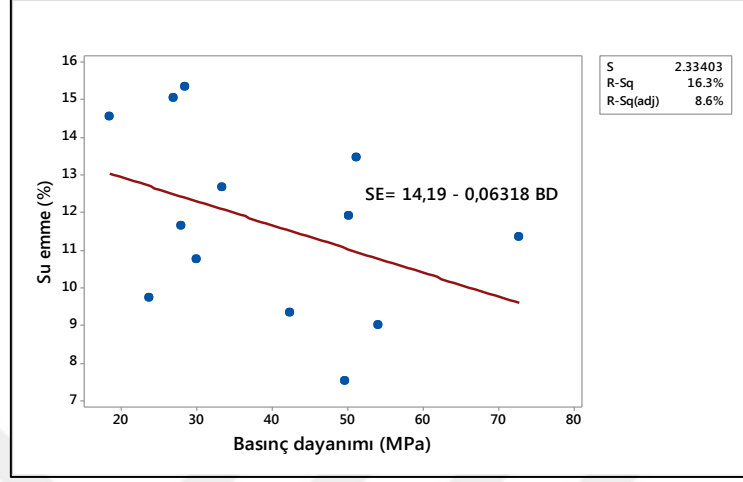
Görünür yoğunluğun basınç dayanımı ile analizi Şekil 4.32’de verilmiştir. Şekil 4.33 incelendiğinde, görünür yoğunluk arttıkça basınç dayanımının pozitif bir eğimle yukarı yönlü bir artışı tespit edilmiştir. Görünür yoğunluk ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin $R^2 = \% 69.2$ değeri ve “Görünür yoğunluk = $2,107 + 0,007598 \cdot \text{basınç dayanımı}$ ” ile bir ilişkisinin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.32. Görünür yoğunluk ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

Şekil 4.33 ise su emme oranı ile basınç dayanımı arasındaki regreasyonel ilişki verilmiştir. Şekil 4.34 incelendiğinde basınç dayanımının azalan değeri ile su emme oranının ortalama %13 seviyelerine kadar arttığı görülmüştür. $R^2 = \% 16.3$ değeri ve

“su emme oranı = 14,19 - 0.06318. basınç dayanımı” ile düşük bir istatistiksel ilişki içerisinde oldukları da belirlenmiştir.



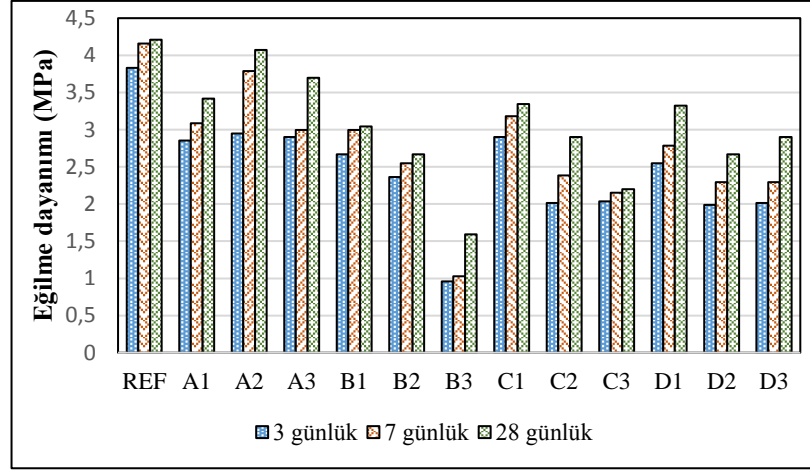
Şekil 4.33. Geopolimer betonun su emme oranı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

4.6. Eğilme Dayanımı Testi

Geopolimer karışımlarının buharla sertleştirilen ve atık malzemenin oranının geopolimer harçların eğilme dayanımı değerleri Tablo 4.6, Şekil 4.36 ve Şekil 4.34’te verilmiştir.

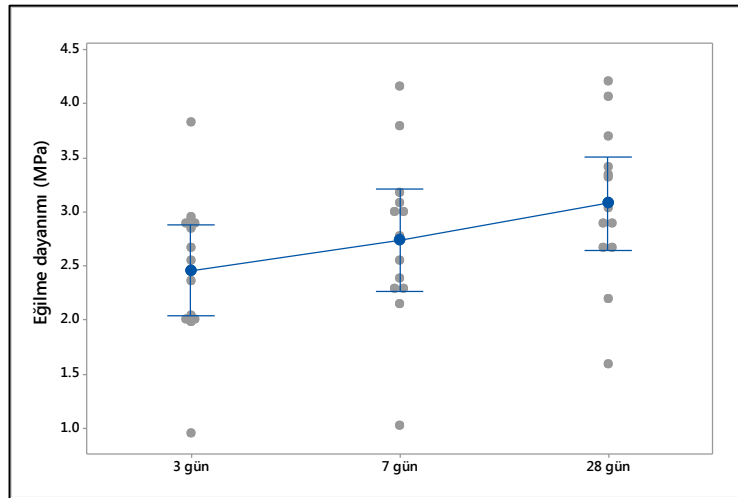
Tablo 4.6. Geopolimer betonların eğilme dayanım değerleri

Karışım no.	Eğilme dayanımı (MP)		
	3 günlük	7 günlük	28 günlük
REF	3.83	4.16	4.21
A1	2.85	3.09	3.42
A2	2.95	3.79	4.07
A3	2.90	3.00	3.70
B1	2.67	3.00	3.04
B2	2.36	2.55	2.67
B3	0.96	1.03	1.59
C1	2.90	3.18	3.35
C2	2.01	2.39	2.90
C3	2.04	2.15	2.20
D1	2.55	2.78	3.32
D2	1.99	2.29	2.67
D3	2.01	2.29	2.90



