



**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ADANA ALPARSLAN TÜRKER BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ELEKTRİKSEL KÜR UYGULANARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER
BETONUN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**HÜSAMETTİN ÜRÜNVEREN
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

ADANA 2022



**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ADANA ALPARSLAN TÜRKERŞ BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ELEKTRİKSEL KÜR UYGULANARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER
BETONUN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**HÜSAMETTİN ÜRÜNVEREN
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DANIŞMAN
PROF. DR. AHMET BEYÇİOĞLU**

ADANA, 2022

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak, bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmada;

Bu tezin özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin akademik kurallara ve etik davranışa uygun olarak elde edilerek sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, tez kapsamında bu kuralların ve davranışların gerektirdiği şekilde bu çalışmaya özgün olmayan tüm veri ve bilgiler için bilimsel etik ve gelenek çerçevesinde kaynak gösterdiğimi; bu kaynakları da kaynakçada belirttiğimi beyan ederim. Çalışmam ile ilgili yaptığım beyana aykırı bir durum saptanması halinde tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

29/12/2022

[İmza]

Hüsamettin ÜRÜNVEREN

ÖZET

ELEKTRİKSEL KÜR UYGULANARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER BETONUN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Hüsamettin ÜRÜNVEREN

Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU

Aralık 2022, 125 sayfa

Bu tez çalışmasında, elektriksel kür ile üretilen geopolimer betonların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Tez çalışması, harçlarda işlenebilirlik ve mekanik performans esaslı ön tasarım, göreceli karşılaştırma amacıyla nihai beton tasarımı ve enerji sarfiyatının belirlenmesi amacıyla karşılaştırmalı enerji tüketim değerlendirmesi şeklinde iki aşama deneysel ve bir aşama maliyet analizi içermektedir.

Çalışmanın birinci aşamasında, optimum ısıl kür sıcaklığını belirlemek amacıyla 45, 60, 80, 90, 100 ve 120 °C sıcaklıklarda ısıl kür ve uygulanabilir elektriksel kür parametrelerini belirlemek amacıyla 6, 12 ve 24 saat süreyle 10, 20, 25, 30, 35 ve 40 volt gerilim değerlerinde elektriksel kür sabit Ms modülü ve Na₂O konsantrasyonu sahip olan harç karışımlarına uygulanmıştır. Bu aşamada, Ms modülü 0,5'den 2,0'a kadar 0,25 ve 0,1 artış olacak şekilde parametrik artırılarak ve her bir Ms modülü için Na₂O içeriği alüminosilikat kaynağı olan toz malzemenin ağırlıkça %6 – 8 ve 10'u olacak şekilde 36 farklı harç karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan harçlardan en iyi işlenebilirlik ve basınç dayanımını veren 4 harç karışımı seçilmiş ve seçilen bu harçlara, ön deneylerde belirlenen 20, 25, 30 ve 35 volt gerilim ile elektriksel kür ve yine ön deneylerde belirlenen 60, 80, 100 ve 120 °C sıcaklık ile ısıl kür 6 ve 12 saat süreyle uygulanmıştır. Her iki kür yöntemi için yeterli düzeyde işlenebilirliği ve benzer basınç dayanımını sağlayan harçlar seçilmiş ve ikinci aşama deneylere geçilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise seçilen harçlara 100 °C ısıl kür ve 25 volt gerilimle elektriksel kür, her iki kür uygulamasında da 6 saat olacak şekilde uygulanmış ve beton numuneler üretilmiştir. Üretilen beton numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Son aşamada ise her iki kür yönteminin enerji sarfiyatları Avrupa, Amerika

ve Asya'dan farklı ülkelerin elektrik birim fiyatları dikkate alınarak maliyet açısından karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Sonuç olarak elektriksel kür uygulanarak hem geleneksel beton hem de ısıl kür ile üretilen geopolimer betonlara benzer fiziksel ve mekanik özelliklere sahip geopolimer betonların üretilmesinin mümkün olduğu görülmüştür. Ayrıca elektriksel kür ile üretilen geopolimer betonlarda, hem benzer kür ile üretilen normal betonlara göre daha düşük gerilim uygulamalarında bile yeterli düzeyde basınç dayanımları elde edilebilmesi hem de ısıl kür ile üretilen geopolimer betonlara göre de daha düşük bir enerji tüketiminin ortaya çıkması nedeniyle bu kür uygulaması geopolimer üretimi için çok daha enerji etkin bir yaklaşım olarak görünmektedir. Elde edilen bu sonuç, etüve konulan malzeme sayısı ile etüvün ısınma süresi gibi verimlilik parametreleri ihmal edilerek gerçekleştirilmiş olup, özellikle verimlilik konusunda daha fazla parametre ile yapılacak araştırmalara ihtiyaç olduğu da söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, Uçucu Kül, Elektriksel Kür, Mekanik ve Fiziksel Özellik, Maliyet Analizi

ABSTRACT

INVESTIGATION OF ENGINEERING PROPERTIES OF GEOPOLYMER CONCRETE PRODUCED BY ELECTRICAL CURING

Hüsamettin ÜRÜNVEREN

M.Sc., Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Ahmet BEYÇİOĞLU

December 2022, 125 pages

In this thesis, the physical and mechanical properties of geopolymer concrete produced by electrical curing were investigated. The thesis study includes two stages of experimental and one stage of cost analysis in the form of preliminary design based on workability and mechanical performance in mortars, final concrete design for relative comparison, and comparative energy consumption evaluation to determine energy consumption.

In the first stage of the study, thermal curing was applied at 45, 60, 80, 90, 100, and 120 °C for 24 hours, and electrical curing was applied to mortar mixtures with constant Ms modulus and Na₂O concentration at voltage values of 10, 20, 25, 30, 35 and 40 volts for 6, 12 and 24 hours to determine the optimum thermal curing temperature to determine the applicable electrical curing parameters. In the first step, 36 different mortar mixes were prepared with the Ms modulus increased parametrically from 0.5 to 2.0 with an increase of 0.25 and 0.1. The Na₂O content for each Ms modulus is 6 – 8 and 10 wt% of the powder material which is the aluminosilicate source. 4 mortar mixtures giving the best workability and compressive strength were selected and these mortars were selected for electrical curing with 20, 25, 30, and 35 V voltage and thermal curing with 60, 80, 100, and 120 °C temperatures determined in the preliminary experiments. Applied for 6 – 12 hours. Mortars providing sufficient workability and similar compressive strength were selected for both curing methods and passed to the second stage of experiments. In the second stage of the study, the selected mortars were cured at 100 °C and a voltage of 25 volts for 6 hours in both curing applications, and concrete samples were produced. The physical and mechanical properties of the produced concrete samples were evaluated comparatively. In the last stage, the energy consumption of both curing methods was

analyzed comparatively in terms of cost, taking into account the electricity unit prices of different countries from Europe, America, and Asia.

As a result, it has been seen that it is possible to produce geopolymer concretes by applying electrical curing with physical and mechanical properties similar to both conventional concrete and geopolymer concrete produced by thermal curing. In addition, in geopolymer concretes produced with electrical curing appears to be a much more energy efficient approach. This curing application can be used to produce geopolymers because of the fact that sufficient compressive strength can be obtained even in lower voltage values compared to conventional concretes produced with similar curing application, and there is a lower energy consumption compared to geopolymer concretes produced with thermal curing application. This result was achieved by ignoring the efficiency parameters such as the number of materials put in the oven and the heating time of the oven, and it can be said that there is a need for research with more parameters, especially on efficiency.

Keywords: Geopolymer, Fly Ash, Electrical Curing, Mechanical and Physical Properties, Cost Analysis



İthaf

Aileme ve ailem olan arkadaşlarıma...

TEŞEKKÜR

Hazırlamış olduğum bu tez çalışmasında, tez konusunun belirlenmesi ve çalışmaların sürdürülmesinde fikir, öneri ve desteklerini hiçbir zaman eksik etmeden sabır ve kararlılıkla çalışmanın gerçekleşmesine büyük katkıda bulunan tez danışmanım Prof. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU 'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasında malzeme temini konusunda destekte bulunan Dr. Öğr. Üyesi Bahadır OK ile İskenderun Enerji Üretim ve Ticaret A.Ş., Ekton İnşaat Müteahhitlik Lojistik San. Ve Tic. A.Ş.'ye, KAMBETON A.Ş.'ye ve Caner GÜNGÖR'e şükranlarımı sunarım. Geopolimer tasarımı konusunda önemli katkılar sunan Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Kambiz RAMYAR'a ve Düzce Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü öğretim elemanı Dr. Adil GÜLTEKİN'e, elektriksel kür uygulaması için deneysel düzeneğin hazırlanmasında çok değerli katkıları bulunan Arş. Gör. Emriye ÇINAR RESULOĞULLARI'na, akımölçer tasarımı yapılması, yazılımının geliştirilmesi ve veri eldesi konusunda destek olan Arş. Gör. Nihal BAYRAMOĞLU'na ve Arş. Gör. Sedat KARAAHMETLİ'ye laboratuvar deneylerinde yardımlarını eksik etmeyen laboratuvar teknisyenleri Hasan DAŞ'a ve Selçuk TOKLUCU'ya ve ayrıca deneysel çalışmaların sürekliliğini sağlayan, bu süreçte en çok desteğini aldığım Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği bölümü öğretim üyesi Dr. Öğr. Üyesi Abdulkadir ÜRÜNVEREN ile Doç. Dr. Mahmut ALTINER'e ve Arş Gör. Dr. Esmâ KAHRAMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması 21103011 proje numarası ile Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından maddi olarak desteklenmiştir. Katkıları için BAP birimi personeline teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu günlerimi borçlu olduğum, maddi ve manevi desteklerini her daim hissettiğim, bir bakıma bu tez çalışmasının gerçek sahibi olan annem ve babam başta olmak üzere tüm aileme ve her konuda beni motive eden ailem gibi olan arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

JÜRİ ONAY SAYFASI	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANNAMESİ	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
<i>İthaf</i>	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xv
KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Geopolimer	4
2.1.1. Geopolimerin tarihçesi	6
2.2. Geopolimer Kimyası ve Geopolimerizasyon	11
2.2.1. Geopolimerizasyonu etkileyen faktörler	14
2.3. Geopolimerin Avantajları ve Dezavantajları	15
2.4. Geopolimerlerin Kullanım Alanları	15
2.5. Uçucu Kül	17
2.6. Alkali aktivatör	19
2.6.1. Sodyum silikat	20
2.6.2. Sodyum hidroksit	20
2.7. Beton Üretiminde Kullanılan Kür Yöntemleri	21
2.7.1. Buhar kürü	21
2.7.2. Isıl kür	23
2.7.3. Elektriksel kür	24
2.8. Literatür Taraması	27

3. MATERYAL VE METOT	35
3.1. Materyal	36
3.1.1. Uçucu kül	36
3.1.2. Sodyum silikat	38
3.1.3. Sodyum hidroksit	39
3.1.4. CEN standart kumu	40
3.1.5. Agregas	40
3.2. Metot	41
3.2.1. Ön deneyler	41
3.2.1.1. Isıl kür ve uygulanabilir sıcaklık değerlerinin belirlenmesi	41
3.2.1.2. Taze harçların işlenebilirlik tayini	43
3.2.1.3. Elektriksel kür uygulaması	48
3.2.2. Harç deneyleri	51
3.2.2.1. Isıl kür ile harç üretimi	51
3.2.2.2. Elektriksel kür ile harç üretimi	51
3.2.2.3. Elektriksel kür ve ısıl kür ile üretilen harçların basınç dayanımlarının belirlenmesi	51
3.2.3. Beton deneyleri	52
3.2.3.1. Basınç dayanımı	53
3.2.3.2. Kılcallık deneyi	53
3.2.3.3. Ultrases geçiş hızı deneyi	55
3.2.3.4. Böhme aşınma deneyi	57
3.2.3.5. Betonların birim hacim ağırlık, görünür porozite ve su emme özellikleri	58
3.2.3.6. Maliyet Analizi	59
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	61
4.1. Ön Deneyler ile Belirlenen Deney Parametrelerine Ait Bulgular	61
4.1.1. Aktivatör sıcaklıklarının belirlenmesi	61

4.1.2.	Isıl kür için uygun sıcaklık değerlerinin belirlenmesi	63
4.1.3.	İşlenebilirlik/basınç dayanımı kriterine göre Ms modülü ve Na ₂ O konsantrasyonunun belirlenmesi	66
4.1.4.	Elektriksel kür uygulaması için en uygun gerilim değerlerinin belirlenmesi	73
4.1.4.1.	Uygulanan gerilim-beton sıcaklığı ilişkisinin analizi	73
4.1.4.2.	Uygulanan gerilim değeri ile basınç dayanımı ilişkisinin analizi	79
4.2.	Geopolimer Harç Deneylerine Ait Bulgular	82
4.2.1.	Elektriksel kür uygulanarak üretilen harçlara bulgular	82
4.2.1.1.	Elektriksel kür yöntemi ile üretilen harç numunelerin basınç dayanımları	103
4.2.1.2.	Isıl kür yöntemi ile üretilen harç numunelerin basınç dayanımları	104
4.3.	Betonlara Uygulanan Deneylerden Elde Edilen Bulgular	105
4.3.1.	Elektriksel kür ile üretilen geopolimer betonların üretimine ait bulgular	106
4.3.2.	Basınç dayanımı bulguları	107
4.3.3.	Kılcallık bulguları	108
4.3.4.	Ultrases geçiş hızı bulguları	110
4.3.5.	Böhme aşınma deneyi bulguları	111
4.3.6.	Betonların birim hacim ağırlık, görünür porozite ve su emme özellikleri	112
4.3.7.	Mikroyapı incelemesi	113
4.4.	Maliyet Analizi Bulguları	115
5.	SONUÇLAR	120
6.	ÖNERİLER	125
	KAYNAKÇA	126
	ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Çimento kaynaklı CO ₂ emisyonu ve çimento üretiminin dolar başına üretilen emisyon miktarı	1
Şekil 1.2. Çimento üretimi ve üretime bağlı CO ₂ salımı	2
Şekil 1.3. Çimento üretimi ve büyüme potansiyeli	2
Şekil 2.1. Geopolimer üretiminde kullanılan malzemeler ve geopolimer harç/beton üretim şematiği	5
Şekil 2.2. Geopolimer araştırma laboratuvarlarının yıllara göre artışı	8
Şekil 2.3. 1990 – 2023 arasında yıl bazında “Geopolimer” kavramı ile yayımlanan yayın sayıları	9
Şekil 2.4. Uçucu kül bazlı geopolimer ile üretilen Queensland Üniversitesi Küresel Değişim Enstitüsü	10
Şekil 2.5. Rusya, Lipetsk'te 1994 yılında alkali aktif cüruf betonu ile inşa edilen 24 katlı bina	10
Şekil 2.6. Geopolimerizasyon denklemi	11
Şekil 2.7. Polikondenzasyon örneği	12
Şekil 2.8. Geopolimerizasyon mekanizması	13
Şekil 2.9. 3D beton yazıcı ile geopolimer yapı üretimi	16
Şekil 2.10. Geopolimer malzeme kullanım alanları	17
Şekil 2.11. Elektrofiltre ile uçucu kül tutulması	18
Şekil 2.12. Sodyum silikat	20
Şekil 2.13. Sodyum hidroksit	21
Şekil 2.14. Buhar kürü uygulaması	22
Şekil 2.15. Atmosferik buhar kürü uygulamasının temel süreçleri	22
Şekil 2.16. Laboratuvarlarda kullanılan etüv	24
Şekil 2.17. Elektriksel kür deney düzeneği	25
Şekil 2.18. Silika çözeltisinin elektrik iletkenliği	26
Şekil 3.1. Tez çalışması akış diyagramı	35
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan malzemeler	36
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan F sınıfı uçucu kül	37
Şekil 3.4. Uçucu kül XRD analizi	37
Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan sodyum silikat	38

Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan sodyum hidroksit.....	39
Şekil 3.7. Tez kapsamında kullanılan CEN standart kumu.....	40
Şekil 3.8. Çalışmada kullanılan agregalar.....	41
Şekil 3.9. Farklı sıcaklık değerlerinde kürlenmiş geopolimer harçların kalıptan çıkarılması ve dayanımlarının belirlenmesi.....	42
Şekil 3.10. Geopolimer harç ve betonlara ısı kütür uygulaması.....	43
Şekil 3.11. Aktivatör hazırlanması.....	46
Şekil 3.12. Taze harçlarda işlenebilirlik tayini aşamaları.....	46
Şekil 3.13. Farklı Ms modülü ve Na.....	47
Şekil 3.14. Elektriksel kütür şeması.....	48
Şekil 3.15. Elektriksel kütür uygulanması ve seri bağlantı şeması.....	49
Şekil 3.16. Çalışma kapsamında tasarlanmış ve üretilmiş akım kaydedici arduino devre elemanı.....	49
Şekil 3.17. Akım ölçme sisteminin bilgisayar ile bağlantısı ve elde edilen örnek akım ölçümleri.....	50
Şekil 3.18. 100x100x100 mm küp numunelerin dökümü ve deney düzeneğinin hazırlanması.....	50
Şekil 3.19. Geopolimer beton üretimi.....	52
Şekil 3.20. Geopolimer harç ve betonların basınç dayanım tayini.....	53
Şekil 3.21. Parafin ile kaplanan numuneler.....	54
Şekil 3.22. Kılcallık deney düzeneği.....	54
Şekil 3.23. Kılcallık deneyinde kullanılan 0,01 g hassasiyetli elektronik tartı.....	55
Şekil 3.24. Ultrases hızı deney aleti.....	56
Şekil 3.25. Beton numunelerin UGH ölçümleri.....	56
Şekil 3.26. Üretilen betonların böhme aşınma deneyi için kesilmesi.....	57
Şekil 3.27. Kesilen beton numuneler.....	57
Şekil 3.28. Böhme aşınma deneyi uygulaması.....	58
Şekil 3.29. Beton numunelerin ağırlıklarının belirlenmesi.....	59
Şekil 3.30. Çeşitli ülkelerde kwh başına elektrik birim fiyatı (\$).....	59
Şekil 4.1. Ms modülü ve Na ₂ O konsantrasyonuna bağlı olarak değişen sodyum silikat/sodyum hidroksit miktarı ve aktivatör sıcaklıkları.....	63
Şekil 4.2. 45 °C’de kürlenmiş numuneler.....	63
Şekil 4.3. 60 °C’de kürlenmiş numuneler.....	64