Şekil 4.34. Geopolimer betonda eğilme dayanımlarındaki değişim

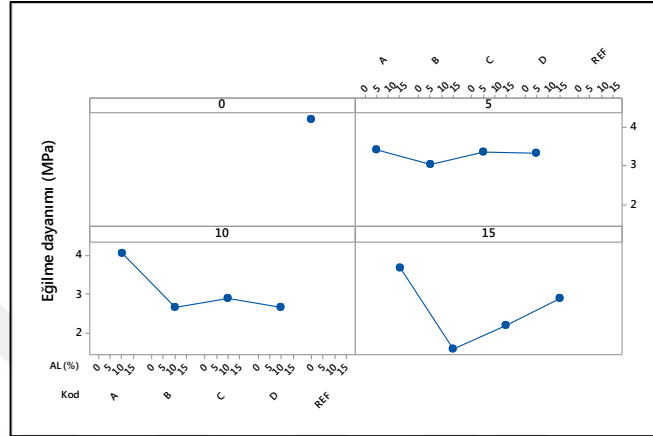
Tablo 4.6, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35 incelendiğinde 0-1 mm boyutlara sahip A tipi AL dışında tüm gruplarda eğilme dayanımlarının maksimum oranların %5 AL kullanılmasında elde edildiği, ancak 0-1 mm (A tipi) %10 ince AL kullanımında maksimum eğilme dayanımı değerinin elde edildiği görülmüştür. En küçük eğilme dayanımı ise 1,59 MPa ile B3 gurubunda ve %15 AL kullanılmasıyla elde edilmiştir. Ancak istatistiksel ortalamalara bağlı olarak zamansal değişimlerde basınç dayanımlarına benzer olarak ilk 3 günde nihai eğilme dayanımlarının %80-90'nın sağladıkları da belirlenmiştir.



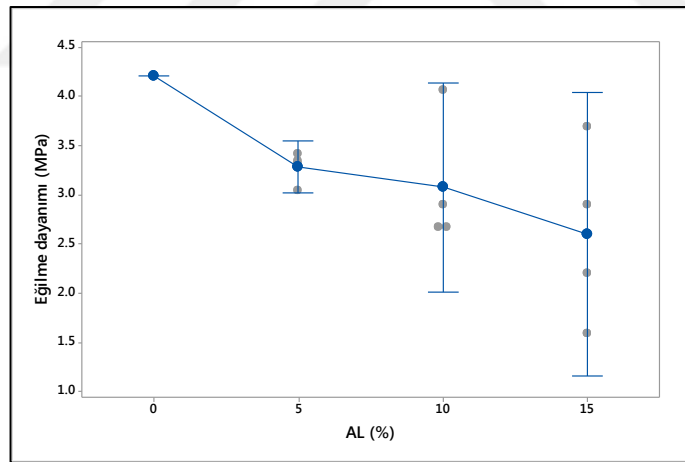
Şekil 4.35. Geopolimer betonlarda zamana göre basınç dayanımı değişimi

Elde edilen sonuçlarda gösterildiği üzere (Şekil 4.36. Şekil 4.37. Şekil 4.38) AL miktarını artması betonun eğilme dayanımı kademeli olarak azaltmaktadır. Bunun

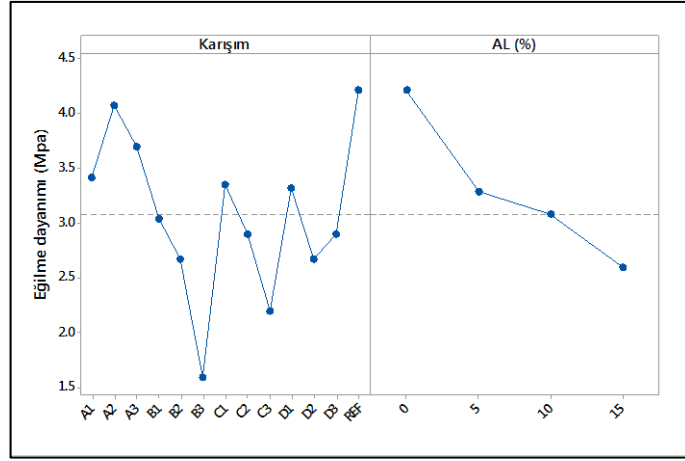
nedeni, kırıntı lastik ve karışımı arasında bağlanma eksikliği olan ve uygulanan yükün yönüne dik olan yüksek iç gerilime yol açan geopolimer beton karışımındaki gözeneklilik veya zayıf noktalarının artmasıdır. Bu durum ayrıca AL tozu miktarının eğilme dayanımı üzerinde olumsuz bir etkisi olduğunu göstermiştir. Eğilme dayanımı en düşük değeri ise AL % 15 kullanılmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 4.36. AL yüzdesi ile AL tipinin eğilme dayanımı ile ilişkisi

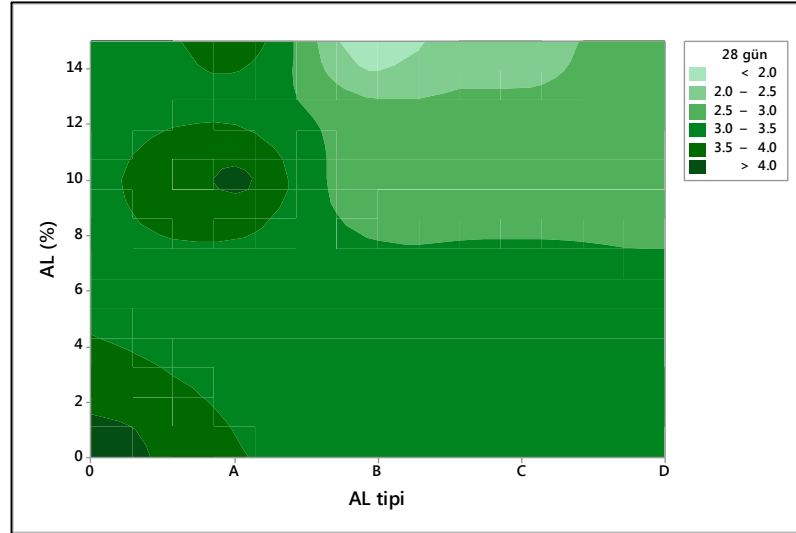


Şekil 4.37. Eğilme dayanımı ve AL oranının göre değişimi



Şekil 4.38. Eğilme dayanımı ile AL arasındaki ilişki

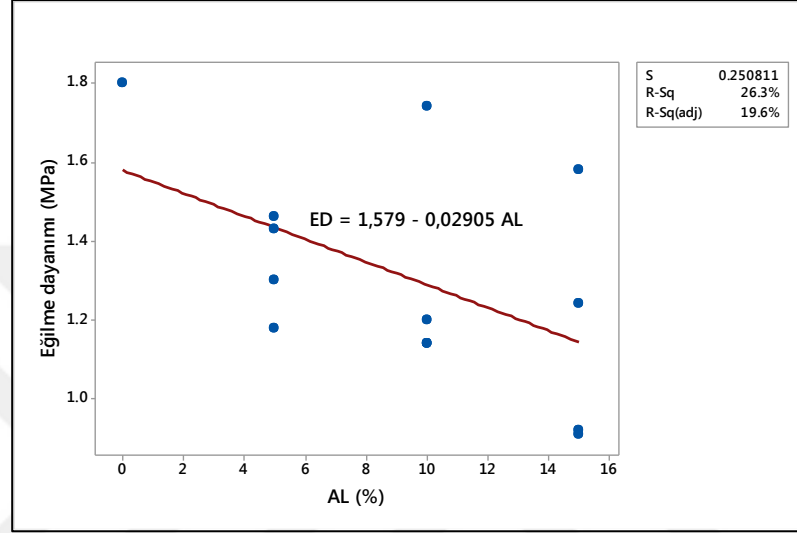
Eğilme dayanımlarının belirlenmesinde kullanılabilen kontuar grafik (Şekil 4.39), incelendiğinde, geopolimer betonun AL tipinin 0-1 mm arası olan A tipi kullanılması ya da tüm lastik tiplerinde ise %8 AL oranını geçmeyecek şekilde kullanılması ile mümkündür. Ancak Şekil 4.41 AL kullanımında farklı tipte ve oranda AL kullanılmasında değişken sonuçların elde edilebileceği, bu durumda geopolimer beton üretiminin gerekli özen gösterilmesi gereken bir malzeme olduğunun bir göstergesi olarak görülmüştür.



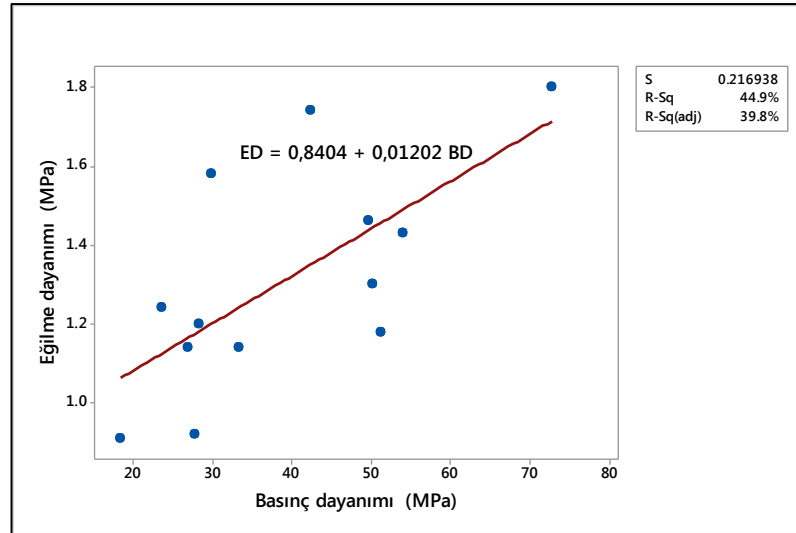
Şekil 4.39. Geopolimer betonun eğilme dayanımı ve AL arasındaki ilişki

Geopolimer betonların eğilme dayanımlarının regreyonel olarak AL oranıyla olan ilişkisi Şekil 4.42'de, basınç dayanımı ile olan ilişkisi Şekil 4.43 de gösterilmiştir.

Şekil 4.40 incelendiğinde lastik yüzdesi arttıkça eğilme dayanımı değerinin azaldığı, istatistiksel olarak “eğilme dayanımı = 1.579 - 0.02905 AL” eşitliği $R^2 = \% 26.3$ değeri ile düşük bir ilişkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu ilişki basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında (Şekil 4.43) artan eğilme dayanımına paralel olarak basınç dayanımının da arttığı belirlenmiştir.



Şekil 4.40. Geopolimer betonun eğilme dayanımı ve AL oranı arasındaki ilişki



Şekil 4 .41. Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

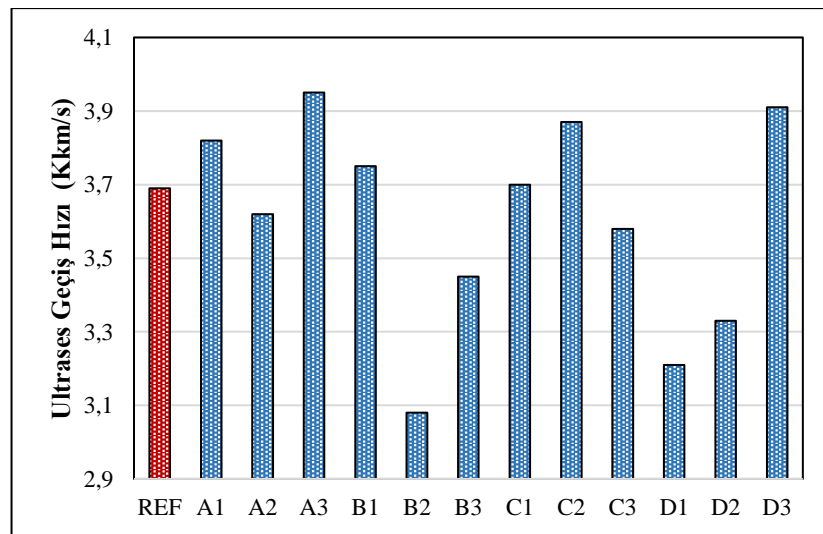
Şekil 4.41'de eğilme dayanımı dayanımı ve basınç arasındaki ilişki “eğilme dayanımı = 0.8404 +0.01202 basınç dayanımı), $R^2 = \% 44,9$ ile istatistiksel olarak düşük bir ilişki belirlenmiştir.

4.7. Ultrases Geçiş Hızı (UPV) Testi

Geopolimer karışımların ultrases geçiş hızı (UPV) testi sonuçları Tablo 4.7 ve Şekil 4.44'de gösterilmiştir. Tablo 4.7 ve Şekil 4.42 incelendiğinde geopolimer karışımların UPV değerleri Tablo 4.8 ile karşılaştırılmış ve AL boyut olarak daha büyük kullanılan gruplarda bünyesindeki boşluklar nedeniyle orta beton kalitesinde numuneler olduğu ancak diğer grupların ise kalite olarak iyi seviyede numuneler olduğu belirlenmiştir. Geopolimer betonlarda A3 karışımı için maksimum hız 3.95 km/s ve en düşük değer B5 karışımı için 3.08 km/s olarak ölçülmüştür.