Şekil 4.4. 80 °C’de kürlenmiş numuneler	64
Şekil 4.5. 90 °C’de kürlenmiş numuneler	64
Şekil 4.6. 100 °C’de kürlenmiş numuneler	64
Şekil 4.7. 120 °C’de kürlenmiş numuneler	65
Şekil 4.8. 1,6 Ms – %8 Na ₂ O ortalama basınç dayanımı değerleri.....	66
Şekil 4.9. Ms modülü – uçucu kül – Na ₂ O ilişkisi.....	67
Şekil 4.10. Ms modülü – agrega – Na ₂ O ilişkisi.....	67
Şekil 4.11. Ms modülü – sodyum silikat – Na ₂ O ilişkisi.....	68
Şekil 4.12. Ms modülü – sodyum hidroksit – Na ₂ O ilişkisi.....	68
Şekil 4.13. Ms modülü / Na ₂ O (%) – kuru karışım – aktivatör ilişkisi.....	69
Şekil 4.14. 10 volt 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması.....	74
Şekil 4.15. 20 volt 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması.....	75
Şekil 4.16. 25 volt 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması.....	76
Şekil 4.17. 30 volt 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması.....	77
Şekil 4.18. 35 volt 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması.....	78
Şekil 4.19. 40 volt 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması.....	79
Şekil 4.20. Elektriksel kür uygulanan numunelerin basınç dayanımı değerinin belirlenmesi.	80
Şekil 4.21. 1,2 Ms %10 Na ₂ O 20 volt 6 saat elektriksel kür.....	83
Şekil 4.22. 1,2 Ms %10 Na ₂ O 20 volt 12 saat elektriksel kür.....	83
Şekil 4.23. 1,2 Ms %10 Na ₂ O 25 volt 6 saat elektriksel kür.....	84
Şekil 4.24. 1,2 Ms %10 Na ₂ O 25 volt 12 saat elektriksel kür.....	84
Şekil 4.25. 1,2 Ms %10 Na ₂ O 30 volt 6 saat elektriksel kür.....	85
Şekil 4.26. 1,2 Ms %10 Na ₂ O 30 volt 12 saat elektriksel kür.....	86
Şekil 4.27. 1,2 Ms %10 Na ₂ O 35 volt 6 saat elektriksel kür.....	86
Şekil 4.28. 1,2 Ms %10 Na ₂ O 35 volt 12 saat elektriksel kür.....	87
Şekil 4.29. Geopolimer harçta ısınmaya bağlı hacim değişikliği	88
Şekil 4.30. 1,4 Ms %10 Na ₂ O 20 volt 6 saat elektriksel kür.....	89
Şekil 4.31. 1,4 Ms %10 Na ₂ O 20 volt 12 saat elektriksel kür.....	90
Şekil 4.32. 1,4 Ms %10 Na ₂ O 25 volt 6 saat elektriksel kür.....	90
Şekil 4.33. 1,4 Ms %10 Na ₂ O 25 volt 12 saat elektriksel kür.....	91
Şekil 4.34. 1,4 Ms %10 Na ₂ O 30 volt 6 saat elektriksel kür.....	91
Şekil 4.35. 1,4 Ms %10 Na ₂ O 30 volt 12 saat elektriksel kür.....	92
Şekil 4.36. 1,4 Ms %10 Na ₂ O 35 volt 6 saat elektriksel kür.....	92

Şekil 4.37. 1,4 Ms %10 Na ₂ O 35 volt 12 saat elektriksel kür.....	93
Şekil 4.38. 1,6 Ms %10 Na ₂ O 20 volt 6 saat elektriksel kür.....	94
Şekil 4.39. 1,6 Ms %10 Na ₂ O 20 volt 12 saat elektriksel kür.....	94
Şekil 4.40. 1,6 Ms %10 Na ₂ O 25 volt 6 saat elektriksel kür.....	95
Şekil 4.41. 1,6 Ms %10 Na ₂ O 25 volt 12 saat elektriksel kür.....	95
Şekil 4.42. 1,6 Ms %10 Na ₂ O 30 volt 6 saat elektriksel kür.....	96
Şekil 4.43. 1,6 Ms %10 Na ₂ O 30 volt 12 saat elektriksel kür.....	96
Şekil 4.44. 1,6 Ms %10 Na ₂ O 35 volt 6 saat elektriksel kür.....	97
Şekil 4.45. 1,8 Ms %10 Na ₂ O 20 volt 6 saat elektriksel kür.....	98
Şekil 4.46. 1,8 Ms %10 Na ₂ O 20 volt 12 saat elektriksel kür.....	99
Şekil 4.47. 1,8 Ms %10 Na ₂ O 25 volt 6 saat elektriksel kür.....	99
Şekil 4.48. 1,8 Ms %10 Na ₂ O 25 volt 12 saat elektriksel kür.....	100
Şekil 4.49. 1,8 Ms %10 Na ₂ O 30 volt 6 saat elektriksel kür.....	100
Şekil 4.50. 1,8 Ms %10 Na ₂ O 30 volt 12 saat elektriksel kür.....	101
Şekil 4.51. 1,8 Ms %10 Na ₂ O 35 volt 6 saat elektriksel kür.....	101
Şekil 4.52. 1,8 Ms %10 Na ₂ O 35 volt 6 saat elektriksel kür.....	102
Şekil 4.53. 1,4 Ms %10 Na ₂ O 35 volt 6 saat elektriksel kür ile üretilmiş geopolimer beton	106
Şekil 4.54. Beton basınç dayanımları.....	108
Şekil 4.55. Betonların süre ve yüzey alanına bağlı kılcallık eğrileri	109
Şekil 4.56. Beton numunelerin ultrases geçiş hızına göre sınıfları	110
Şekil 4.57. Betonların Böhme aşınma deneyi sonucu ağırlık kayıpları	112
Şekil 4.58. 1,4 Ms 25V-6H numunesinin 1000x SEM görüntüsü	114
Şekil 4.59. 1,6 Ms 100°C-6H numunesinin 1000x SEM görüntüsü	114
Şekil 4.60. Etüvün harcadığı elektrik maliyeti hesabında kullanılan wattmetre.....	118

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Geopolimer kronolojisi	7
Tablo 2.2. Si/Al oranına göre geopolimerlerin inşaat mühendisliği alanında kullanım alanları	16
Tablo 3.1. Uçucu kül XRF analizi	37
Tablo 3.2. Uçucu külün fiziksel özellikleri	38
Tablo 3.3. Sodyum silikat teknik özellikleri	39
Tablo 3.4. Sodyum hidroksit teknik özellikleri	39
Tablo 3.5. CEN standart kumuna ait standartlaşmış granülometri	40
Tablo 3.6. Uygulanabilir sıcaklık değerlerinin belirlenmesi amacıyla hazırlanan harç özellikleri	41
Tablo 3.7. İşlenebilirlik tayininde kullanılan malzeme miktarları	44
Tablo 3.7. İşlenebilirlik tayininde kullanılan malzeme miktarları (devamı)	45
Tablo 3.8. Ultrases geçiş hızına göre beton kalitesi	57
Tablo 4.1. Aktivatör sıcaklık değerleri	61
Tablo 4.1. Aktivatör sıcaklık değerleri (devamı)	62
Tablo 4.2. Farklı sıcaklıkların basınç dayanımına etkisi	65
Tablo 4.3. Harç karışımlarının yayılma değerleri	70
Tablo 4.3. Harç karışımlarının yayılma değerleri (devamı)	71
Tablo 4.4. Harç karışımların basınç dayanım değerleri	72
Tablo 4.4. Harç karışımların basınç dayanım değerleri (devamı)	73
Tablo 4.5. Uygun gerilim değerlerinin belirlenmesi kapsamında elektriksel kür uygulanan numunelerin basınç dayanımı değerleri	80
Tablo 4.6. Harç deneylerinde araştırılacak parametreler	82
Tablo 4.7. 1,2 Ms %10 Na ₂ O deneysel veri özetleri	88
Tablo 4.8. 1,4 Ms %10 Na ₂ O deneysel veri özetleri	93
Tablo 4.9. 1,6 Ms %10 Na ₂ O deneysel veri özetleri	98
Tablo 4.10. 1,8 Ms %10 Na ₂ O deneysel veri özetleri	102
Tablo 4.11. Elektriksel kür yöntemi ile üretilen harç numunelerin tek eksenli basınç dayanımları	104
Tablo 4.12. Isıl kür yöntemi ile üretilen harç numunelerin tek eksenli basınç dayanımları	105
Tablo 4.13. Tez kapsamında geopolimer betonla kıyaslanan geleneksel PÇ beton reçetesi	106

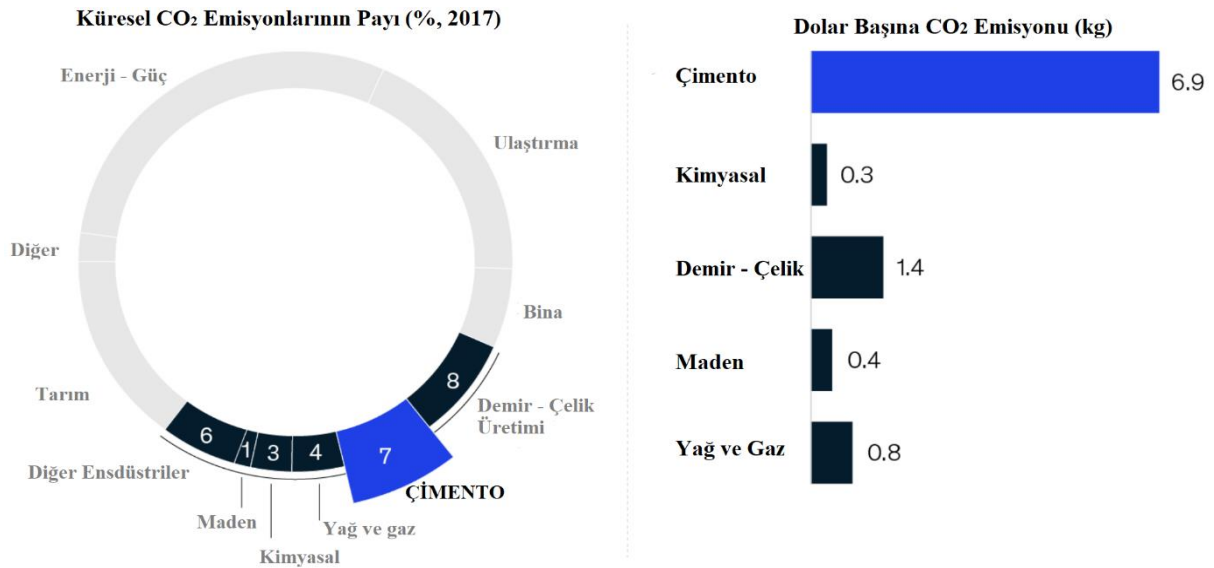
Tablo 4.14. 1,4 Ms %10 Na ₂ O 25 volt harç ve beton üretimi veri özetleri	107
Tablo 4.15. Kılcallık deneyi bulguları	109
Tablo 4.16. Ultrases geçiş hızı deney verileri	110
Tablo 4.17. Aşınma deneyi öncesi ve sonrası ağırlık değişimleri	111
Tablo 4.18. Beton numunelerin doymun yüzey kuru, etüv kurusu ve sudaki ağırlıkları	112
Tablo 4.19. Betonların birim hacim ağırlık, su emme (%) ve görünür porozite (%) sonuçları	113
Tablo 4.20. Tez çalışması kapsamında elektriksel kür yöntemi ile üretilen harçların akım – süre – güç ilişkisi	115
Tablo 4.21. Tez çalışması kapsamında elektriksel kür yöntemi ile üretilen harçların enerji sarfiyatları	116
Tablo 4.22. Belirli harçların seçilen ülkeler bazında maliyetleri (\$)	117
Isıl kür yöntemi ile üretilen geopolimer betonlarda da etüvün harcadığı ortalama güç değeri Şekil 4.60.'da gösterilen wattmetre ile bulunmuş ve ısıl kür sarfiyatı bu değer üzerinden hesaplanmıştır.	118
Tablo 4.23. Isıl kür ile üretilen geopolimerin gerektirdiği güç (kW)	118
Tablo 4.24. Isıl kür ve elektriksel kür enerji kıyaslama tablosu (kW)	119

KISALTMALAR

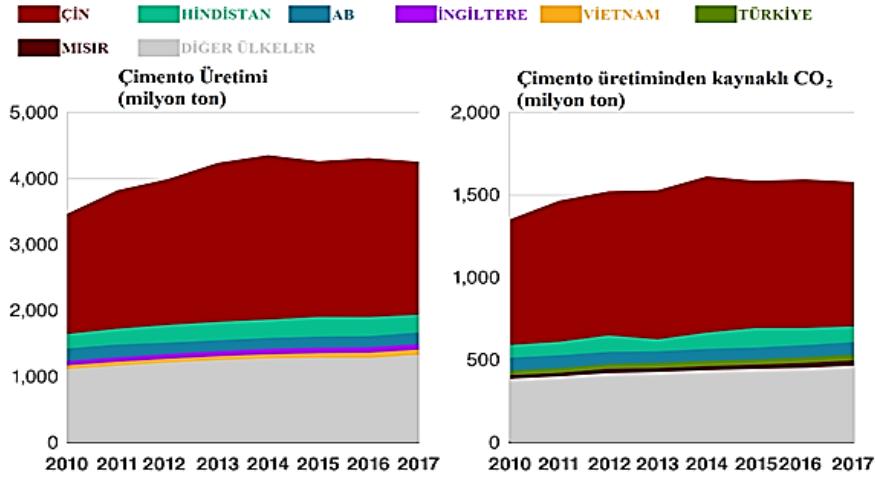
CO ₂	: Karbondioksit
°C	: Sıcaklık birimi (Derece)
AC	: Alternatif akım
Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum hidroksit
CaO	: Kalsiyum oksit
CEN	: Avrupa Standardizasyon Komitesi
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
DC	: Doğru akım
Fe ₂ O ₃	: Demir oksit
K	: Potasyum
KOH	: Potasyum hidroksit
MK	: Metakaolin
Ms	: Silikat Modülü (SiO ₂ /Na ₂ O)
Na ₂ CO ₃	: Sodyum karbonat
Na ₂ O	: Sodyum oksit
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum silikat
Na ₂ SO ₄	: Sodyum sülfat
NaCl	: Sodyum klorür
NaOH	: Sodyum hidroksit
N-A-S-H	: Alkalın alüminosilikat hidrat
nSiO ₂ K ₂ O	: Potasyum cam suyu (potasyum silikat)
O	: Oksijen
PÇ	: Portland Çimentosu
SD	: Silis dumanı
Si	: Silisyum
SiO ₂	: Silisyum oksit
UK	: Uçucu kül
V	: Volt
YFC	: Yüksek fırın cürufu

1. GİRİŞ

İnsanlığın varoluşundan beri süregelen ve en temel ihtiyaç olan barınma isteği insanoğlunu bu konuda gelişim gösterme konusunda her zaman motive etmiş ve buna paralel olarak inşaat endüstrisi sürekli bir ilerleme ve gelişim kaydetmiştir. Bilindiği gibi inşaat endüstrisinin en temel malzemelerinden bir tanesi betondur ve betonda bağlayıcı olarak kullanılan en önemli bileşen ise çimentodur. İnşaat endüstrisinde en büyük pay sahibi olan çimento üretimi ve kullanımı gerek iş gücü gerekse de enerji sarfiyatı anlamında insan faaliyetlerinin en yoğun olduğu alanlardan biridir [1]. Bu konu ile ilgili birçok araştırmacı çimento üretim aşamasının yoğun enerji sarfiyatı gerektiren, çevre dostu olmayan bir süreç olduğunu vurgulamıştır. [2,3]. Bir ton çimento üretimi için yaklaşık 94.76×10^6 Joule enerji gerekir ve eşit miktarda CO₂ gazı atmosfere salınır [4-6]. Atmosfere salınan toplam CO₂'nin yaklaşık %5-8'i, çimento üretimi nedeniyle üretilen CO₂ miktarından kaynaklanmaktadır [7]. Çimento üretimi, küresel CO₂ emisyonlarının önemli bir kaynağı olmakla birlikte dolar başına en fazla emisyonu üretir. Ayrıca hava kirliliğine yol açan zararlı sera gazlarının atmosfere salınmasını içerir [8,9]. Şekil 1.1.'de çimento kaynaklı CO₂ emisyonu ve çimento üretiminin dolar başına üretilen emisyon miktarı, Şekil 1.2.'de de ülke bazında çimento üretimi ve bu çimento üretiminden kaynaklı doğaya salınan CO₂ miktarı gösterilmiştir [10,11].

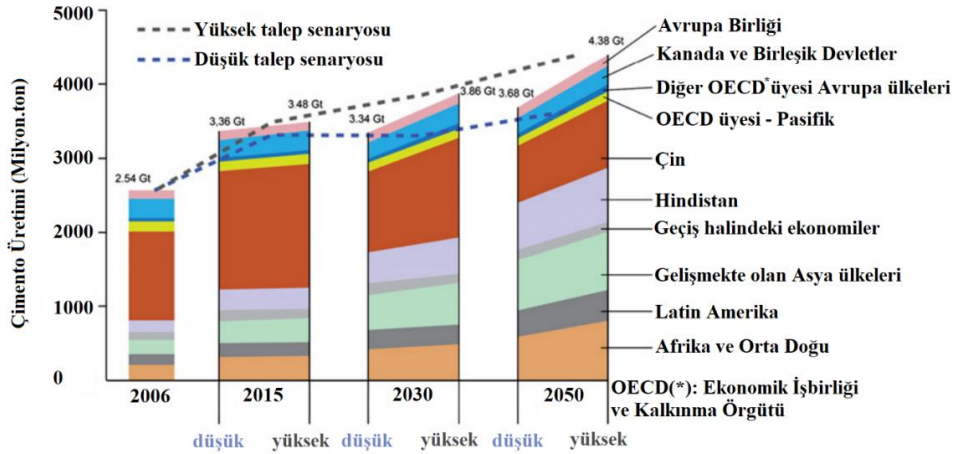


Şekil 1.1. Çimento kaynaklı CO₂ emisyonu ve çimento üretiminin dolar başına üretilen emisyon miktarı [10]



Şekil 1.2. Çimento üretimi ve üretime bağlı CO₂ salımı [11]

Dünya genelinde 2006 yılında yıllık 2,8 milyar tona ulaşan çimento üretiminin 2050 yılı itibarı ile 4 milyar tonu aşması beklenmektedir. 2050 yılına göre yürütülen tahminsel çalışmaya göre; Çin ve Hindistan'ın yanı sıra Orta Doğu ve Kuzey Afrika ülkelerinde büyük bir büyüme öngörülmektedir. Çimento üretimi ve ilerleyen yıllarda çimento üretiminin büyüme potansiyeli milyon ton cinsinden Şekil 1.3.'de verilmiştir [12].