Tablo 4.7. Geopolimer betonda UPV değişimleri

Karışım	UPV	Beton kalitesi
REF	3.69	İyi
A1	3.82	İyi
A2	3.62	İyi
A3	3.95	İyi
B1	3.75	İyi
B2	3.08	İyi
B3	3.45	Orta
C1	3.70	İyi
C2	3.87	İyi
C3	3.58	İyi
D1	3.21	Orta
D2	3.33	Orta
D3	3.91	İyi

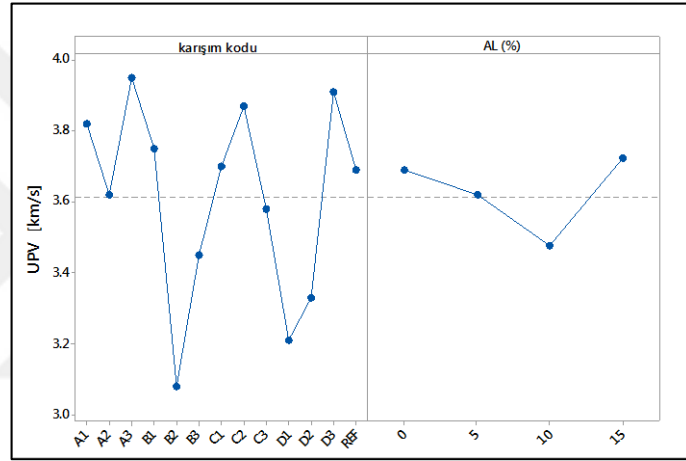


Şekil 4.42. Geopolimer betonda UPV değişimleri

Tablo 4.8. Beton kalitesinin sınıflandırılması (Erdoğan vd., 2017)

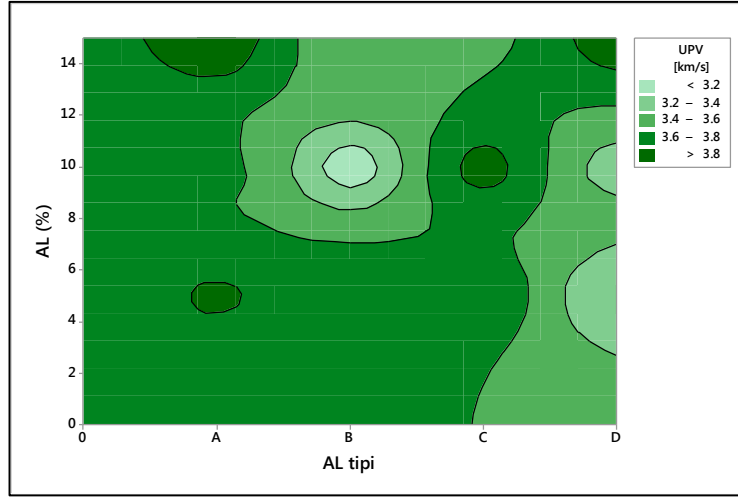
UPV [km/s]	Beton kalitesi
4.5 üzeri	Pekiyi
3.5 - 4.5 arası	İyi
3 - 3.5 arası	Orta
3 altı	Geçer

Şekil 4.43 geopolimer betonlarda UPV ile AL miktarı arasındaki ilişki incelenmiştir. Geopolimer betonlarda AL miktarına bağlı olarak artan atık kullanımıyla UPV değerlerinde azalma görülmüştür. Ultrases geçiş hızındaki bu azalma, AL katılmış betonlarda daha yüksek gözenekliliğe bağlıdır.

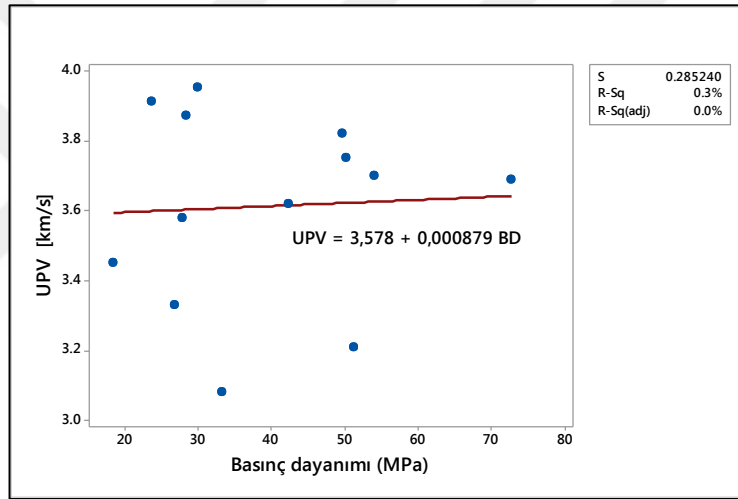


Şekil 4.43. Geopolimerin UPV ile AL arasındaki ilişki

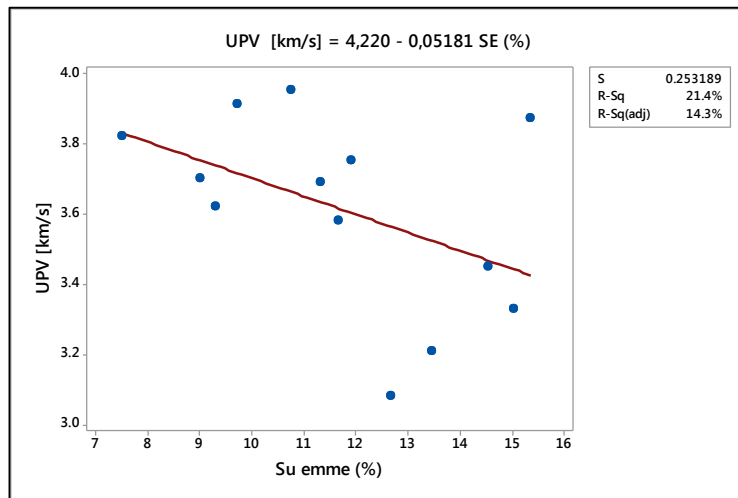
Kontuar grafik (Şekil 4.44), geopolimer betonda AL tipinin ve oranının ses geçiş hızları üzerindeki etkisi incelendiğinde, UPV açısından iyi kalitede betonların elde edilebilmesi için 0-2 mm boyutlarındaki AL kullanımında %8'i geçmeyen oranlarda kullanımında veya 0-1 mm kullanılması durumunda ise oran aranmaksızın elde edilebileceği belirlenmiştir. Ancak 2-4 mm boyutlarında AL kullanımı için yapısında boşluk olması sebebiyle orta kalitede betonlar elde edilebileceği tespit edilmiştir.



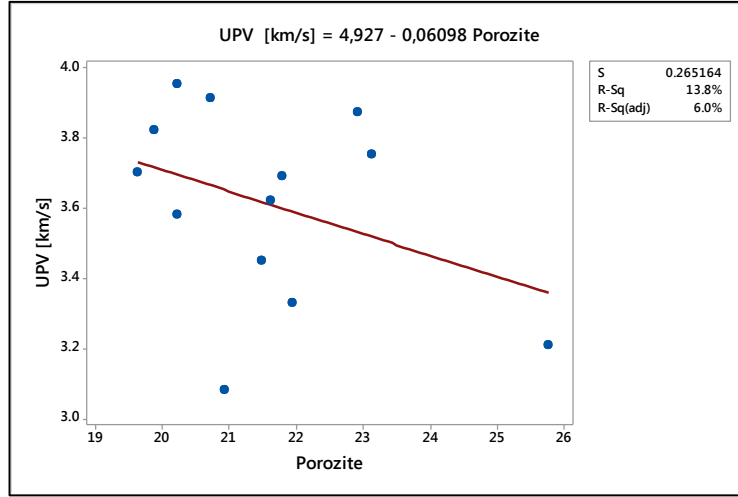
Şekil 4.44. AL tipi ve oranına bağlı UPV tahmini



Şekil 4.45. UPV ve basınç dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 4.46. UPV ve porozite arasındaki ilişki



Şekil 4.47. UPV ve su emme oranı arasındaki ilişkisi

İstatiksel açıdan regreasyonel ilişkiler incelendiğinde, UPV ile basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 4.45'te, UPV ile porozite arasındaki ilişki Şekil 4.46'da ve UPV ile su emme oranı arasındaki ilişki Şekil 4.47'de verilmiştir.

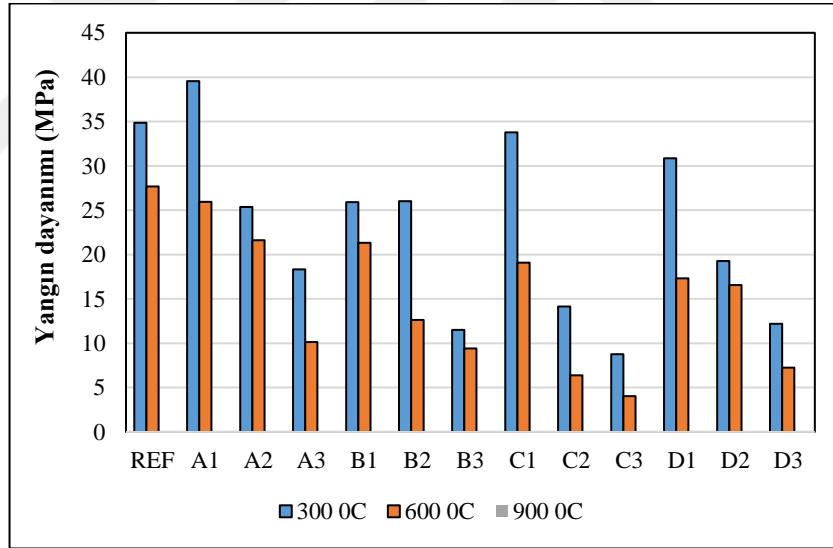
UPV ve basınç dayanımı arasındaki ilişki olan Şekil 4.45 incelendiğinde; istatistiksel açıdan zayıf bir ilişki ile artan dayanıma bağlı olarak UPV değerlerinde arttığı görülmüştür. UPV ile porozite (Şekil 4.46) ve su emme oranı (Şekil 4.47) incelendiğinde artan UPV değerlerine karşılık hem porozite hem de su emme oranı arasında istatistiksel açıdan zayıf ancak basınç dayanımına göre daha kuvvetli bir ilişki tespit edilmiştir.

4.8. Yüksek Sıcaklık Etkisi Testi

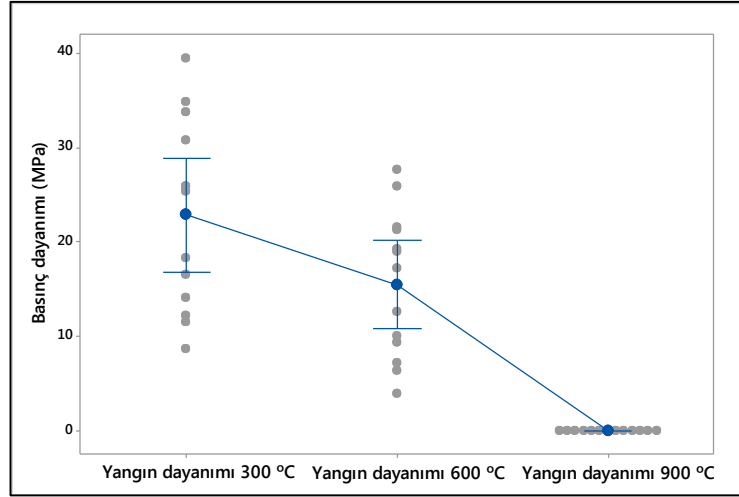
AL katkılı geopolimer betonlar bir saat süreyle 300 °C, 600 °C ve 900 °C'lik yükseltilmiş sıcaklığa tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar Tablo 4.9'da değişimler ise Şekil 4.48 ve Şekil 4.49'de verilmiştir.