Şekil 1.3. Çimento üretimi ve büyüme potansiyeli [12]

İnşaat sektöründe en önemli bileşenlerden olan çimentonun üretim aşamalarında doğaya saldırdığı CO₂ ile üretim için gerekli enerji miktarının aşırılığı göz önüne alındığında çimento kullanımının azaltılarak ekonomik ve çevreci bağlayıcıların geliştirilmesi konusu her geçen gün daha fazla ilgi çekmektedir. Dünya genelinde artış gösteren çevresel duyarlılık malzeme seçiminde ve bu malzemelerin üretiminde çok önemli bir etkiye sahiptir.

Çimentonun bu etkisinin yanı sıra uçucu kül, cüruf, maden atığı, kırmızı çamur gibi endüstriyel atıkların depolanması, bertaraf edilmesi gibi problemlerinin olması ve olumsuz çevresel etkileri nedeniyle önemli bir sorun haline gelmiştir [13]. Buna bağlı olarak geri dönüşüm çalışmaları kapsamında endüstriyel atık olarak bilinen uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC), silis dumanı (SD) gibi malzemeler beton üretiminde yan ürün olarak kullanılmaya başlanmıştır. Çevresel duyarlılık ve çimento üretiminde ortaya çıkan CO₂ miktarı nedeniyle, endüstriyel atık malzemelerin çimento ikame malzemesi olarak kullanımından ziyade direkt çimento yerine kullanılarak alternatif bir bağlayıcı tasarımı son zamanlarda literatürde yer bulmaya başlamıştır. Alüminosilikat bazlı uçucu küllerin alkali aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda “geopolimer” adı verilen amorf yapıdaki inorganik polimerler oluşurken, yüksek fırın cürufunun reaksiyonu sonucunda çimento esaslı bağlayıcılardaki C-S-H jeline benzer hidrate kalsiyum silikat oluşmaktadır. Bu alkali aktive edilmiş bağlayıcılar Portland çimentosuna kıyasla çok daha düşük kalsinasyon sıcaklığı (600-800 °C) gerektirir, %70 daha az enerji tüketir ve %80-90 oranında daha az CO₂ yayarlar. Ayrıca geopolimer, beton üretim tesislerinde çevreye verilen zararlı gazları azaltmak için geliştirilmiş bir teknolojidir [14-25]. İnorganik polimer olarak da bilinen geopolimerler, genel olarak çimento üretiminden kaynaklı CO₂ salımının azaltılmasını, böylece daha çevreci beton üretiminin sağlanmasını, amaçlayan yenilikçi kompozitlerdir.

Normal betonlarda su ve buhar kürü geopolimer betonlarda ise ısı kütlesi olarak kullanılan yaklaşımlardandır. Normal portland çimentolarla hazırlanan betonlarda, taze halde içerisinde bulunan suyun iletkenliği ve çimento ile ikameli olarak eklenen karbon siyahı malzemesi sayesinde farklı gerilim değerlerinde elektrik verilerek çimento hamurunun iç sıcaklığının artırılması ve böylece dayanım – dayanıklılık kazandırılması yeni nesil bir yaklaşım olup elektriksel kür olarak adlandırılmaktadır. Elektriksel kür literatüre henüz yeni girmiş olup geleneksel betonlarda kullanılabilirliği konusunda sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, alkali kaynağı olarak uçucu kül içeren ve parametrik olarak elektriksel kür ile ısı kütlesi uygulanan geopolimer harçların/betonların fiziksel ve mekanik özellikleri ile iç yapıları karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

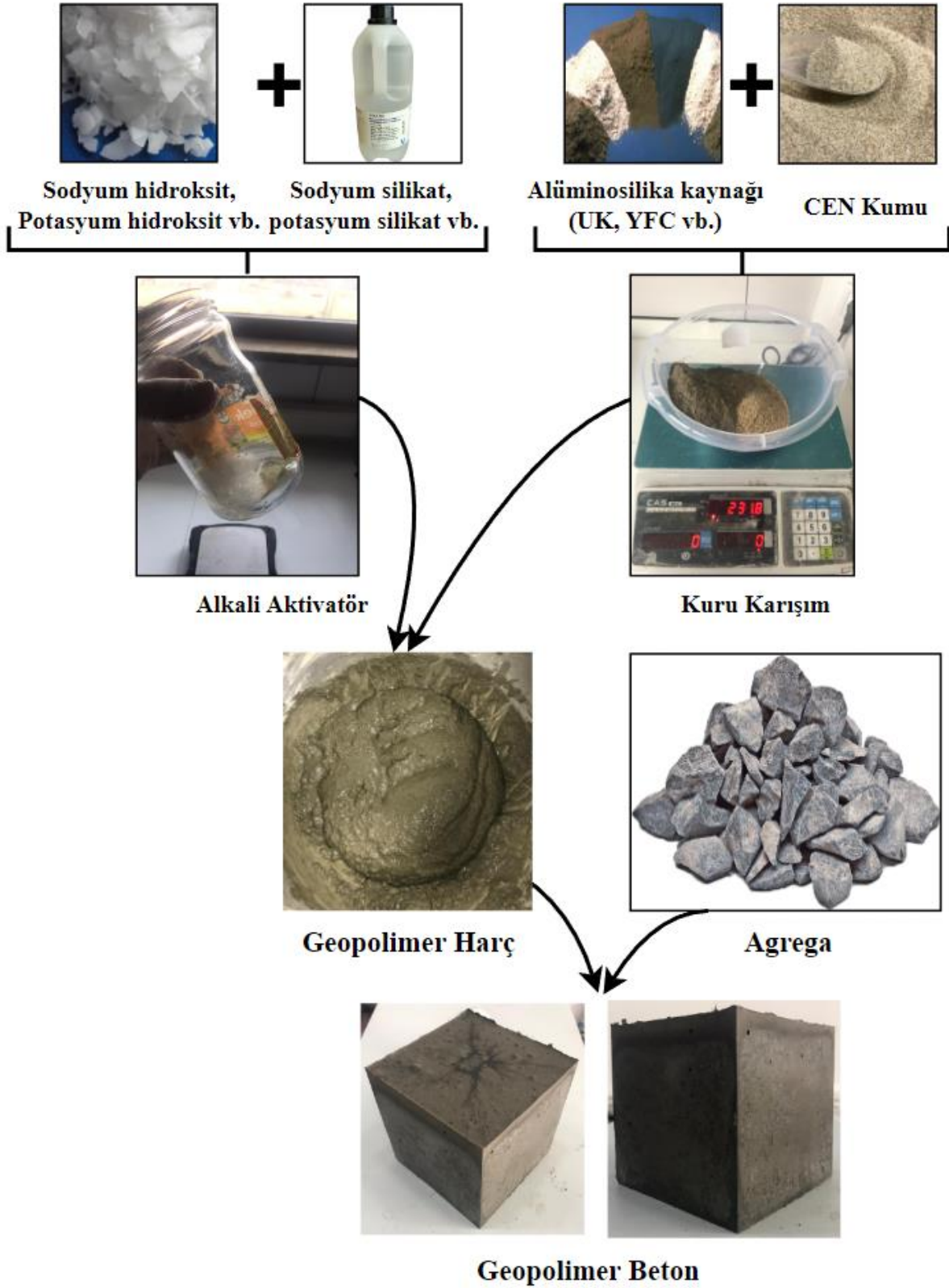
2.1. Geopolimer

1950'lerde Ukrayna ve Rusya'da Victor Glukhovsky ve ardından Pavel Krivenko, kalsiyum silikat hidrat (CSH) ve alümino-silikat bazlı alkali aktif sistemleri geliştirmiş 1972'de de Davidovits, doğal olarak oluşan alümino-silikatlar tarafından düşük sıcaklıkta ve kısa sürede oluşan üç boyutlu alümino-silikatları "geopolimerler" olarak adlandırmıştır [26].

Geopolimer, geleneksel portland çimentolara göre nispeten yeni olan ve alüminosilikat bakımından zengin malzemelerin çeşitli alkalilerle aktivasyonu sonucu üretilen bir bağlayıcı türüdür [27]. Böyle bir yapıda, tetrahedral Si ve Al atomları, paylaşılan oksijen atomları ile bağlanarak yüksek konsantrasyonlu bir alkali ortamda (sodyum (Na⁻) veya potasyum (K⁻) bazlı), alüminosilikat kaynağından gelen silika (Si) ve alümina (Al) çökelir ve Si-O-Al-O monomerlerini oluşturur. [28,29]. Alkali bir ortamda üretilen geopolimer çimento, poli(sialat), -Si-O-Al-O-, poli(sialat-siloxo), -Si-O-Al-O-Si-O- ve poly(sialate-disiloxo), -Si-O-Al-O-Si-O-Si- geopolimerizasyon işlemi yoluyla oluşturulur [30].

Geopolimer, alüminosilikat içeriği zengin malzemelerin alkaliler ile aktive edilmesi sonucu üretilen bir bağlayıcı türüdür [31]. Aktivasyon sonucunda, alkaline alüminosilikat hidrat (N-A-S-H) olarak bilinen üç boyutlu bir inorganik polimer ana ürün olarak ortaya çıkmaktadır [27]. Ana ürün olarak ortaya çıkan üç boyutlu polimerler ilk defa Davidovits tarafından 1972 yılında "geopolimer" olarak adlandırılmıştır [32].

Günümüzde, literatür araştırmalarından ve bu konuda yapılan çalışmalardan da görüleceği üzere "geopolimer" kavramının yanı sıra bu polimerler; inorganik polimerler, geopolimer, jeopolimer ve alkali aktifleştirilmiş harçlar/betonlar olarak da adlandırılmaktadır [25]. Geopolimer betonun üretiminde kullanılan malzemeler ve üretim şematığı Şekil 2.1.'de görülmektedir.



Şekil 2.1. Geopolimer üretiminde kullanılan malzemeler ve geopolimer harç/beton üretim şematığı

Normal betonlarda su ve buhar kürü geopolimer betonlarda ise ısı kür yaygın olarak kullanılan yaklaşımlardandır. Günümüzde ısı kür uygulamasının yanı sıra oda sıcaklığı koşullarında da kür uygulanarak geopolimer üretimi konusunda önemli çalışmalar yapılmaktadır. Geopolimerler, uygun sıcaklık koşulları altında bir aktivatör solüsyonu ile bir alüminosilikat öncüsünün aktivasyonu yoluyla elde edilirler. Geopolimerde ısı kür uygulaması oldukça bilinen bir konu olup genellikle laboratuvar tipi etüvler bu kürleme için yeterli olmaktadır. Geopolimer kompozitlerin performansı (taze ve sertleştirilmiş özellikler), alüminosilikat öncüsünün, aktivatör solüsyonlarının ve kürleme sıcaklığı koşullarının seçimine bağlıdır [33,34]. Düşük kalsiyumlu uçucu kül (F sınıfı uçucu kül bazlı) geopolimer betonunun kürlenme süresi boyunca hafifçe yükseltilmiş sıcaklıklar (genellikle $<100\text{ }^{\circ}\text{C}$) gerekmektedir [35].

Geopolimerler şu anda 10 ana malzeme sınıfında geliştirilmekte ve uygulanmaktadır:

1. Su camı bazlı geopolimer, poli(siloksonat), çözünür silikat, Si:Al=1:0
2. Kaolinit / Hidrosodalit bazlı geopolimer, poli(siyalat) Si:Al=1:1
3. Metakaolin MK-750 bazlı geopolimer, poli(siyalat-silokso) Si:Al=2:1
4. Kalsiyum bazlı geopolimer, (Ca, K, Na)-sialate, Si:Al=1, 2, 3
5. Kaya bazlı geopolimer, poli(sialate-multisilokso) $1 < \text{Si:Al} < 5$
6. Poli(siloksonat) Si:Al >5 'te silika bazlı geopolimer, sialat bağı ve silokso bağı
7. Uçucu kül bazlı geopolimer
8. Ferro-sialat bazlı geopolimer
9. Fosfat bazlı geopolimer, AlPO_4 bazlı geopolimer
10. Organik-mineral geopolimer

2.1.1. Geopolimerin tarihçesi

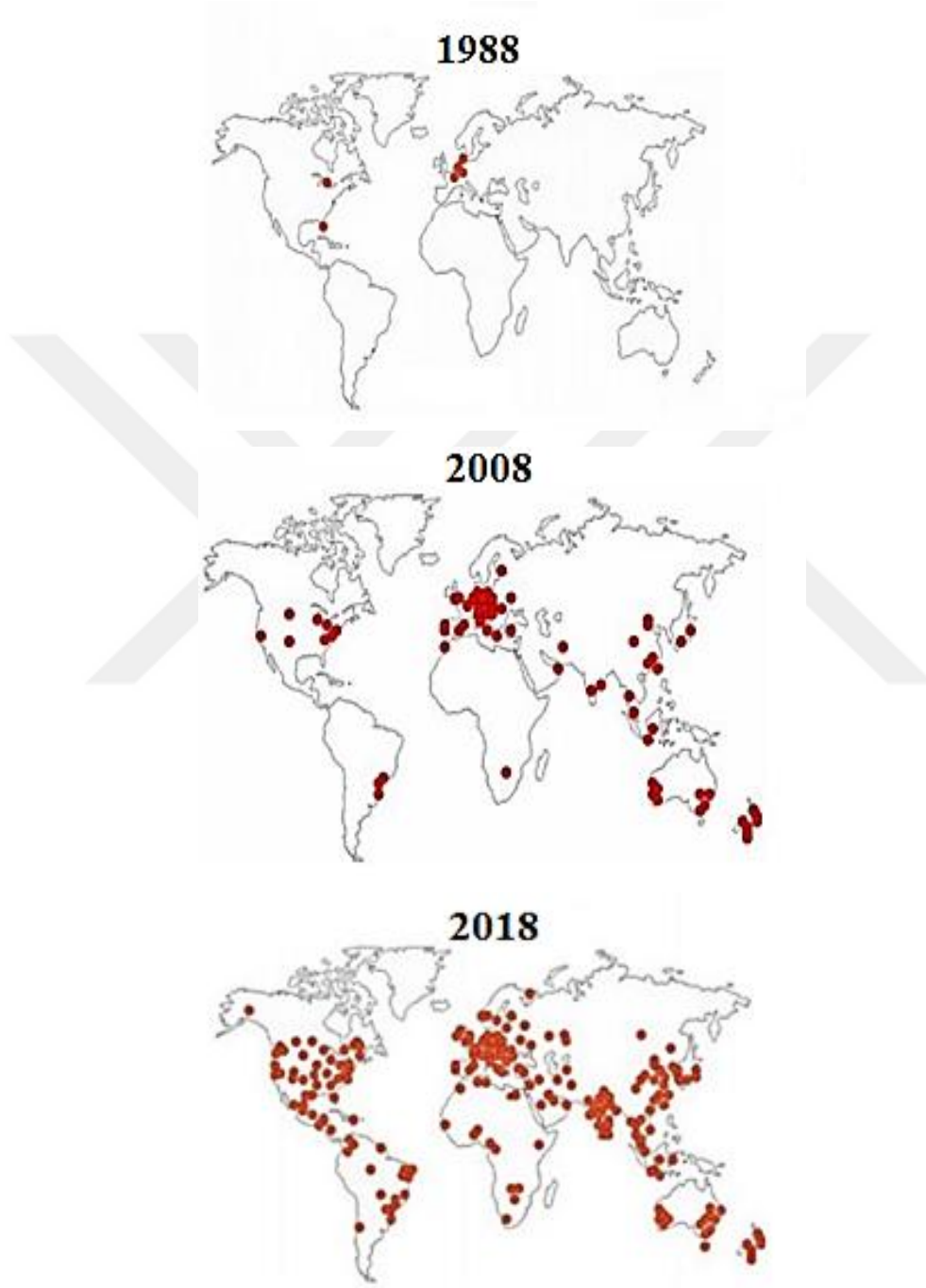
Geopolimer beton çalışmaları, geleneksel beton karışımlarına uçucu kül, cüruf gibi malzemelerin eklenmesi temeline dayalı olarak ortaya çıkmış, daha sonraları gerek çimento üretiminden kaynaklı olumsuzlukların giderilmesi gerekse de endüstriyel atıkların bertarafı ihtiyacı doğrultusunda alkali aktivatörler ile aktifleştirilmesi çalışmaları ile gelişme göstermiştir. Purdon, 1940 yılında yüksek kalsiyumlu yüksek fırın cüruflarının alkali aktivasyonu ile yapı malzemelerinin sentezini gösteren ilk kişiydi. 1959 yılında Glukhovsky, alkali çimentoların teorik temelini atmış ve gelişimine öncülük etmiştir. Alkaliler ile aktifleştirilen malzeme üzerine yapılan çalışmalar yaygınlaşmış ve bu malzemeler ilk olarak 1970'lerde Fransız bilim adamı Joseph Davidovits tarafından "geopolimer" olarak

adlandırılmışlardır. Davidovits tarafından yapılan bu adlandırmadan sonra geopolimer malzemelerin tanımlanmasında geopolimer, alkali ile aktifleştirilen malzemeler gibi birçok farklı isim kullanılmaya başlanmıştır. Geopolimerler ile ilgili gelişmeler bibliyografik şekilde Tablo 2.1.'de gösterilmiştir [36].