Tablo 4.9. Farklı sıcaklıklarda geopolimer betonun basınç dayanımı değerleri

Karışım	Dayanım (MPa) 300 °C	Dayanım (MPa) 600 °C	Dayanım (MPa) 900 °C
REF	34.86	27.68	0
A1	39.56	25.93	0
A2	25.35	21.60	0
A3	18.32	10.14	0
B1	25.92	21.33	0
B2	26,00	12.61	0
B3	11.52	9.43	0
C1	33.76	19.10	0
C2	14.14	6.37	0
C3	8.76	4.03	0
D1	30.86	17.33	0
D2	19.28	16.55	0
D3	12.21	7.24	0



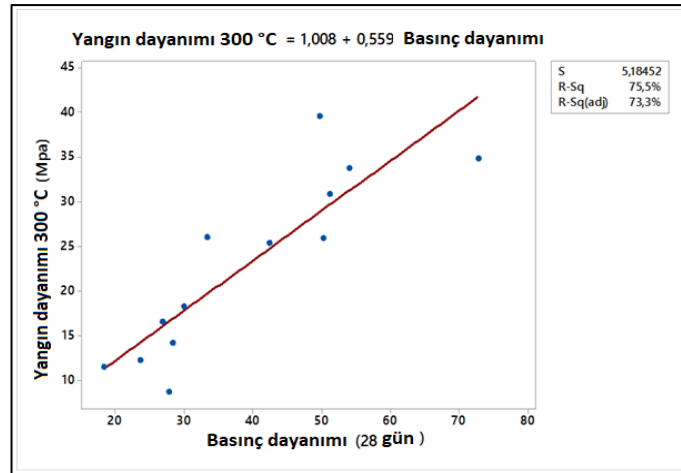
Şekil 4.48. Yüksek sıcaklıklarda geopolimer beton basınç dayanımları



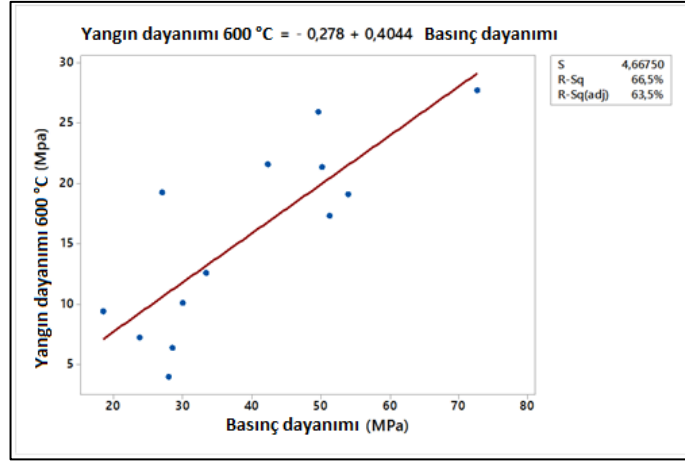
Şekil 4.49. Geopolimer betonda yüksek sıcaklık sonrası dayanıma etkisi

Tablo 4.9, Şekil 4.48 ve Şekil 4.49 incelendiğinde AL kullanılması ile üretilen geopolimer betonların 300 °C'de yüksek sıcaklık etkisi ile %50 nin üzerinde dayanım kaybı yaşadığı, benzer şekilde artan sıcaklık ile dayanımların ortalama 20 MPa dayanımlara düştüğü görülmüştür. Ancak geopolimer betonlarda 900 °C'deki yüksek sıcaklıkta hem geopolimer betondan hem de içerdiği AL katkılarından dolayı dayanım değerleri betonda oluşan hasarlar nedeniyle ölçülememiştir.

Şekil 4.50 ve Şekil 4.51 incelendiğinde yüksek sıcaklığın etkilerinin basınç dayanımı ile olan ilişkileri incelendiğinde istatistiksel olarak 300 °C sıcaklıkta $R^2= 75.5$ ve 600 °C sıcaklıkta da $R^2= 66.5$ değerleri ile yüksek bir ilişki tespit edilmiştir.



Şekil 4.50. 300 °C'de geopolimer betonun basınç dayanımındaki değişim



Şekil 4.51. 600 °C’de geopolimer betonun basınç dayanımındaki değişim

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışma, geopolimer betonda AL kullanılmasının yayılma çapı, yoğunluk, su emme oranı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı (UPV) ve yüksek sıcaklık etkisinin araştırıldığı bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar kısaca aşağıda veilmiştir:

- Geopolimer betonda atık lastik kullanılmasının betonun yayılma çapına bağlı olarak akışkanlığını arttırmaktadır.
- Sahip olduğu düşük yoğunluk nedeniyle geopolimer betonlarında AL kullanılması yoğunluklarında azalmaya neden olmaktadır.
- Geopolimer betonlarda AL kullanılmasında ideal lastik tipinin bu çalışmada da kullanılan adıyla A veya B tipi (0-2 mm arası) ve % 8'i geçmeyen oranlarda kullanılmalıdır.
- Geopolimer betonlarda AL kullanılmasında yüksek oranda poroziteye sahip numuneler elde edilmesi nedeniyle, kullanımında özel önlemler gerekmektedir.
- Geopolimer betonda AL kullanımı ile taşıyıcı beton için gerekli dayanıma (40-50 MPa) ve yüksek kompasiteye sahip geopolimer betonların üretilebileceği görülmüştür.
- Yüksek sıcaklık etkisinde kalan ve ideal AL kullanılan geopolimerlerin 600 °C'ye kadar sıcaklığa maruz kalınmasında dayanımlarının 20 MPa seviyelerinde kalabileceği görülmüştür.

5.2. Öneriler

Geopolimer betonlarda AL etkisinin araştırıldığı bu çalışmada ayrıca aşağıda verilen hususlarda dikkate alınması fayda sağlayacaktır.

- Kullanılan malzeme oranları arası farkın azaltılarak optimum oranın daha hassas araştırılması,

- Çalışmada ayrıca yüksek fırın cürufuna ilave olarak silis dumanı, uçucu kül, pirinç kabuğu külü, metakaolin gibi farklı malzemelerinde 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 AL parçalarına ilave olarak çalışmalarda da geçen AL külünün ve bu külün farklı incelik seviyelerinde öğütülerek kullanılmasında geopolimer malzemeye etkisi
- Bu çalışma ile geopolimer betonların özelliklerinin belirlenmesinde yapılan deneyler dışındaki deneyler (permeabilite, SEM gibi) ile malzeme özellikleri daha detaylı araştırılmalıdır. Ayrıca geopolimer betonların büzülme, sünme, basma gerilmelerinde gerilme-çekme ve gerilme deformasyon değişimi gibi mekaniksel özellikleride incelenmelidir.
- AL katkılı geopolimerlerde polipropilen lif, karbon lifi ve GFRC cam lifi gibi farklı boyut ve tipteki liflerin beton üretiminde kullanımı araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- ASTM C642-97 (1997), American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete
- ASTM C30, (1978) American Society for Testing and Materials, method of test for voids in aggregate for concrete
- ASTM., (2002b). American Society for Testing and Materials “Standard test method for pulse velocity through concrete.” Annual book of American Society of Testing and Materials, ASTM C 597–02, Vol. 04–02, West Conshohocken, Pa.
- ASTM E2748 - 12a (2017), American Society for Testing and Materials “Standard Guide for Fire-Resistance Experiments”
- Albitar, M., Ali, M. M., Visintin, P. & Drechsler, M., (2015). Effect of granulated lead smelter slag on strength of fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 83, 128-135.
- Aly, A. M., El-Feky, M. S., Kohail, M. & Nasr, E. S. A., (2019). Performance of geopolymer concrete containing recycled rubber. *Construction and Building Materials*, 207, 136-144.
- Azmi, A. A., Abdullah, M. M. A. B., Ghazali, C. M. R., Sandu, A. V. & Hussin, K., (2016). Effect of crumb rubber on compressive strength of fly ash based geopolymer concrete. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 78, p. 01063). EDP Sciences.
- Aly, A. M. et al., (2019) ‘Performance of geopolymer concrete containing recycled rubber’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 207, pp. 136–144. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.121.
- Azmi, A. A. et al., (2016) ‘Effect of Crumb Rubber on Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymer Concrete’, *MATEC Web of Conferences*, 78, pp. 4–8. doi: 10.1051/mateconf/20167801063.
- Barbosa, V. F. F., MacKenzie, K. J. D. & Thaumaturgo, C., (2000) ‘Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: Sodium polysialate polymers’, *International Journal of Inorganic Materials*, 2(4), pp. 309–317. doi: 10.1016/S1466-6049(00)00041-6.
- Benazzouk, A. et al., (2007) ‘Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes’, *Cement and Concrete Composites*, 29(10), pp. 732–740. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.07.001.
- Bhowmick, A. & Ghosh, S., (2012) ‘Effect of synthesizing parameters on workability and compressive strength of Fly ash based Geopolymer mortar’, *International Journal of Structural and Civil Engineering*, 3(1), pp. 168–177. doi: 10.6088/ijcser.201203013016.

- Bravo, M. & De Brito, J., (2012) 'Concrete made with used tyre aggregate: Durability-related performance', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 25, pp. 42–50. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.11.066.
- Davidovits, J., (2015) *Geopolymer Chemistry & Applications, Geopolymer Chemistry and Applications 4th edition*.
- ERDOĞDU, Ş. et al., (2017) 'Ultrasonic Pulse Velocity and Compressive Strength Evaluation of Concrete Containing Fly Ash Exposed to High Temperatures', *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, pp. 314–325. doi: 10.17100/nevbiltek.322416.
- Fernández-Jiménez, A. & Palomo, A., (2003) 'Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements', *Fuel*, 82(18), pp. 2259–2265. doi: 10.1016/S0016-2361(03)00194-7.
- Flores-Medina & Herna'ndez-Olivare, F., (2014) 'Static mechanical properties of waste rests of recycled rubber and high quality recycled rubber from crumbed tyres used as aggregate in dry consistency concretes', *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 47(7), pp. 1185–1193. doi: 10.1617/s11527-013-0121-6.
- Ganjian, E., Khorami, M. & Maghsoudi, A. A., (2009) 'Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 23(5), pp. 1828–1836. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.020.
- Gök, S. G. & Kılınç, K., (2017) 'Mechanical Properties of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Alkali Activated Concrete', *Kirklareli University Journal of Engineering and Science*, 3(2), pp. 123–131. Available at: <http://dergipark.gov.tr/klujes/issue/33639/339981>.
- Gourley, J. T., (2014) 'Geopolymers in Australia', *Journal of the Australian Ceramic Society*, 50(1), pp. 102–110.
- Gupta, T., Sharma, R. K. & Chaudhary, S., (2015) 'Impact resistance of concrete containing waste rubber fiber and silica fume', *International Journal of Impact Engineering*. Elsevier Ltd, 83, pp. 76–87. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2015.05.002.
- Hadi, M. N. S., Farhan, N. A. & Sheikh, M. N., (2017) 'Design of geopolymer concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method', *Construction and Building Materials*, 140, pp. 424–431. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.131.
- Hernández-Olivares, F. et al., (2002) 'Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete', *Cement and Concrete Research*, 32(10), pp. 1587–1596. doi: 10.1016/S0008-8846(02)00833-5.
- Humad, A. M. et al., (2019) 'The effect of blast furnace slag/fly ash ratio on setting, strength, and shrinkage of alkali-activated pastes and concretes', *Frontiers in Materials*, 6(February), pp. 1–10. doi: 10.3389/fmats.2019.00009.

- Issa, C. A. & Salem, G., (2013) 'Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design', *Construction and Building Materials*, 42, pp. 48–52. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.054.
- Jaydeep, S. & Chakravarthy, B. J., (2013) 'Study On Fly Ash Based Geo-Polymer Concrete Using Admixtures', *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 4(10), pp. 4614–4617. Available at: <http://www.ijettjournal.org>.
- Khaloo, A. R., Dehestani, M. & Rahmatabadi, P., (2008) 'Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles', *Waste Management*. Elsevier Ltd, 28(12), pp. 2472–2482. doi: 10.1016/j.wasman.2008.01.015.
- Koumoto, T., (2019) 'Production of high compressive strength geopolymers considering fly ash or slag chemical composition', *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(8), pp. 1–6. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002788.
- Li, Z. & Liu, S., (2007) 'Influence of slag as additive on compressive strength of fly ash-based geopolymer', *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(6), pp. 470–474. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:6(470).
- Luhar, S., Chaudhary, P. S. & Luhar, I., (2018) 'Influence of Steel Crystal Powder on Performance of Recycled Aggregate Concrete', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 431(10). doi: 10.1088/1757-899X/431/10/102003.
- Luhar, S., Chaudhary, S. & Luhar, I., (2018) 'Thermal resistance of fly ash based rubberized geopolymer concrete', *Journal of Building Engineering*. Elsevier Ltd, 19, pp. 420–428. doi: 10.1016/j.jobee.2018.05.025.
- Luhar, S., Chaudhary, S. & Luhar, I., (2019) 'Development of rubberized geopolymer concrete: Strength and durability studies', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 204, pp. 740–753. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.185.
- Luhar, S. & Gourav, S., (2016) 'A Review on Self Healing Concrete', *International Conference on Advanced Material Techniques (ICAMT) - 2016*, 5(3), pp. 53–58. doi: 10.5923/j.jce.20150503.01.
- Luhar, S & Khandelwal, U., (2015) 'A Study on Water Absorption and Sorptivity of Geopolymer Concrete', *SSRG International Journal of Civil Engineering*, 2(8), p. 10.
- Luhar, Salmabanu & Khandelwal, U., (2015) 'Compressive Strength of Translucent Concrete', *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, 8(2), pp. 52–54. Available at: <http://www.ijeset.com/media/3N23-IJES0802105-V8-I2-PP52-54.pdf>.
- Luhar, S. & Khandelwal, U., (2016) 'Durability studies of fly ash and GGBFS based geopolymer concrete at ambient temperature', *Multi-disciplinary Sustainable*

Engineering: Current and Future Trends, 5(8), pp. 93–97. doi: 10.1201/b20013-15.