Tablo 2.1. Geopolimer kronolojisi [36]

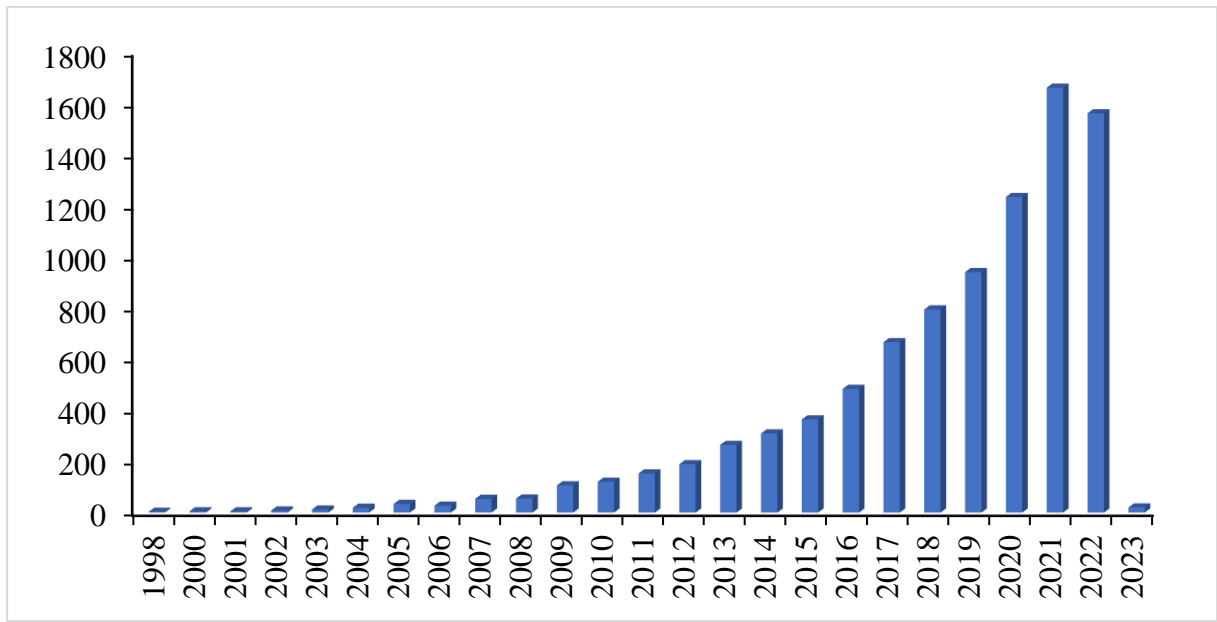
Yazar	Yıl	Önem
Feret	1939	Çimento için kullanılan cüruf lar
Purdon	1940	Alkali-cüruf kombinasyonları
Glukhovsky	1959	Alkali çimentoların teorik temeli ve gelişimi
Glukhovsky	1965	İlk olarak 'alkali çimentolar' olarak adlandırıldı
Davidovits	1979	'Geopolimer' terimi
Malinowski	1979	Antik su kemerleri karakterize
Forss	1983	F-çimento (cüruf-alkali-süper akışkanlaştırıcı)
Langton and Roy	1984	Antik yapı malzemeleri karakterize
Davidovits and Sawyer	1985	Pyrament çimentosunun patenti
Krivenko	1986	Yüksek Lisans Tezi, $R_2O - RO - SiO_2 - H_2O$
Malolepsy and Petri	1986	Sentetik melilite cüruf larının aktivasyonu Cüruf çimento-düşük seviyeli radyoaktif atık formları
Malek et al.	1986	
Davidovits	1987	Antik ve modern betonların karşılaştırılması
Deja and Malolepsy	1989	Gösterilen klorürlere karşı direnç Alkali karışımlardan adyabatik kürlenmiş nükleer atıklar oluşur
Kaushal et al.	1989	
Roy and Langton	1989	Eski beton analogları
Talling and Brandstetr	1989	Alkali ile aktive olan cüruf
Wu et al.	1990	Cüruf çimentosunun aktivasyonu
Roy et al.	1991	Hızlı sertleşen alkali aktif çimentolar
Katz	1998	Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu külün mikro yapısı
Davidovits	1999	Geopolimerik sistemlerin kimyası, teknoloji Alkali ile aktive olan çimentoların fırsatları ve zorlukları
Roy	1999	
Palomo	1999	Alkali ile aktifleştirilen uçucu kül – geleceğin çimentosu
Puertas	2000	Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül/cüruf çimentosu
Palomo and Palacios	2003	Tehlikeli atıkların immobilizasyonu
Duxon	2007	Geopolimer teknolojisi: son teknoloji Geopolimerler: yapı, işleme, özellikler ve endüstriyel uygulamalar
Provis and van Deventer	2009	

Geopolimer teknolojisindeki araştırmalar, geleneksel betona göre avantajlarından ve geniş kullanım alanı sunabilmesinden dolayı son 30 yılda belirgin bir şekilde artmıştır. Konu ile ilgili çalışan laboratuvar sayılarındaki artışların dünya genelinde görünümü şekil 2.2.'de verilmiştir [37].



şekil 2.2. Geopolimer araştırma laboratuvarlarının yıllara göre artışı [37]

Web of Science verilerine göre “geopolimer” kavramını içeren 9127 yayın bulunmaktadır [38] ve bu yayınların 5988’i inşaat mühendisliği alanıyla ilgili yayınlardır [39]. “Geopolimer” kavramsal olarak ortaya çıktığından beri dikkat çeken bir araştırma alanı haline gelmiş ve son yıllarda geopolimer üzerine yapılan çalışmaların sayısı önemli bir artış göstermiştir. Şekil 2.3.’te [40] geopolimer konusundaki araştırma sayılarının yıllara göre artış miktarı verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere geopolimer konusundaki yayın sayısı her yıl artış göstermiş ve 2021 yılında en yüksek sayıya ulaşılmıştır. Bilimsel yayın sayısındaki bu durum geopolimer araştırmalarının güncel ve ilgi çeken bir konu olduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır.

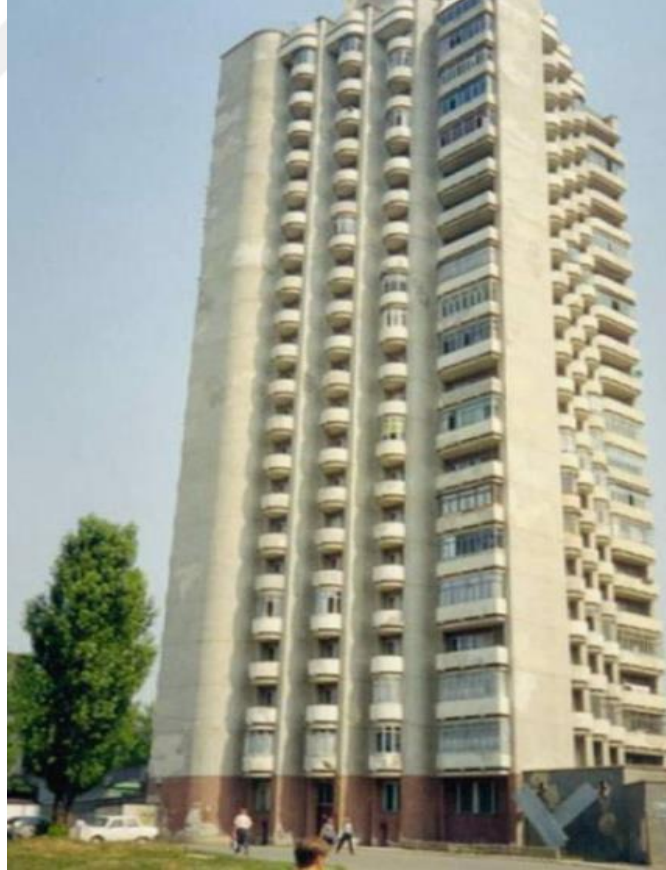


Şekil 2.3. 1990 – 2023 arasında yıl bazında “Geopolimer” kavramı ile yayımlanan yayın sayıları [40]

İnşaat alanında, 2013 yılında tamamlanan Avustralya’daki Queensland Üniversitesi’nin Küresel Değişim Enstitüsü binası (Şekil 2.4.) uçucu kül bazlı geopolimer beton kullanılarak inşa edilen ilk yapı olarak bilinse de [41] bazı araştırmacılar [18,42,43] 24 katlı bir apartmanın (Şekil 2.5.) cürufllu alkali aktifleştirilmiş çimentosuz kompozitler ile 1986 – 1994 yılları arasında Rusya’nın Lipetsk bölgesinde yapıldığından da söz etmişlerdir.



Şekil 2.4. Uçucu kül bazlı geopolimer ile üretilen Queensland Üniversitesi Küresel Değişim Enstitüsü [41]

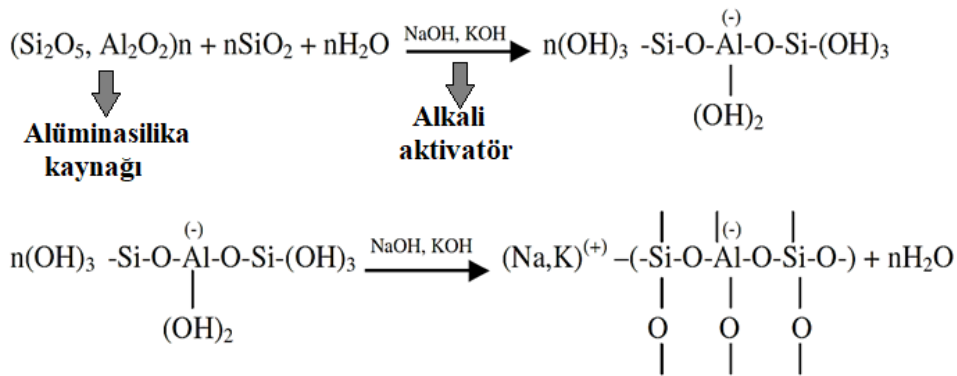


Şekil 2.5. Rusya, Lipetsk'te 1994 yılında alkali aktif cüruf betonu ile inşa edilen 24 katlı bina [18,42,43]

2.2. Geopolimer Kimyası ve Geopolimerizasyon

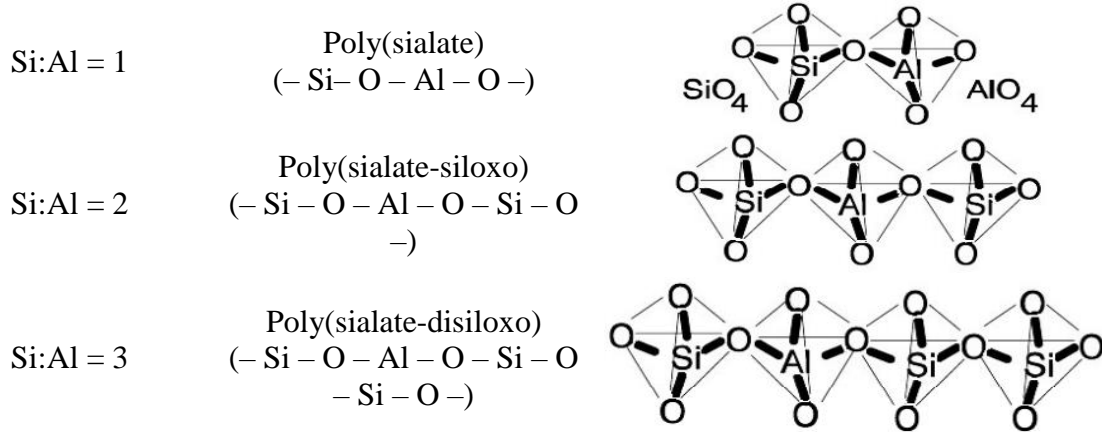
Uçucu kül bazlı geopolimerler, uçucu küldeki alümina ve silika oksitlerinin sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisinde çözülerek üretilen N-A-S-H jel yapısını oluşturması ile dayanım kazanmaktadırlar [44]. Bazı araştırmacılar, sodyum silikattan gelen SiO₂'nin yüksek çözünebilir silika olduğunu ve sonuçta N-A-S-H jeline hızlı bir şekilde dahil olabileceğini ve bu nedenle SiO₂ içeren alkali çözeltilerin, sodyum hidroksit içeren alkali çözeltilere kıyasla geopolimerizasyon hızının arttığını ifade etmişlerdir [45]. Geopolimer sentezinde genel olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımından elde edilen alkali bir aktivatör kullanımı, sodyum hidroksitin minerallerin potasyum hidroksite göre daha fazla çözünebilmesinden dolayı tavsiye edilmektedir [46,47].

Geopolimerizasyon, yüksek alkali ortamda moleküllerin çözünme taşınma ve polikondenzasyon hareketlerini kapsayan ekzotermik bir kimyasal prosestir. Geopolimerlerin sentezi polikondenzasyon ile gerçekleşir ve çeşitli siliko-alüminatlardan başlayabilir. Polikondenzasyon reaksiyonu, geopolimerlerin ham maddesindeki Si-O-Si yapısının, geopolimerlerin mekanik özelliklerini belirleyen Al-O-Si yapısına dönüşümü olarak nitelendirilmektedir. Geopolimerizasyon, Silis ve Alümin atomlarının Oksijen atomları ile elektronlarını paylaşması ve kovalent bağlı bileşik oluşturması esasına dayanır. SiO₂ atomları oldukça kararlı bileşikler olmasına karşın alkali ortamda üç boyutlu ağ yapısı zayıflayarak geopolimerlerin ana bileşiği olan kovalent bağlı Si-O-Al ve Si-O-Si gibi sialatları oluşturarak geopolimerizasyon ilerler (Şekil 2.6.). Ham maddeye uygulanabilecek olan 100 °C'ye kadar ısıtma ile geopolimerizasyon süreci hızlandırılabilen ve tepkimeye giren sialat miktarları artırılabilir [48-51].



Şekil 2.6. Geopolimerizasyon denklemi [48]

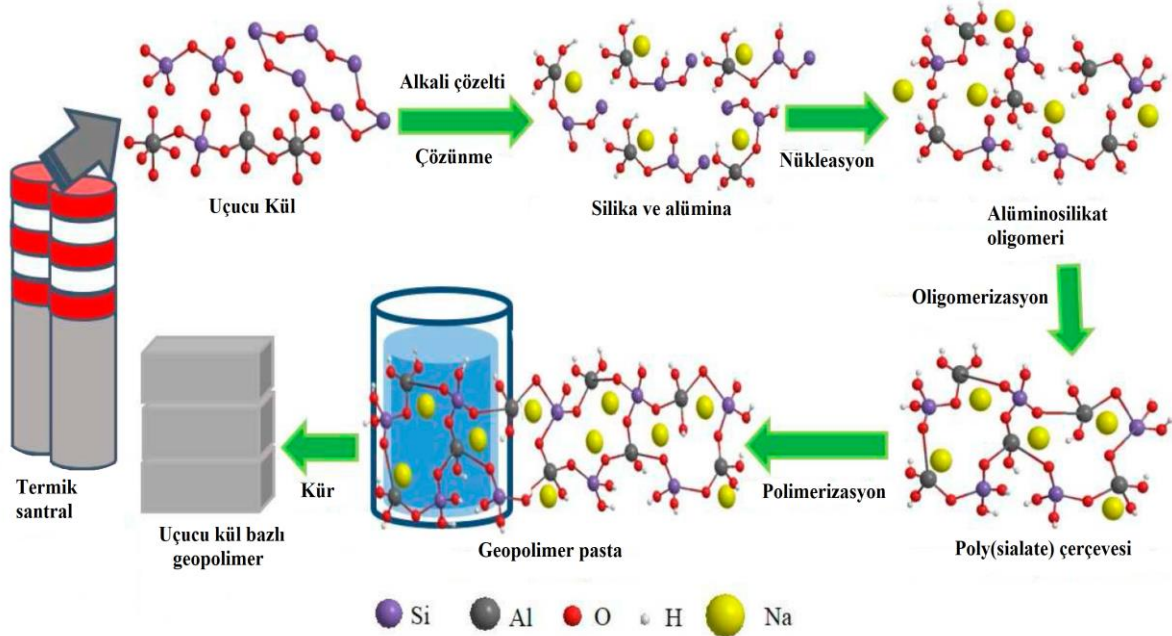
Şekil 2.6.'da alüminosilikat oksitler bazik bir ortamda polimerik Si-O-Al-O bağları oluşturmak üzere reaksiyona girdiğinde geopolimerlerin nasıl oluşturulduğu yer almaktadır. Silikon ve alüminyum, bir alkali metal tuzu veya hidroksit kullanılarak çözülmelidir. Bireysel alümina ve silikat birimleri, oldukça reaktif ara jel fazı oluşturmak için kopolimerize olur. Alüminosilikat minerallerinin çözünmesi, geopolimerizasyonun en önemli aşamasıdır ve jel oluşumu, çözünmenin büyüklüğünden etkilenir. Alkali çözelti ve alüminosilikat katıları etkileşime girerek yüzeylerinde bir jel fazının oluşmasına neden olur. Jel fazı sertleştiğinde, ayrı alüminosilikat parçacıkları birbiriyle bağlanır çünkü jel, parçacık yüzeyinden diğer parçacıklar arasındaki boşluklara yayılır. Geleneksel Portland çimentolarından farklı olarak, geopolimerler, yapısal mukavemet elde etmek için polikondenzasyon ve yüksek alkali içerikli silika ve alümina öncüleri kullanır. Geopolimerizasyon işlemi, alümino-silikat oksitlerin alkali polisilikatlar ile polimerik Si-O-Al bağları veren kimyasal reaksiyonu (polikondenzasyon) sonucu oluşur. Davidovits, siliko-alüminat bazlı geopolimerlerin kimyasal tanımı için 'poli(sialate)' teriminin kullanılmasını önermiştir. Sialat, silikon-okso-alüminatın kısaltmasıdır. Polisilikatlar genellikle kimya endüstrisinden temin edilen sodyum veya potasyum silikat veya ferro-silikon metalürjisinin bir yan ürünü olarak üretilen ince silika tozudur. Şekil 2.7.'de, polikondenzasyonun bir örneği gösterilmiştir [52-55].



Şekil 2.7. Polikondenzasyon örneği [53]

Geopolimer prosesi bir füzyon sinterleme ya da eritme işlemi değil polimerleşme sürecidir. Geopolimer özellikle Si-Al-Mg-Ca-P-K-Na gibi mineral moleküllerini içeren monomerlerin birbirleri arasında polikondenzasyon sonucu oluşan kovalent kompleks zincir bağlı polimerler

kurması ile oluşur. Şekil 2.8’de geopolimer betonun termik santralden alınan uçucu külden başlayarak geopolimerizasyon mekanizması verilmiştir [56].