- McMahon, L. J., (1999) ‘The Feasibility of Using Recycled Rubber Tires in the Production of Asphalt in Alaska presented to the faculty of Alaska Pacific University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Arts by’.
- 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*. Elsevier B.V., 205, pp. 49–57. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.313.
- Meyer, C., (2009) ‘The greening of the concrete industry’, *Cement and Concrete Composites*. Elsevier Ltd, 31(8), pp. 601–605. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010.
- Mohammadi, I. & Khabbaz, H., (2013) ‘Challenges associated with optimisation of blending, mixing and compaction temperatures for asphalt mixture modified with crumb rubber modifier (CRM)’, *Applied Mechanics and Materials*, 256–259(PART 1), pp. 1837–1844. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.256-259.1837.
- Mohammed, B. S. et al., (2018) ‘Development of rubberized geopolymer interlocking bricks’, *Case Studies in Construction Materials*. Elsevier, 8(March), pp. 401–408. doi: 10.1016/j.cscm.2018.03.007.
- Pacheco-Torgal, F., Ding, Y. & Jalali, S., (2012) ‘Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 30, pp. 714–724. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.047.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W. & Blanco, M. T., (1999) ‘Alkali-activated fly ashes: A cement for the future’, *Cement and Concrete Research*, 29(8), pp. 1323–1329. doi: 10.1016/S0008-8846(98)00243-9.
- Pandya, J., Shah, S. & Dave, S., (2018) ‘Feasibility of Utilization of Industrial Polyurethane (PU) Rubber Waste in Geopolymer Concrete.’, 1, pp. 285–278. doi: 10.29007/2xq2.
- Park, Y. et al., (2016) ‘Compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber partially replacing sand’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 118(2016), pp. 43–51. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.001.
- Qiu, J. et al., (2019) ‘Fly Ash/Blast Furnace Slag-Based Geopolymer as a Potential Binder for Mine Backfilling: Effect of Binder Type and Activator Concentration’, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019. doi: 10.1155/2019/2028109.

- Raghuraman, P. & Davidovits, P., (1978) 'Velocity slip of gas mixtures in free jet expansions', *Physics of Fluids*, 21(9), pp. 1485–1489. doi: 10.1063/1.862412.
- Rangan, B. V (2008) 'FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE', pp. 1–44. doi: 10.1007/s10853-006-0523-8.
- Richardson, A. et al., (2011) 'Freeze/thaw performance of concrete using granulated rubber crumb', *Journal of Green Building*, 6(1), pp. 83–92. doi: 10.3992/jgb.6.1.83.
- Shen, W. et al., (2013) 'Investigation on polymer-rubber aggregate modified porous concrete', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 38, pp. 667–674. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.006.
- Siddique, R. & Naik, T. R., (2004) 'Properties of concrete containing scrap-tire rubber - An overview', *Waste Management*, 24(6), pp. 563–569. doi: 10.1016/j.wasman.2004.01.006.
- Sofi, A., (2018) 'Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete – A review', *Ain Shams Engineering Journal*. Ain Shams University, 9(4), pp. 2691–2700. doi: 10.1016/j.asej.2017.08.007.
- Su, H. et al., (2015) 'Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 91, pp. 288–296. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.12.022.
- Taha, M. M. R., Asce, M. & El-wahab, M. A. A., (2009) 'Mechanical , Fracture , and Microstructural Investigations', 20(10), pp. 640–649.
- Thokchom, S., Ghosh, P. & Ghosh, S., (2010) 'Performance of fly ash based geopolymer mortars in sulphate solution', *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 3(1), pp. 36–40. doi: 10.25103/jestr.031.07.
- Thomas, B. S. & Chandra Gupta, R., (2016) 'Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 113, pp. 86–92. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.019.
- Thomas, B. S. & Gupta, R. C., (2015) 'Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 102, pp. 78–87. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.072.
- Thomas, B. S., Gupta, R. C. & Panicker, V. J., (2016) 'Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: Durability-related performance', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 112, pp. 504–513. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.046.
- Topçu, I. B. & Şengel, S., (2004) 'Properties of concretes produced with waste concrete aggregate', *Cement and Concrete Research*, 34(8), pp. 1307–1312. doi: 10.1016/j.cemconres.2003.12.019.

- Toutanji, H. A., (1996) 'The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates', *Cement and Concrete Composites*, 18(2), pp. 135–139. doi: 10.1016/0958-9465(95)00010-0.
- Xu, H. & Van Deventer, J. S. J., (2000) 'The geopolymerisation of alumino-silicate minerals', *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), pp. 247–266. doi: 10.1016/S0301-7516(99)00074-5.
- Youssfi, O., Mills, J. E. & Hassanli, R., (2016) 'Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 125, pp. 175–183. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.040.
- Yung, W. H., Yung, L. C. & Hua, L. H., (2013) 'A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*, 41, pp. 665–672. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.019.
- Zhang, M. H. & Malhotra, V. M., (1996) 'High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material', *ACI Materials Journal*, 93(6), pp. 629–636. doi: 10.14359/9870.

ÖZGEÇMİŞ

Adı, Soyadı : Abdussalam M. Hasan SARKAZ
Doğum Tarihi ve Yeri : 15.01.1981 Zawia-LİBYA
Medeni Durumu : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
Elektronik Posta : abdsalamsarkozee@gmail.com



Eğitim

Lise : Al-zawiya lisesi- LİBYA-1999
Lisans : Al-Zawiyah Yüksek Bilim ve Teknoloji Enstitüsü - İnşaat Mühendisliği - 2004

Yayınlar

Sarkaz, A.M.H, Memiş, S., Kaplan G. & Yaprak, H., (2019). Effect of Waste Tire Rubber and Fly Ash on Lightweight Geopolymer Concrete Production. ICELIS 2019, 1, 475-479.