Şekil 2.8. Geopolimerizasyon mekanizması [56]

Şekil 2.8.’deki geopolimerizasyon mekanizmasına göre; termik santralden elde edilen alüminosilikat kaynağı uçucu kül, alkali aktivatörler yardımı ile Şekil 2.6’da verilen geopolimerizasyon denklemi çerçevesinde çözünerek silika ve alümina birimlerine ayrılır. Nükleasyon (çekirdeklenme – faz değişimi – jel oluşumu) denilen bir tepkime sonucunda alüminosilikat oligomeri (sınırlı sayıda monomer içeren yapı) oluşur ve bu oligomerler polimerizasyon tepkimesi ile birlikte geopolimerin kimyasal çerçevesini oluşturur. Oluşturulan bu çerçevede kür uygulamaları ile dayanım kazanılmakta ve uygulamaya hazır hale gelmektedir.

Yuan vd., [57] geopolimerizasyon mekanizması için kaynak materyal olarak yeterli miktarda silika ve alümina içeren neredeyse her malzemenin kaynak malzeme olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Geopolimerin en iyi özellikler gösterdiği ürünler ise 750 °C’de kalsine olmuş metakaolinit kilinin alkali tuz ve alkali silikatlar ile aktive edilmesi ile elde edilen çözeltisinin, düşük ısıda (40–100 °C) fırınlanmasıyla elde edilir [56].

2.2.1. Geopolimerizasyonu etkileyen faktörler

Geopolimerlerin basınç dayanımları farklı bağlayıcı ve aktivatör ile değişebilmektedir [59]. Geopolimer harçların maliyeti; yer, kalite ve atık ürünlerin maliyetine göre farklılık göstermektedir [60]. Geopolimerizasyon işlemi aynı zamanda başlangıç malzemelerinin kimyasal ve mineralojik bileşimi, kütleme sıcaklığı, su içeriği, alkali bileşik konsantrasyonu vb. gibi birçok parametreye bağlıdır [61]. Birkaç yazar, geopolimerlerin nihai özelliklerinin, alüminosilikat bileşiğinin doğası ve hazırlanması, işleme süreci, aktivasyon çözeltisi içindeki alkali katyonların doğası, konsantrasyonu ve sertleşme koşulları (sıcaklık, higrometri ve zaman) ile güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu göstermiştir [62-64].

Geopolimerizasyon tepkimesi optimum kullanılan alkali aktivatör ve silikat kaynağına bağlı olarak belirli sıcaklık değerlerinden ve bu sıcaklık değerinin kür süresinden de etkilenmektedir. Atiş vd. [65], sodyum hidroksit ile aktifleştirilmiş uçucu kül bazlı geopolimerlerin ısıl kür ve ortam küründe dayanım gelişimini inceledikleri çalışmada 75°C'de 24 saat ısıl kür uyguladıkları F sınıfı uçucu kül bazlı geopolimer numunelerinin ortam koşullarında 6 ay boyunca bekletilen ve aralıklı dayanımları incelenen numunelerin dayanımından her zaman yüksek bulmuşlardır. Çelikten ve Atabey [66], bazalt taşı kesim atıkları ile üretilen geopolimer harçların mekanik ve fiziksel özelliklerini araştırdıkları çalışmalarında ürettikleri geopolimer numunelere 90°C sabit sıcaklıkta 4 saat, 8 saat ve 24 saat olacak şekilde 3 farklı sürede ısıl kür uygulamışlardır. Çalışma sonucunda 4 saat ısıl kür uygulanan numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarını 8,1 MPa, 8 saat ısıl kür uygulanan numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarını 17,7 MPa ve 24 saat ısıl kür uygulanan numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarını 28,6 MPa olarak bulmuş ve harç dayanımlarının ısıl kür süresine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Alkali silikat solüsyonunda çözülmüş birimlerin polimerize olduğu miktar, büyük ölçüde SiO₂/Na₂O oranına bağlıdır. Öte yandan, güçlü mekanik özelliklere ve dar deliklere sahip geopolimerler oluşturmak için bazı uçucu kül sistemlerinin aktivasyon çözeltisinde önemli konsantrasyonlarda silikon gerektirdiği bilinmektedir [31].

Özetle, geopolimerizasyon işlemi, üretimde kullanılan alüminosilikat kaynağına, kür uygulama tipine, kür sıcaklığına ve uygulanma süresine ve malzeme oranlarına (H₂O/Na₂O, Na₂O/SiO₂, SiO₂/Al₂O₃) bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

2.3. Geopolimerin Avantajları ve Dezavantajları

Geopolimerleşme işlemi ile meydana gelen kompozitler, geleneksel çimentolu kompozitlere göre çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlardan en önemlileri, CO₂ emisyonunun yüksek oranda azaltılması, depolama ve bertaraf sorunu teşkil eden endüstriyel atıklara kullanım alanı sunması sayılabilir. Endüstriyel atıkların bertarafının yanı sıra son zamanlarda inşaat yıkıntı atıklarının geopolimer kompozitler ile geri dönüştürülmesi konusu da bu konunun bir avantajı olarak görülmektedir [67]. Aynı zamanda geopolimerlerin, hızlı kür ile mekanik özellikleri hızlı bir şekilde kazanabilmesi, çevresel – kimyasal etkilere karşı yüksek dayanıklılık göstermesi, yüksek sıcaklık direncine ve daha düşük geçirgenliğe sahip olması bakımından birçok avantajı bulunmaktadır [68].

Geopolimerlerin sunduğu birçok avantaja rağmen geniş ölçekteki uygulamalarda geopolimerler de bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Üretim aşamasında kullanılan alkali çözeltiler, agresif ve aşındırıcıdır, kullanıcı dostu değildir ve ele alınması zordur [69]. Geleneksel çimentolu kompozitlere göre sahip olduğu birçok avantaja karşın geopolimerlerin, kürlenme döngüsü ve yavaş dayanım/dayanıklılık kazanma gibi dezavantajlara sahip olması endüstriyel uygulamalarda da yaygınlaşmasının önünde temel bir engel teşkil etmektedir. Ayrıca prefabrik eleman üretimi dışında direkt olarak ısı kür uygulamasının şantiyede oluşturabileceği zorluk da geopolimer üretimi açısından dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.4. Geopolimerlerin Kullanım Alanları

Geopolimer malzemelerin kullanım alanları otomotiv, metalürji, havacılık ve inşaat sektörleri gibi geniş bir uygulama alanına sahip olup kullanım alanları ve uygulama tipi geopolimer yapısında bulunun polisialattaki Si/Al atomik oranına bağlıdır [52]. Davidovits [28], kullanım alanlarına göre uygulama tiplerini bu atomik orana göre Tablo 2.2.'de de görüleceği üzere 4 grupta sınıflandırmıştır. Düşük Si/Al atomik oranındaki (Si/Al: 1 – 2 – 3) geopolimerler, sert üç boyutlu ağ yapısı oluştururken Si/Al oranının 15'ten yüksek olması ile birlikte geopolimerik malzemeye polimerik bir karakter katar. Tablo 2.2.'de Si/Al atom oranına göre geopolimerlerin inşaat mühendisliği alanında kullanım alanları gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Si/Al oranına göre geopolimerlerin inşaat mühendisliği alanında kullanım alanları [28]

	Si/Al	Kullanım alanı
Düşük Si/Al Oranı	1	Tuğla Seramik Yangına Dayanıklı Yapı
	2	Düşük CO ₂ 'li çimentolar ve betonlar Radyoaktif ve zehirli atık muhafazası Yangın koruma ve cam elyaf kompozitleri
	3	Dökümhane ekipmanları Isıya dayanıklı kompozitler (200 – 1000°C)
Yüksek Si/Al Oranı	>3	Endüstriyel sızdırmazlık ürünleri (200 – 600°C)
	>15	Yangına ve ısıya dayanıklı fiber kompozitler

Geopolimer betonlar, genel olarak yüksek sıcaklığa dayanabilen yapısal betonlarda, duvar ve kaldırım blok elemanlarında, beton büzlerde, petrol kuyularında, gaz beton uygulamalarında ve özellikle ısı kütlesi ile hızlı erken dayanım kazanabilmesi özelliğinden dolayı prefabrik eleman üretiminde kullanılabilir [70]. Ayrıca 3D beton yazıcılar yardımı ile geopolimer üretimi de Türkiye’de ve dünyada son zamanlarda inşaat alanında yaygın bir konu haline gelmiştir. Buna örnek uygulamalar Şekil 2.9.’da gösterilmiştir [71,72].



Şekil 2.9. 3D beton yazıcı ile geopolimer yapı üretimi (a: inşaat yıkıntı atıkları ile üretilen 3D geopolimer, b: geleneksel yöntemlerle üretilen 3D geopolimer) [71,72]

Geopolimerler yalnızca inşaat sektöründe değil farklı alanlarda da (Şekil 2.10.) kullanılmaktadır. Arkeoloji alanında restorasyon çalışmalarında, havacılık alanında kompozit malzeme üretiminde ve boyacılık, kaplama işleri gibi pek çok farklı sektörde birden çok alanda aktif bir şekilde kullanılmaktadır [73,74].



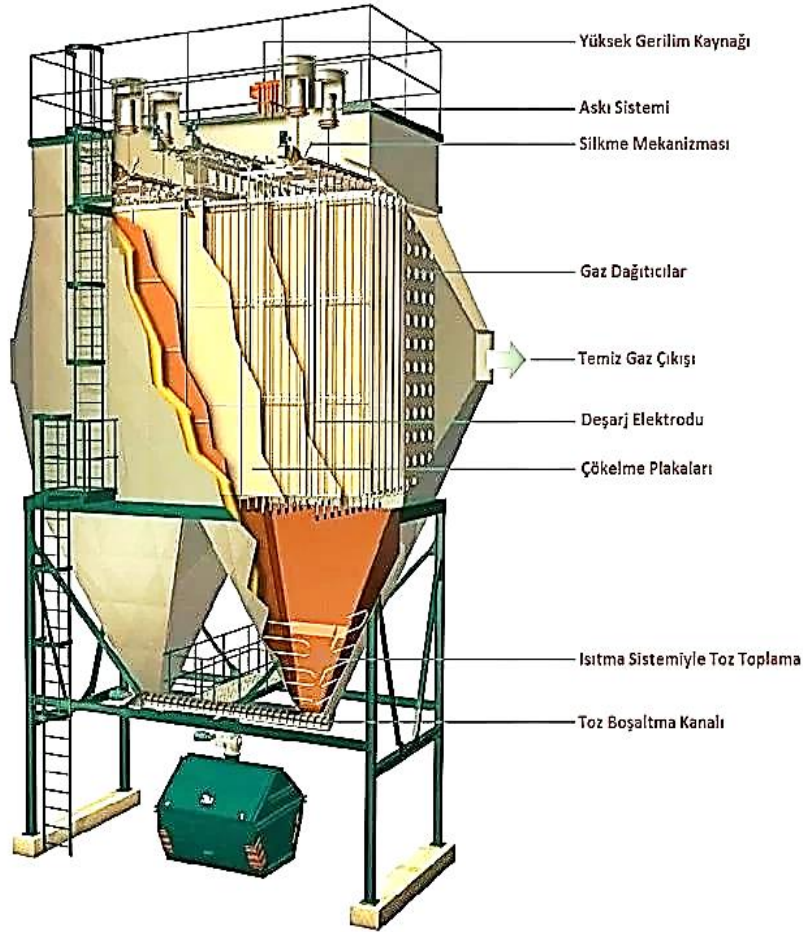
Şekil 2.10. Geopolimer malzeme kullanım alanları [73,74]

2.5. Uçucu Kül

Geopolimer harç/beton üretiminde en temel bileşenler alüminosilikat kaynağı bir toz malzeme, bir çeşit alkali aktivatör ve geleneksel betonda kullanılan agrega, kimyasal katı vb. benzeri malzemelerdir. Geopolimer esaslı bağlayıcı içeren harçlarda/betonlarda geleneksel betondan en temek ayrılan özellik hamur fazıdır. Geopolimerizasyon ile üretilen hamur fazında alümino silikat kaynağı olarak en çok kullanılan malzemelerden biri endüstriyel atık olan uçucu küldür.

Uçucu kül, toz halindeki kömürün yakılması ile termal enerji santrallerindeki enerji üretimi esnasında elde edilen parçalanmış, ince atıklardır. Her sene 900 milyon tonun üzerinde uçucu kül üretilmekte ve bunların yaklaşık olarak %43'ü Portland çimento üretiminde geri dönüşüm olarak kullanılmaktadır [75,76]. Uçucu kül, esas olarak kömürle çalışan enerji üretiminden üretilen zehirli bir atık malzemedir. Elektrik üretmek için bir kazanda ince öğütülmüş kömürün yakılmasıyla üretilir ve bir partikül kontrol cihazı (örneğin, elektrostatik çöktürücüler veya kumaş filtreler) aracılığıyla bir elektrik santralının bacasında tutulur. Uçucu kül çoğunlukla silt boyutunda ve kil boyutunda camsı kürelerden oluşur ve ona talk pudrası gibi bir kıvam verir. [77]. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre; Termik santrallerde 14 bin tonu tehlikeli olmak üzere toplam 26,1 milyon ton atık oluşmuştur. Toplam atığın %89,2'sini kül ve cüruf atıkları oluşturmaktadır. Toplam atığın %87,5'i kül dağı, kül barajı veya düzenli depolama tesislerinde bertaraf edilirken, %12,4'ü lisanslı atık işleme tesislerine gönderilmiş ve maden/taş ocaklarının geri doldurulmasında kullanılmış, %0,1'i ise diğer yöntemlerle bertaraf edilmiştir

[78]. Uçucu külün fiziksel, kimyasal, mineralojik ve puzolanik özelliklerinin en belirgin ortak yanı, bunların yöreden yöreye, hatta aynı yörede dahi değişkenlik göstermeleridir. Bu değişkenlik; yakılan kömür tipine, kömürün öğütülme derecesine, yakılan kazan tipine, yakma sıcaklığı ve toplama (Şekil 2.11.) tipi gibi parametrelere bağlıdır [79-81].



Şekil 2.11. Elektrofiltre ile uçucu kül tutulması [81]

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır [82,83]. ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıfı olmak üzere iki sınıfta incelenmektedir. F sınıfı uçucu küller, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazla, CaO yüzdesi %10'un altında olan, puzolanik özelliğe sahip küllerdir. C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla, CaO yüzdesi %10'un üstünde olan, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahip küllerdir. TS EN 197-1 standardına göre de uçucu küller V ve W sınıfı olmak üzere iki sınıfta incelenmektedir.

V sınıfı (Silissi) uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel tanecikli olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı (Kalkersi) küller ise, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25'den fazla olması gerekmektedir. Uçucu külde reaktif silis ve reaktif kireç, çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan ve dayanım gelişiminde önemli rolü olan kalsiyum silikat hidrat jeli oluşturan silisyum ve kalsiyum oksitleri temsil etmektedir. Özellikle reaktif silis, külün aktif bileşeni olup, puzolanik reaksiyonlara girmek üzere, alkali ortamda çözünen silistir [83-85].

Dünyada uçucu küllerin depolanması ve bertarafı konusunda çalışmalar yapan ve bu alanda yenilikçi çözümler üreten birçok ülkede endüstriyel atık olarak üretilen uçucu küllerin %80'i çimento ve çimentolu kompozit üretiminde kullanılarak bertaraf edilirken ülkemizde bu kullanım %2-3 arasında sınırlı kalmıştır. Uçucu küllerin fiziksel, kimyasal özellikleri ve kullanıma elverişli radyoaktivite değerleri göz önüne alındığında, bu malzemelerin inşaat sektöründe çimento (hammadde veya ikame malzemesi olarak), çimentolu kompozitler (katkı olarak), agrega (iri agrega, ince agrega ve hafif agrega olarak) olarak kullanılmasının yanı sıra yol yapım çalışmalarında ve hidratasyon ısını düşürebilmesi sayesinde kütle beton olarak nitelendirilen baraj yapıların yapımında, gaz beton ve tuğla üretiminde, kompozit malzemesi üretiminde ve geoteknik alanlarında kullanıldığı görülmektedir [86,87].

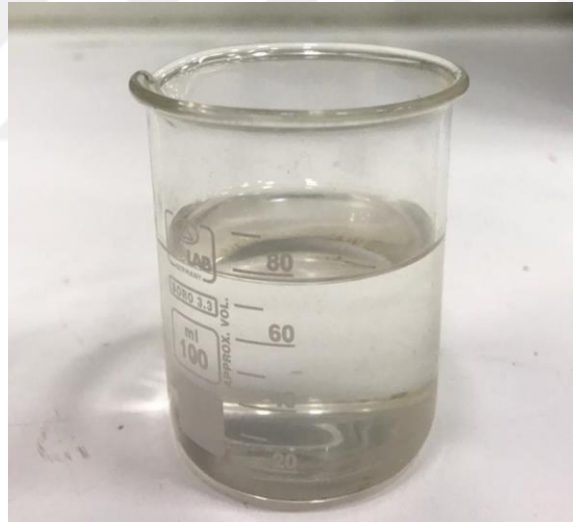
2.6. Alkali aktivatör

Günümüze kadar yapılan araştırmalarda kaolinitik killeri, metakaolin, uçucu kül, kırmızı çamur, zeolit gibi malzemelerin aktivasyonunda en yaygın olarak kullanılan aktivatörler, sodyum veya potasyum hidroksit (KOH , NaOH) ile cam suyu (Na_2SiO_3) veya potasyum cam suyu ($\text{nSiO}_2\text{K}_2\text{O}$) karışımıdır [88]. Na_2SiO_3 ve NaOH gibi geleneksel, yüksek alkaliteli aktivatörler yerine Na_2CO_3 , Na_2SO_4 ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gibi nötre yakın veya düşük alkaliteye sahip alkali aktivatörlerin kullanılmasının daha az enerji tüketimine ve daha az CO_2 emisyonuna katkıda bulunacağı tartışılmaktadır. Ancak geopolimer üretiminde bu aktivatörlerin kullanılması sodyum silikat ile üretilen geopolimerlere göre oldukça uzun süren priz gerektirmektedir. [89,90]. Jimenez vd. [91], yapmış oldukları çalışmalarında, Na_2SiO_3 'ün geopolimerleşme

sırasında Si atomu ile reaksiyon ürünlerini arttırdığı gerekçesi ile Na_2SiO_3 'ün NaOH ile kombinasyonundan oluşan aktivatör çözeltisi hazırlamışlardır. Çalışma sonucunda da hazırladıkları aktivatör ile üretmiş oldukları geopolimerlerde daha iyi bir basınç dayanımı elde etmişlerdir. Geopolimer üretiminde kullanılan diğer alkali aktivatörlerin aksine sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktivatör üretimi çalışmaları ağırlıktadır. Sodyum silikat ve sodyum hidroksite genel bir bakış olarak alt başlıklar verilmiştir.

2.6.1. Sodyum silikat

Su camı olarak da bilinen suda çözünür bir cam türü olan sodyum silikat, geopolimer harç ve betonun üretiminde endüstriyel atıkları etkinleştirmek için kullanılır. Yüksek sıcaklıkta erir. Özellikle seramik endüstrisinde yaygındır [92]. Şekil 2.12.'de gösterilen sodyum silikat, refrakter malzemelerde, otomotiv sanayinde, ağaç işleme sanayinde, tekstil sanayisinde ve çimento sanayinde betonların priz alması ve dayanım kazanması ile asit geçirmez yapıya sahip olması işlemlerinde sıklıkla kullanılan bir malzemedir [93,94].

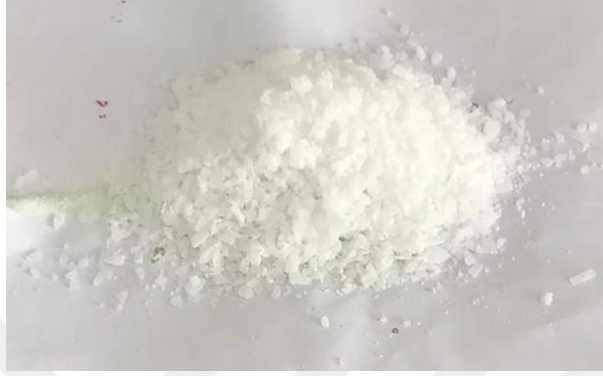


Şekil 2.12. Sodyum silikat

2.6.2. Sodyum hidroksit

1807 yılında Humphrey Day tarafından İngiltere’de keşfedilen ve bir diğer adı “kostik” olan sodyum hidroksit (NaOH), basit sofr tuzunun elektrolizi ile %50’lik çözelti şeklinde üretilmektedir. Su içerisinde kolay bir şekilde çözünebilen sodyum hidroksit kimya, tekstil, kâğıt üretimi, boya üretimi, deterjan üretimi ve alüminyum üretimi gibi birçok alanda aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Güçlü bir yağ alabilme kabiliyeti paslanmaz çeliklerde kullanılır [95]. Sodyum hidroksit çözeltisinin sıvı hali renksizdir, katı formda olanları payet ve boncuk

görünümlüdür. Su ile karşılaştırıldığında, önemli ölçüde daha konsantredir. Mukoza zarları, cilt ve göz teması halinde aşırı derecede tahriş edici olabilmektedir. Yutulması halinde zehirlidir. Ayrıca pH kontrol elemanı olarak da kullanılmaktadır [96]. Şekil 2.13.'te kristal şekilde (payet) sodyum hidroksit örneği görülebilmektedir.



Şekil 2.13. Sodyum hidroksit

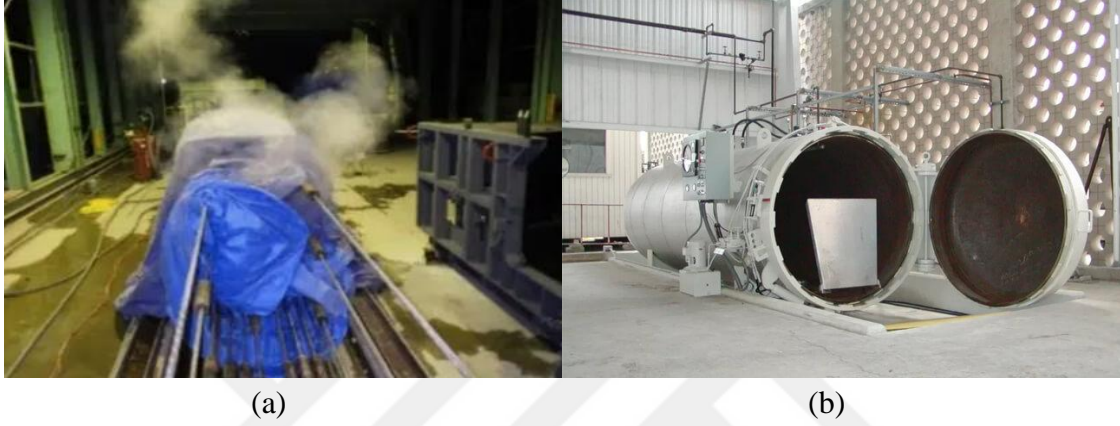
2.7. Beton Üretiminde Kullanılan Kür Yöntemleri

Betonların erken priz ve dayanım kazanması, kalıptan erken alınması gereken durumlarda çeşitli hızlandırılmış kür yöntemleri mevcuttur. Bunlar genel olarak buhar kürü ve ısıl kür olarak bilinmekle birlikte elektriksel kür yöntemi de son zamanlarda beton üretiminde kullanılmaya başlanan yeni diyebileceğimiz bir kür yöntemidir. Geopolimer harç ve betonlar laboratuvar ortamında geleneksel çimentolu kompozitlere göre çok yavaş dayanım kazanırlar. Bu yüzden hızlandırılmış kür yöntemlerinin kullanılması geopolimer harç ve beton üretiminde daha hızlı sonuç vermektedir. Bu şekilde çimentolu kompozitlerin aksine, geopolimerler daha hızlı dayanım kazanabilirler. Yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, yalnızca 4 saatlik kür uygulanması geopolimer yapıların dayanımlarının %70'ine ulaşabilmeleri için yeterli olabildiği görülmektedir [97,98].

2.7.1. Buhar kürü

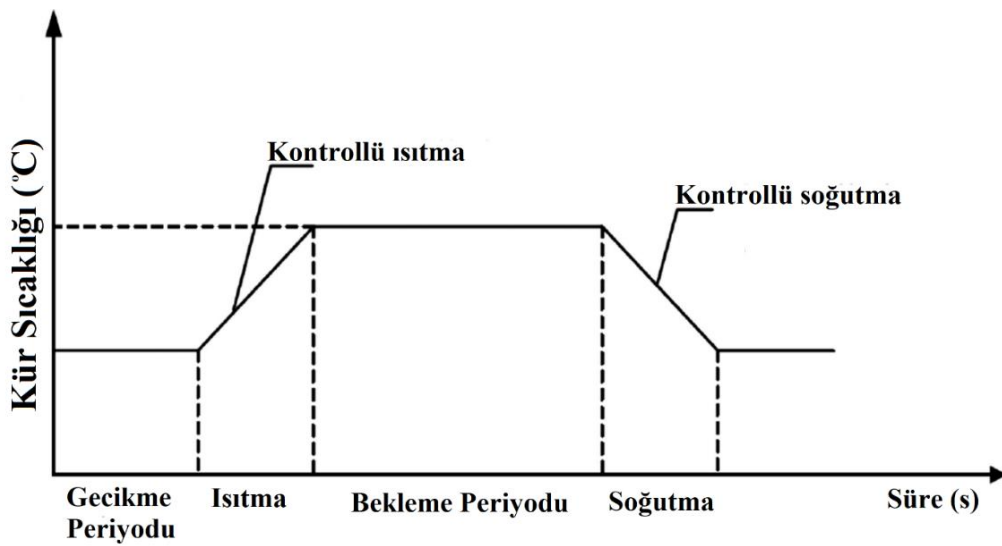
Buhar kürü, atmosfer basınçlı ve yüksek basınçlı (otoklav) kür olmak üzere iki şekilde uygulanabilmektedir. Atmosfer basınçlı buhar kürü (Şekil 2.14.a.) genellikle prefabrik yapılarda ve soğuk havalarda, yapının etrafı kapatılarak uygulanan bir yöntemdir. Otoklav kürü (Şekil 2.14.b.) ise, silindir şeklinde çelik duvarları olan özel bir buhar kürü makinesidir ve çok yüksek erken dayanımın gerekli olduğu küçük boyutlu yapılara uygulanmaktadır. Otoklav ile 28 günlük su kürü uygulanmış standart dayanıma 14 – 24 saat aralığında erişilebilmektedir.

Ayrıca Uygunoğlu ve Önal [99], buhar kürü uygulanmış pomzalı hafif betonun özelliklerini inceledikleri çalışmalarında otoklav krnn 8-10 saat aralığında en iyi fiziksel ve mekanik özellik kazandırdığını belirtmişlerdir. Otoklav kürü uygulamasında, hidrasyon tepkimesi sonucu oluşan ürünleri güçlendirmek ve mikro boşlukları doldurmak amacıyla SiO_2 kaynağı gereksinimi vardır. Otoklav kürü yöntemi, ekonomik olarak atmosfer basıncılı buhar krne göre daha pahalı bir yöntem olduğu için nadiren kullanılmaktadır.



şekil 2.14. Buhar kürü uygulaması (a: Atmosferik buhar kürü, b: Basıncılı buhar kürü) [101]

Atmosferik buhar kürü uygulaması bekleme süresi, kontrollü sıcaklık artışı süresi, maksimum kr sıcaklığının sabit tutulduğu süre ve kontrollü olarak soğutma süresi olarak dört ana süreç şeklinde (şekil 2.15.) uygulanmaktadır [100].



şekil 2.15. Atmosferik buhar kürü uygulamasının temel süreçleri [100]

Bu sürelerin uygulanması betonun erken ve ileri yaş dayanımını önemli derecede etkileyeceğinden doğru bir şekilde uygulanması önemlidir. Bu yüzden ısıtma, bekletme ve soğutma süreçlerinin TS EN 13369 “Öndökümlü Beton Mamuller – Genel Kurallar” standardına uygun olarak yapılması gerekmektedir [101-107]. Geleneksel portland çimentolu kompozitlere erken yaşlarda yüksek dayanım kazandırabilme amacı ile kullanılan buhar kürü uygulaması, geopolimer harç ve betonların mukavemet gelişiminde etkili olan geopolimerizasyon sürecinin hızlanması adına da kullanılabilir.

Yaprak ve ark. [108], sodyum silikat ve sodyum hidroksiti alkali aktivatör olarak kullandıkları çalışmalarında, Öğütülmüş Granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve atık cam tozu içeren 40x40x160 mm’lik harç numunelerinin 6 saat, 12 saat ve 24 saat süreler ile 85°C buhar kürü altında dayanımlarını incelemişlerdir. Çalışma sonucu olarak, 85 °C buhar kürü için 12 saatlik bir sürenin yeterli olduğunu, 24 saatlik kürlemede eğilme dayanımı ise 6 saat ve 12 saatin altındakilere göre daha yüksek çıktığını ortaya koymuşlardır. Jiao ve ark. [109], buhar kürü uygulanarak üretilen ve C Sınıfı uçucu kül, F Sınıfı uçucu kül, cüruf ve Ca(OH)₂ içeren geopolimerin donma – çözülme etkisi altında davranışını incelemişlerdir. Buhar kürü uygulamasının mekanik performans bakımından standart küre göre daha iyi sonuçlar verdiğini, buhar kürü uygulamasının C sınıfı uçucu kül ile üretilen geopolimer harcın ve standart kürleme koşulunda F Sınıfı uçucu kül – cüruf geopolimer harcının dikkate değer bir donma – çözülme direnci sergilediklerini ifade etmişlerdir. Mayhoub ve ark. [110], %1, %2 ve %4 olarak değişen klorür (NaCl) içeriklerinin uçucu kül bazlı geopolimer pastalarına normal, etüv, buhar ve mikrodalga kürleme koşulları altında bağlanma kapasitelerini inceledikleri çalışmalarında, Uçucu kül bazlı geopolimer betonda buhar kürü ve mikrodalga kürü altında serbest klorür iyonlarının bağlanması yoluyla klorür girişinin özellikle daha iyi kontrol edilebileceği sonucuna varmışlardır.

2.7.2. Isıl kür

Özellikle prefabrik yapı elemanları üretiminde yapı elemanının nihai dayanım özelliklerine erken yaşlarda ulaşabilmesi amacı ile uygulanan kür yöntemidir. Geopolimer harç ve betonların laboratuvar ortamlarında priz almasının zor olması, geopolimerizasyon işlemi için gerekli ısı gibi nedenlerden dolayı bu alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Geopolimer beton uygulamalarında, numunenin hidrasyon sürecini hızlandıran, mukavemet gelişimlerini iyileştirmek için en uygun yaklaşım olarak yüksek sıcaklıkta kürleme gereksinimi

duyulmaktadır [111]. Krleme sıcaklığının optimum bir seviyeye kadar artırılması geopolimerizasyon işlemine katkıda bulunur. Sıcaklık artışı, geopolimerizasyon tepkimesindeki reaktif birimlerin çözünmesini sağlar ve reaksiyonların ilerlemesi ve hızlanmasına yardımcı olur [112]. Bu konuda yapılan birçok çalışma gibi Okoye vd. [113], yaptıkları çalışmada geopolimer betonlarda 100 °C’de en iyi basınç dayanımı verdiğini bu değere kadar olan ısı artışılarında basınç dayanımında artışıların, daha yüksek sıcaklıklarda ise basınç dayanımı değerinde düşüş meydana geldiğini ortaya koymuşlardır. Isıl kür işlemi, etüv olarak bilinen laboratuvar fırınlarında gerçekleştirilir. Etüv, tipine göre belirli sıcaklık ve süreye ayarlanarak çok amaçlı ısıtma ve kurutma işlemlerinde kullanılır [114]. Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji niversitesi geoteknik laboratuvarında kullanılan etüv Şekil 2.16.’da örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Laboratuvarlarda kullanılan etüv

2.7.3. Elektriksel kr

Hızlandırılmış kr yöntemlerinden olan elektriksel kr uygulanması yöntemi, taze haldeyken betonlara faklı gerilim değerlerinin uygulanması esasına dayanır. Normal portland imento ile hazırlanan betonlarda, taze halde içerisinde bulunan suyun iletkenliği ve imento ile ikameli olarak eklenen karbon siyahı vb. iletkenliğin artmasına yardımcı malzemeler sayesinde faklı gerilim değerlerinde elektrik verilerek imento hamurunun i sıcaklığının artırılması ve böylece dayanım – dayanıklılık kazandırılması yeni nesil bir yaklaşım olup elektriksel kr olarak adlandırılmaktadır.

Elektriksel kür uygulamalarında güç kaynağı olarak genellikle Alternatif Akım (AC) güç kaynağı kullanılmaktadır. AC güç kaynağının direnci, doğru akım (DC) direncinden biraz daha yüksek olmasına rağmen AC güç kaynağını, elektrotların iletken kaplamasının ısınmasında daha hızlıdır [115,116]. AC güç kaynağı aynı zamanda DC güç kaynağına oranla ısıtma işleminde daha yüksek enerji verimliliğine sahiptir. Buda AC güç kaynağının DC güç kaynağından daha yüksek ısıtma hızı sağlar [117,118]. Ayrıca DC akımın polarizasyon (kutuplaşma) etkisinden dolayı AC tercih edilmektedir.

Betonun taze halde iletken yapıda olmasından yararlanarak uygulanan gerilim betonda iç sıcaklık artışlarına sebep olmaktadır. Uygulanan gerilim yoğunluğuna göre sıcaklık artışları da değişiklik göstermektedir. Çalışmada uygulanması planlanan elektriksel kür deney düzeneği Şekil 2.17’de şematik olarak gösterilmiştir.

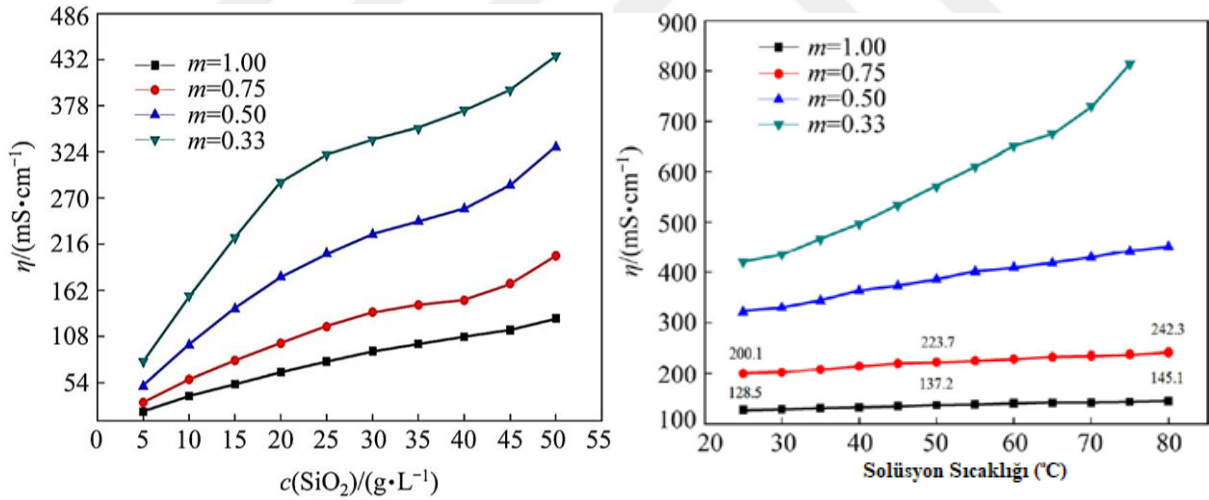


Şekil 2.17. Elektriksel kür deney düzeneği

Çimento esaslı malzemelerin kompozisyonu olarak meydana gelen beton, taze halde içeriğindeki sudan dolayı iletken bir davranış sergilemektedir. Ayrıca iyonların hareketliliği, elektrolit çözeltilerine iletkenliklerinin temel sebebidir. Elektrik iletkenliğine neden olan boşluk çözeltilerindeki bu iyon transferidir. Solvasyonun ve viskozitenin azalması nedeniyle sıcaklık

arttıkça iyonlar daha hızlı akar. Sıcaklık artışı ile birlikte elektrolitin iletkenliği artar. İyon transferinin hızlanması sonucunda harçlarda daha düşük elektriksel direnç değerleri üretilir. İyonik eşleşme, iyonik konsantrasyonlar azaldığında gerçekleşir. Bu iyonik kombinasyonlar, elektrik direncinde bir artışa neden olur [119-121]. Çimento pastalarında iyonik konsantrasyonların azalması ile birlikte iyonik birleşme meydana gelir ve meydana gelen iyonik birleşmeler neticesinde elemanın elektriksel öz direnci artmaktadır [122].

Lian ve ark. [123], alkali sistemdeki düşük modüllü sodyum silikat çözeltisinin özelliklerini inceledikleri çalışmalarında sodyum silikat çözeltisinin elektrik iletkenliğinin, sıcaklık ve silika konsantrasyonunun artmasıyla arttığını, ancak modülün artmasıyla azaldığını ifade etmişlerdir. Bu konuda yaptıkları çalışmalar gösteriyor ki; ortam sıcaklığında (25°C) silika konsantrasyonu elektriksel iletkenlikle doğru orantılı seyrederken, modülün artması ile birlikte elektrik iletkenliğinde azalma meydana gelmektedir (Şekil 2.18.a). Sıcaklık etkisinin silikat üzerinde elektriksel iletkenlik etkisi incelendiğinde de sabit konsantrasyonlu silika çözeltisinin elektriksel iletkenliği her modülde sıcaklık artışı ile artış göstermektedir (Şekil 2.18.b.).



(a): 25°C’de farklı modül ve farklı konsantrasyona sahip silika çözeltisinin elektriksel iletkenliği

(b): 20 – 80°C’de sabit konsantrasyon (50g/L) ve farklı modüle sahip silika çözeltisinin elektriksel iletkenliği

Şekil 2.18. Silika çözeltisinin elektrik iletkenliği [123]

Ukihashi [124], yüksek modüllü sodyum silikat çözeltisinin elektrik iletkenliğinin, artan silika konsantrasyonu ile başlangıçta arttığını ve ardından azaldığını göstermiştir.

Özet olarak; geopolimer harç ve betonların, geleneksel çimentolu kompozitlerle kıyaslandığında iyon hareketi, alkali ortam ve sodyum silikat çözeltisinin sahip olduğu yüksek iletkenlik kapasitesi ile daha iletken bir yapıda olacağı ve bu sayede daha düşük gerilim değerlerinde kür uygulanabileceği söylenebilir. Ayrıca harç ve beton numunesinden geçen elektrik akımı karşılaşacağı direnç sayesinde harç/beton numuneyi ısıtarak elektriksel iletkenliğin pik noktaya kadar artış göstermesine ve dayanım kazanmasına yardımcı olur.

2.8. Literatür Taraması

Literatür incelendiğinde, geopolimer betonların çeşitli aktivatörler ve alüminosilikat kaynakları ile üretilebildiği ve üretilen betonlara uygulanan farklı kür parametrelerinin bu betonların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisinin belirlenmesi konusunda kapsamlı deneysel çalışmalar yapıldığı görülmektedir.

Rameshwaran ve Madhavi [125], NaOH konsantrasyonunun 12 Mol olarak tutulduğu alkali aktivatör ve sodyum silikat solüsyon oranının 1:2,5 olduğu uçucu kül (UK) esaslı geopolimer betonun eğilme davranışını incelemiştir. Çimento yerine tamamen uçucu kül kullanılan çalışmada geopolimer betonun basınç dayanım değerini ortalama 42,61 N/mm²/28 gün olarak, eğilme dayanım değerini de ortalama 4,99 N/mm²/28 gün olarak bulmuşlardır. Bu sonuçlara göre geopolimer betonun normal portland çimento ile hazırlanan betonlara iyi bir alternatif olabileceği düşüncesini savunmuşlardır.

Ganesh ve diğ. [25], öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) kullanılarak üretilen geopolimer betonlar ile ilgili yaptıkları çalışmada betonların içerisine toz haline getirilen Polietilen tereftalat (PET) şişelerin beton numunesi içerisinde 3, 6 ve 12 gibi değişik oranlarda eklenmesi sonucu betonun işlenebilirlik, basınç dayanımı, çekme dayanımı ve su emme gibi özelliklerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda işlenebilirliğin PET oranı arttıkça azaldığı, çekme ve basınç dayanımının arttığı ve su emme kapasitesinin de PET oranına bağlı artışta azaldığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca PET şişelerin toz haline getirilip geopolimer betonlarda kullanılarak bertaraf edilebilecekleri fikrini ortaya koymuşlardır.

Chowdhury ve diğ. [126], incelemelerinde geopolimer betonların bileşenlerini ve karışım oranlarını, mekanik ve reolojik özelliklerini, arayüzey geçiş bölgeleri (ITZ) ve aderans yapma yeteneğini incelemiştir. Sonuç olarak geopolimer betonların normal portland çimentolu (PÇ)

betonlara kıyasla daha iyi-benzer basınç dayanımı davranışı sergilediği, elastisite modülünün PÇ betonunun %90'ı olduğu, eğilme mukavemetinin 1,4 kat daha iyi olduğu ve daha yoğun bir ITZ'ye sahip olduğunu saptamışlardır. Normal PÇ betona kıyasla çelik donatı ile %10 daha yüksek bir bağ mukavemetine sahip olduğu, geopolimer betonların daha iyi dayanıklılığa, yangına ve asit direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Thong ve diğ. [127], kauçuk parçacıkları ile (hacimce %0, %15 ve %30 değerlerinde) ikame edilmiş geopolimer betonun dinamik basınç özelliklerini, 136 saniyeye kadar gerinim hızıyla Split Hopkinson Basınç Çubuğu testleri ile incelemişlerdir. Çalışmalarında geopolimer betonun hızlı yükleme altında darbe dayanımının kauçuk oranının artmasıyla iyileştiğini, gerilme duyarlılığının ve enerji tüketme kapasitesinin de arttığını ortaya koymuşlardır.

Erfanimesh ve diğ. [128], sodyum karbonatla aktive edilmiş yerel zeolit ve cüruf içeren geopolimer betonun mekanik ve mikro yapısal özelliklerini inceleyen çalışmaları sonucunda bulgular incelendiğinde karışım dayanımlarının aktivatör dozundaki artışa bağlı olarak iyileştiği, zeolit içerikli ve sodyum karbonat ile aktive edilmiş geopolimer betonların basınç dayanımının 7 ve 28 gün sonra sırasıyla % 30 ve % 25 artış gösterdiği, çekme dayanımı değerinin de geleneksel beton ile hemen hemen eşit çıktığını görmüşlerdir. Ayrıca XRD sonuçlarını değerlendirdiklerinde CSH jelinin varlığını ve hidrasyon ürünlerinin oluştuğunu görmüşlerdir.

Zhang ve diğ. [129], 100, 200, 400, 600, 800 ve 1000 °C sıcaklık değerlerine maruz kalan ve ortam koşullarında kürlenmiş geopolimer betonlarda kütle ve mukavemet değişimi ile çatlak oluşumunu incelemişlerdir. Çalışma sonucunda numunelerin maruz bırakıldığı sıcaklık değerinin artması ile birlikte kütle kaybında artış olduğu, bu değerlerin de normal betonlara göre yüksek bir değere sahip olduğunu saptamışlardır. 400 °C değerinde dayanım değerlerinin maksimum olduğu, mukavemet kaybı yaşanmadan da 2 saat boyunca 600 °C'ye maruz bırakılabileceklerini öne sürmüşlerdir. İri agregalarda sıcaklık gradyanı ile indüklenen çatlakların, 600 ° C'nin üzerindeki sıcaklıklarda betonun mukavemet kaybına katkıda bulunduğunu ifade etmişlerdir.

Chi ve Huang [130], alkali aktivatörler ile aktifleştirilen uçucu kül/cüruf harçların bağlanma yapısını ve özelliklerini inceledikleri araştırmalarında %4 ve %6 Na₂O oranlarında alkali içeren

betonlarda basınç, eğilme ve su emme deneyleri yapmışlardır. %4 oranında Na₂O içeren betonlarda uçucu kül/cüruf oranları 50/50 olan harçların basınç ve eğilme dayanımının en yüksek değeri verdiği (sırasıyla 88 MPa/28 gün ve 9,32 MPa/28 gün), %6 oranında Na₂O içeren betonlarda ise alkali oranı artışı ile birlikte 28 günlük basınç değeri 105,8 MPa olarak araştırmacılar tarafından bulunmuş ve yine araştırmacılar bükülme mukavemeti değerinde de %10-16 olarak artış gösterdiğini ifade etmişlerdir. Su emme oranının bağlayıcı kimyasına bağlı olarak portland çimentolu harçlara göre daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Çalışma gösteriyor ki Na₂O dozajı artışı, her yaşta tüm karışımlarda eğilme mukavemeti gelişiminde biraz olumlu etkiye sahiptir.

Rajini ve diğ. [131], uçucu kül (UK) ve granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) kullanılarak üretilen geopolimerler üzerinde basınç dayanımı deneyi ve mikro yapı üzerinde inceleme gerçekleştirmişlerdir. UK/GYFC: 0/100 ve UK/GYFC: 25/75 oranlarında hazırlanan karışımların küp numune basınç değerlerini sırasıyla 60,23 MPa ve 58,12 MPa olarak bulmuşlardır. Bu değerlerin geleneksel beton için buldukları 51,39 MPa değerinden daha iyi sonuç verdiğini ortaya koymuşlardır. Mikro yapı çalışmaları sonucunda da GYFC miktarındaki artışla birlikte daha fazla geopolimerleşme ürününün (CSH/NASH) ortaya çıktığını ifade etmişlerdir.

Saranya ve diğ. [132], granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ve dolomitten geliştirilen geopolimer betonlarda maksimum basınç dayanımını bulmuş ve bu betonlar ile üretilen kısa kolonların aksenal yükleme altında davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. GYFC ile üretilen geopolimer betonların ilk yaş dayanımlarının normal PÇ'lere kıyasla yüksek çıktığı ve 28 günlük dayanımlarının da benzer/yüksek sonuçlar verdiğini gösteren çalışmada ortam koşullarında kürlenmiş geopolimer betonlarla üretilen kolonların taşıdığı nihai yükün normal çimentolara göre %12 daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca süneklik sağlamak üzere beton hacmine göre %0,25, %0,5 ve %0,75 çelik elyaf ilavesi ile süneklik faktörünün sırasıyla %18, %30 ve %45 arttığını belirtmişlerdir.

Shaswat ve diğ. [133], uçucu kül (UK) yerine kireç ve silis dumanı (SD) içeren geopolimer betonun özelliklerini incelemişlerdir. Kireç taşı ve UK kullanımının geopolimer betonlarda işlenebilirliği ve priz süresini azaltmak için, SD'nin de bu özellikleri arttırmak için kullanılabileceğini çalışmalarında ifade etmişlerdir. İşlenebilirlik değerleri kireç taşı kullanımı

ile birlikte %1, UK kullanımı ile birlikte %10 düşüş; SD kullanımı sonucunda ise %50-93 daha yüksek değerler göstermiştir. Basınç dayanımı değerleri %10 kireç taşı ve %3 SD ikamesi ile birlikte 7/14/28 günlerde sırasıyla %39/%22/%2 olarak artış göstermiştir. Son olarak, SD ile kireç taşı ikamesi ile hazırlanan betonlarda mikro yapıyı incelediklerinde daha yoğun bir iç yapıya sahip olduğunu göstermişlerdir.

Noushini ve diğ. [134], uçucu kül esaslı geopolimer betonun klor difüzyon direnci ve klorür ile bağlanma kapasitesini araştırmışlardır. 60,75 ve 90 °C'lik üç sıcaklık ve 8, 12, 18 ve 24 saatlik dört kürlenme süresi uygulanan çalışmada basınç mukavemeti 60-90 °C arasında sıcaklık artışıyla birlikte geopolimerleşme derecesinin artmasından ve fazla miktarda reaksiyon ürünü oluşmasından dolayı artış göstermiştir. 60 °C'de ısıyla kürlenene veya yüksek sıcaklıkta 18 saatten daha az kürlenene tüm uçucu kül bazlı geopolimer betonlar, 18 veya 24 saat boyunca 75 °C'de veya 90 °C'de ısıyla kürlenene geopolimer betonlara kıyasla daha yüksek hacimde geçirgen boşluklar göstermiştir. Sıcaklık değerinin artması uzun süreli kür uygulamalarında mikro yapıyı zayıflatacağından 18-24 saat aralığındaki kür uygulamalarında optimum sıcaklığın 75 °C olması gerektiğini belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada XRD analizi sonucunda geopolimer bağlayıcılar ile klorür iyonları arasında herhangi bir reaksiyon olmadığı görülmüştür. Sonuç olarak, uçucu kül bazlı geopolimer beton, klorürle ilgili dayanıklılık endişelerinin çok az olduğu veya hiç olmadığı uygulamalar için uygun görüldüğünü ifade etmişlerdir.

Agrawal ve diğ. [135], doğal nehir kumunun geopolimer betonlarda uçucu kül ile ikamesinin betonun sertleşmiş özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Uçucu kül esaslı geopolimer (GFS) beton hazırlanması için 4 Molar NaOH çözeltisi ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH} = 2: 1$ ile alkali aktivatör kullanılmıştır. Çökme değeri her iki kum (ikameli-ikamesiz) numunesi için 75-100 mm arasında çıkmıştır. GFS betonlarda yoğunluk dere kumu ikameli geopolimer betonlara göre %16,55 daha az olduğu saptanmıştır. Basınç dayanımı değerlerinde 28 günde, nehir kumu betonu ile basınç dayanımı 34.22 MPa'ya ulaşırken, GFS betonda 28.94 MPa'ya ulaşmıştır. GFS betonun 1., 3., 7., 28., 56. ve 90. günde basınç dayanımı sırasıyla 9.14MPa, 14.71MPa, 18.12MPa, 28.94MPa, 38.78MPa ve 42.96MPa olarak gözlenmiştir. Nehir kumu betonu ile karşılaştırıldığında, GFS betonunun ilk 1 günlük dayanımı nehir kumu betonununkinin sadece %70,66'sı idi. 28. günde GFS betonu nehir kumu betonuna göre %81,75 dayanıma ulaşırken, 90. Günde %97,32 dayanıma ulaşarak GFS betonunda sürekli bir dayanım kazancı elde

edilmiştir. GFS betonun nehir kumu betonuna göre 28 gün ve 90 günde eğilme mukavemetindeki artış yüzdesi %88,93 ve %95,88 olarak bulunmuştur. Benzer şekilde, nehir kumu betonuna göre ayırık gerilme mukavemetinin yüzde kazanımı sırasıyla %93 ve %95,95 ve 28 gün ve 90 gün olarak gözlenmiş, bu da GFS betonu ile benzer bir mekanik mukavemet kazancı eğilimine işaret etmişlerdir. GFS betonunda, nehir kumu betonuna kıyasla klorür geçişinde yaklaşık %43 azalma gözlemlenmiştir. Hızlandırılmış karbonatlaşma testi, GFS beton kullanımı ile karbonatlaşmada 4 kat azalma göstermiştir. Bununla birlikte, kuruma büzülmesi her iki beton tipinde de benzer sonuçlar gösterdiğini belirtmişlerdir.

Çınar ve diğ. [136], karbon siyahının soğuk bölgelerde normal pç betonlarda elektriksel kürlenmesine etkisini incelemişlerdir. Betonda ağırlıkça %0, %1, %2 ve %3 oranlarında elektrik iletkenliğinin sağlanması amacıyla karbon siyahı kullanmışlardır. Beton numunelere alternatif akım kaynağı ile 0, 45, 60 ve 90 V gerilim değerlerinde 24 saat boyunca elektriksel kür uygulamışlardır. Araştırmacılar, elektriksel kürlenmenin ardından numunelere kür havuzunda 7 gün ve 28 gün süreyle kür uygulanmış bu aşamadan sonra da fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmalarında; uygulanan gerilim değeri arttıkça betonda iç sıcaklık artışı oluşmuş ve priz alma olayı hızlanarak priz süresi kısalmıştır. Karbon siyahı oranı arttıkça betonun daha gözenekli bir yapıda oluştuğu buna bağlı olarak da geçirgenliğin ve su emme miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında karbon siyahı oranı artışı ile birlikte basınç dayanımlarında da düşüşler meydana gelmiştir. Çalışma sonucunda beton içerisine iletkenliği arttırıcı etki gösteren karbon siyahı ilavesi ile elektriksel kür uygulanarak kalıp alma süresinin kısaltıldığı ve soğuk ortam şartlarında düşük maliyet ile kür uygulanabileceği görülmüştür.

Uygunoğlu ve Hocaoğlu [137], farklı gerilim değerlerinin elektriksel kür uygulamalarında priz süresine etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla farklı dozajlarda (250, 300, 350 ve 400) betonlar elektriksel kür yöntemi uygulanmıştır. Deneyle için 100x100x350 mm kalıplar kullanılmış, bu kalıplara 24 saat boyunca alternatif akım kaynağı ile farklı gerilim değerlerinde elektrik verilmiştir. Deneyle sonucunda artan gerilim değerleriyle birlikte iç sıcaklığın arttığı ve buna bağlı olarak da priz süresinin azaldığı görülmüştür. 250, 300, 350 ve 400 dozaj betonlarına 100 V gerilme şiddeti uygulanarak, aynı dozaj referans betonları ile karşılaştırıldığında nihai priz süreleri sırasıyla 510, 380, 410 ve 500 dk kısaltılmıştır. 300 doz betona 1 gün AC akım (sırasıyla 40 V, 60 V, 80 V ve 100 V) uygulandığında sırasıyla yaklaşık 2, 3, 4 ve 12 günlük basınç dayanımı sağlanmıştır. Çalışma sonucunda beton iç sıcaklıkları yüksek değerler aldığı için

beton üzerine 80 V ve 100 V gibi yüksek gerilme şiddeti uygulanmasının uygun olmadığı tespit edilmiştir.

Cecini ve diğ. [138], elektriksel ve buhar kürü uygulanan betonların basınç dayanımını ve eğilme mukavemetlerini karşılaştırmışlardır. Elektriksel kür uygulanan numunelerin eğilme mukavemeti değerlerinin buhar kürü uygulanan numunelere göre daha küçük bir değere sahip olduğunu fakat bu yöntemin çelik tel kullanılarak beton elemanlar üretimi için kullanılabileceğini saptamışlardır. Elektriksel ve buhar kür uygulanan numunelerde dayanım kazanma hızı normal kür şartlarında kürlenene betonlara göre %50 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Mikroskopik analizler sonucunda elektrik ile kür uygulanan numunelerde çatlama sonrası performansta azalmaya sebep olacak gözenekli bir ara yüz oluştuğu saptanmıştır.

Bredenkamp ve diğ. [139], betonlarda elektriksel kür uygulamasının sıcaklık ve priz süresi ile olan ilişkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları 150x150x750 mm kiriş kalıplara her iki yandan elektrik verilecek şekilde plakalar eklenmiştir. Normal kür uygulanan beton ile elektriksel kür uygulanan betonların ilk sıcaklıklarının 16-19 °C arasında olduğunu, normal kürlenene betonda hidrasyon ısısına bağlı olarak bu değerin 24 °C'ye çıktığı gözlenmiştir. Elektriksel kür uygulanan betonda ise sıcaklık değeri uygulanan voltaja bağlı olarak değişiklik göstermiş ilk zamanlarda sıcaklık değerlerinde artma ve kür döngüsünün sonuna doğru da bir azalma gözlenmiştir. Elektriksel kür uygulanan beton numunelerde 4 saatlik kür uygulanmasından sonra basınç dayanımı 13 Mpa değer verirken normal kür uygulanan beton numuneler ise kalıptan çıkarılamayacak durumda olduğu fakat dökümden 80 saat sonra doğal olarak kürlenene beton numunelerin daha iyi mukavemet değerlerine sahip olduğunu saptamışlardır.

Jung ve diğ. [140], karbon nanotüpler (CNT'ler) ile ultra yüksek performanslı fiber takviyeli beton (UHPFRC) üzerine elektriksel kür uygulamasının potansiyelini araştırmışlardır. CNT eklenmesi ile betonun elektrik direnci azaltılıp iletkenlik sağlanmış ve elektriksel kür uygulanarak iç sıcaklık değeri 90°C'ye kadar çıkarılmıştır. Kürlenme işlemi sırasında 20 V değerinde numunelerin sıcaklığı 1 saat içerisinde 38°C'ye yükselmiş 2 saat içerisinde de 90°C'ye çıkmıştır. EC ile kürlenene UHPFRC / CNT, normal kürlenene UHPFRC / CNT durumuna kıyasla daha da fazla yapısal değişiklik göstermiştir. Çalışma sonunda bu sonuçlara

dayanarak, UHPFRC'nin CNT'leri dahil ederek ve elektriksel kür uygulanarak yerinde dökümlerde kullanılabileceğini önermişlerdir.

Canbaz ve diğ. [141], elektriksel direnç ile ısıtma yoluyla uygulanan kürün beton özelliklerine etkisini incelemiş ve soğuk havalarda hızlı priz alan beton üretimini hedeflemişlerdir. Bu amaçla -15, -20 ve -25°C ortam sıcaklığında olan beton karışımlar, beton içerisinden spiral kablo şeklinde borular geçirilmiş bu boruların içerisine de rezistans farklı uzunluklarda yerleştirilerek ısıtılmış böylece priz alması sağlanmıştır. Düşük sıcaklık değerlerine rağmen beton prizini 4,5 saatte almıştır. Kalıptan aldıkları numuneleri 80x80x80 mm küp halinde keserek bu küpler üzerinde deneyler yapmışlardır. 28 günlük numunelerin birim hacim ağırlıkları ortam sıcaklığı arttıkça %10'a varan oranlarda artmıştır. Erken yaşlarda ise numunelerin birim hacim ağırlığının ortam sıcaklığı arttıkça %5 civarında azaldığını ifade etmişlerdir.

Geleneksel portland çimentolar ile geopolimer kompozitlerin karşılaştırmalı olarak maliyet analizi üzerine literatürde birçok çalışma mevcuttur.

Bai vd. [142], uçucu kül ve diğer katı atıklardan hazırlanan geopolimer kaldırım tuğlaları ile geleneksel beton kaldırım tuğlaları üzerine ekonomik olarak yürüttükleri çalışmada, 1 m² geopolimer kaldırım tuğlası üretiminde 90°C ısıtma kür uygulaması sonucunda 0,912 kW enerji harcadığını, Çin ekonomisine göre 0,1176 birim maliyeti olduğunu sunmuşlardır.

Fort vd. [143], Atık tuğla tozu ve 1,6 Ms modülü ile hazırladıkları geopolimerlere ortam koşullarında 28 gün kür uygulamış ve geleneksel PÇ'ler ile kıyaslamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre geopolimerlerin çimento esaslı malzemeler ile karşılaştırılabilir özellikte olduğunu, tüketilen enerjide %45, salınan sera gazı etkisinde de %72'ye kadar tasarruf sağlanabileceğini ifade etmişlerdir.

McLellan vd [144], geleneksel PÇ harca kıyasla geopolimer harç maliyetleri ve karbon emisyonları üzerine yaptıkları çalışmalarında geopolimer betonun finansal ve çevresel maliyet hesabında kaynak malzemenin konumuna, enerji kaynağına ve taşıma durumuna bağlı olarak faydalı veya zararlı olabileceğini ifade etmişlerdir. Çalışma sonuçlarında, bölgesel uçucu kül ile üretilen geopolimer karışımların belirtilen faktörlere bağlı olarak maliyetlerinin %7 daha

düşük ile %39 daha yüksek arasında değişebileceğini, sera gazı emisyonlarında da %44-64 arası bir azalmanın oluşacağını savunmuşlardır.

Thaarrini ve Dhivya [145] 1 m³'lük sodyum silikat ve sodyum hidroksitin alkali aktivatör olarak ve taban külü ile GYFC'nin aluminosilika kaynağı olarak kullanıldığı geopolimer beton ile geleneksel PÇ betonun maliyetini kıyaslamışlardır. M30 kaliteye sahip geopolimer betonun maliyetinin aynı kaliteye sahip geleneksel PÇ beton ile kabaca eş değer olduğunu M50 kaliteye sahip geopolimer beton maliyetinin ise %11 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

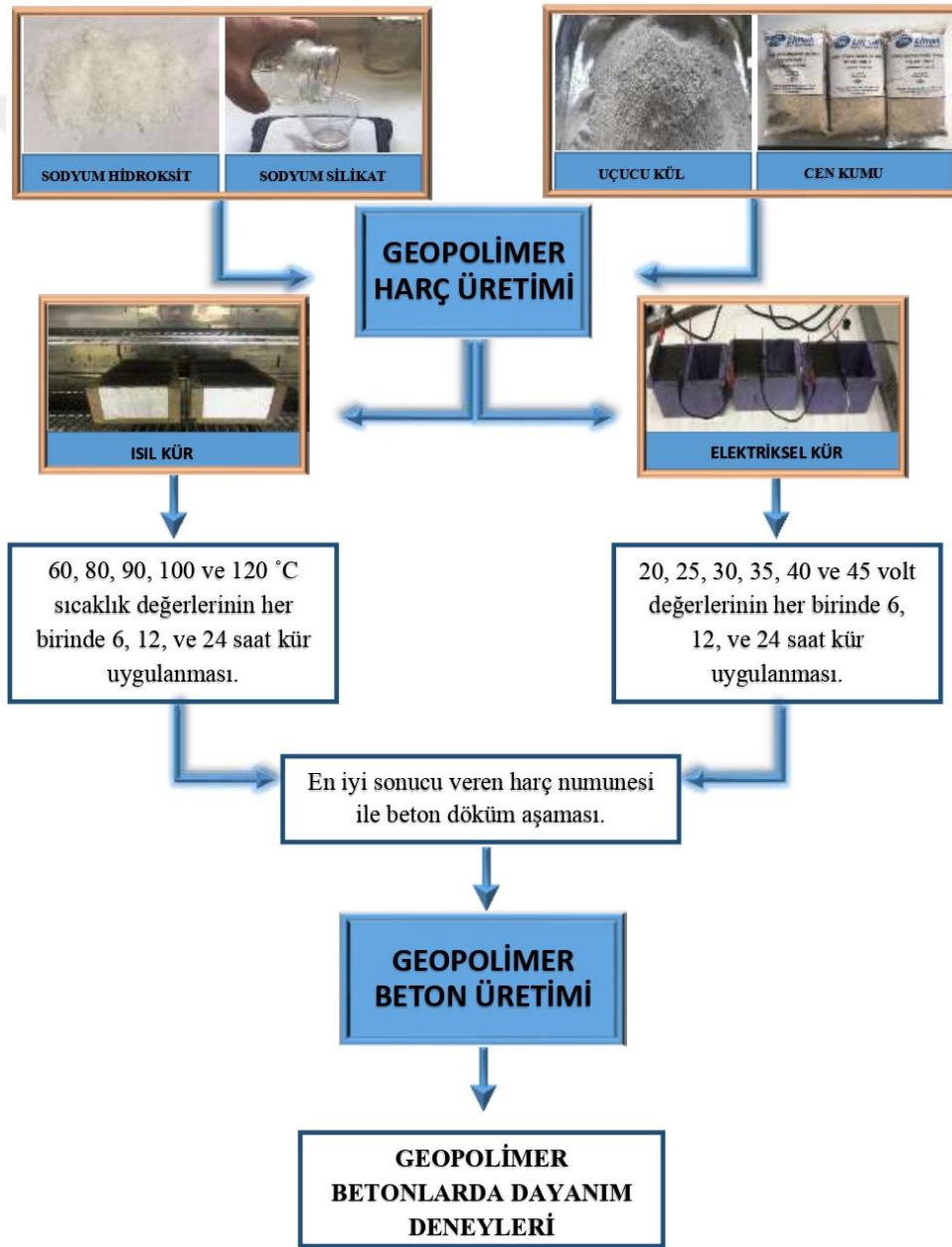
Bondar [146], daha az miktarda kalsiyum bazlı hammadde kullanılmasının, daha düşük üretim sıcaklığı ve daha düşük miktarda yakıt, portland çimentosuna kıyasla geopolimer çimento üretimi için %22-%72'ye varan daha az karbon emisyonunun sağlanabileceğini belirtmiştir.

Mathew vd. [147], uçucu kül bazlı geopolimer betonun maliyeti üzerine yaptıkları çalışmalarında taban külü ikamesinin etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, benzer mekanik performansa sahip geopolimer beton ile geleneksel PÇ betonun maliyetinin benzer olduğunu ifade etmişlerdir.

Yukarıda kapsamlı olarak sunulan güncel literatür özeti değerlendirildiğinde, elektriksel kür ile geopolimer harç/beton üretimi konusunda bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu durum, elektriksel kürün geopolimerdeki ısıl küre alternatif bir yaklaşım olarak kullanımı üzerine yapılacak kapsamlı bir deneysel çalışmanın literatürde kendisine hızlı ve etkin bir şekilde yer bulacağını göstermektedir.

3. MATERYAL VE METOT

Tez çalışmasında malzeme olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat, uçucu kül, CEN referans kumu ve agrega kullanılmıştır. Yöntem olarak ise fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesinde basınç dayanımı, kılcal su emme deneyi, ultrases geçiş hızı deneyi, Böhme aşınma deneyi ve birim hacim ağırlık, porozite, su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın akış diyagramı Şekil 3.1.'de verilmiş olup kullanılan malzemeler ve yöntemler ise alt başlıklar halinde detaylı olarak bu bölümde sunulmuştur.



Şekil 3.1. Tez çalışması akış diyagramı

3.1. Materyal

Harçların üretiminde CEN standart kumu, aktivatör olarak Na_2SiO_3 (Şekil 3.2.a) NaOH (Şekil 3.2.b) ile geopolimer üretiminde kullanılabilirliği daha önceki çalışmalarda belirlenmiş olan uçucu kül (Şekil 3.2.c) alümino silikat kaynağı bağlayıcı toz olarak kullanılmıştır. Harç deneyleri sonrasında gerçekleştirilen beton üretiminde de diğer bileşenlere ek olarak 5-12 mm tane boyutuna sahip iri agrega (Şekil 3.2.d) ve 0-5 mm tane boyutuna sahip ince agrega (Şekil 3.2.e) kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan malzemeler (a: sodyum silikat, b: sodyum hidroksit, c: uçucu kül, d: iri agrega, e: ince agrega)

3.1.1. Uçucu kül

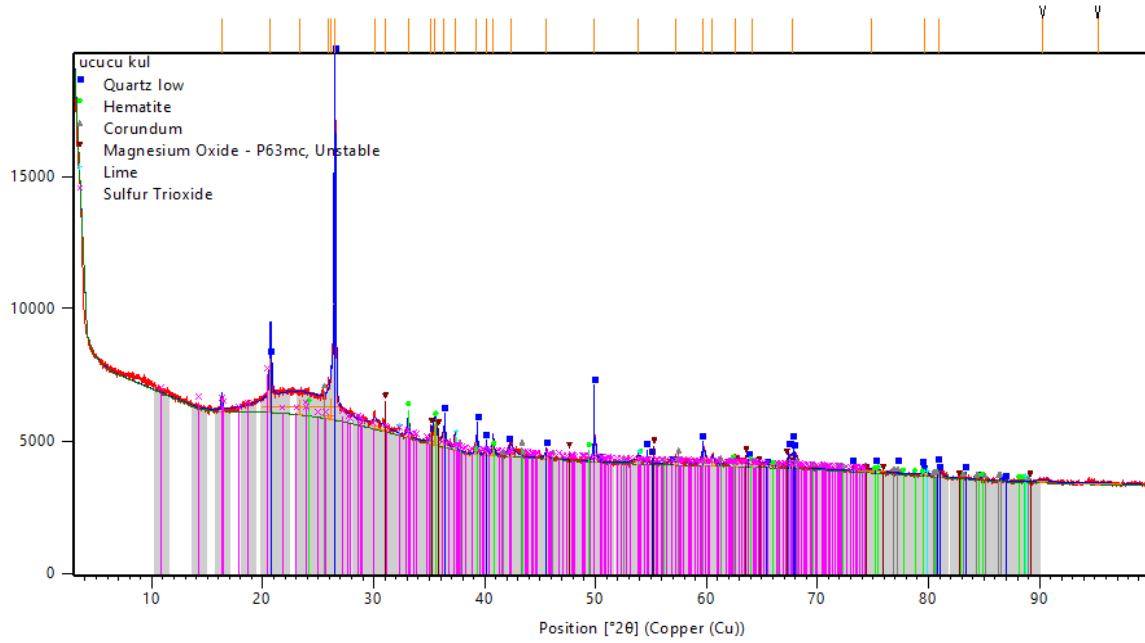
Tez çalışmasında, Adana ili Yumurtalık ilçesinde bulunan İSKEN termik santralinden temin edilen F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan uçucu küle ait bir görsel Şekil 3.3.'te ve Çukurova Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında gerçekleştirilen XRF analiz sonuçları Tablo 3.1.'de ve XRD analiz sonuçları ise Şekil 3.4.'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan F sınıfı uçucu kül

Tablo 3.1. Uçucu kül XRF analizi

Bileşen	%	Bileşen	%	Bileşen	%
Al ₂ O ₃	21	Cr ₂ O ₃	0,062	SrO	0,15
SiO ₂	53	MnO	0,096	ZrO ₂	0,066
SO ₃	1,5	Fe ₂ O ₃	13,83	MoO ₃	0,03
K ₂ O	2,70	NiO	0,100	BaO	0,37
CaO	4,95	CuO	0,056	Eu ₂ O ₃	0,06
TiO ₂	1,31	ZnO	0,036	Re ₂ O ₇	0,03
V ₂ O ₅	0,103	Rb ₂ O	0,029	PbO	0,062



Şekil 3.4. Uçucu kül XRD analizi

Tablo 3.1. incelendiğinde $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamı %87,83 olup CaO oranı da %4,95 (<%10) çıkmıştır. ASTM C 618 [82] standardı incelendiğinde uçucu külün düşük kalsiyumlu F sınıfı uçucu kül olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 3.4.’teki XRD grafiği incelendiğinde de SiO_2 ’ye bağlı olarak uçucu külün Quartz ağırlıklı olduğu pik noktalardan da görülmüş ve çekilen XRF ile tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Tezde kullanılan uçucu küle ait fiziksel özellikler Tablo 3.2.’de görülmektedir.

Tablo 3.2. Uçucu külün fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Yoğunluk (kg/m^3)	2295
Özgül yüzey (cm^2/g)	4252
Aktivite Endeksi (28 Gün (%))	79,40
İncelik ($> 45\mu\text{m}$)	15,67
Kızdırma Kaybı	1,32

3.1.2. Sodyum silikat

Tez çalışmasında silika modülü (Ms) hesabına göre geopolimer üretimi yapılacağından, sodyum silikatın kimyasal spesifikasyonlarının bilinmesi önemlidir. Demirbey Kimya’dan alınan sodyum silikata ait (Şekil 3.5.) analiz sonuçları detaylı olarak Tablo 3.3.’te verilmiştir.



Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan sodyum silikat

Tablo 3.3. Sodyum silikat teknik özellikleri

ANALİZ	SPESİFİKASYON	BİRİM	SONUÇ	YÖNTEM
Görünüş	Renksiz, berrak sıvı	-	Renksiz, berrak sıvı	Görsel
Tepe formülü	Na ₂ SiO ₃	-	-	-
Kimyasal formül	Na ₂ SiO ₃	-	-	-
Sodyum oksit (Na ₂ O)	12,0 – 13,5	%	12,98	Titrimetrik
Silisyum oksit (SiO)	23,5 – 27,0	%	26,41	Volumetrik
Bome (20 °C)	42,5 – 44,5	°Be	44,45	Bomemetre
Modül	1,9 – 2,2	-	2,07	-
Dansite (20 °C)	1,415 – 1,443	g/cm ³	1,443	Dansimetre

3.1.3. Sodyum hidroksit

Çalışma kapsamında kristal formda sodyum hidroksit kullanılmıştır. Kullanılan sodyum hidroksit Şekil 3.6.'da gösterilmiş olup sodyum hidroksitin teknik özellikleri Tablo 3.4.'te verilmiştir.

**Şekil 3.6.** Çalışmada kullanılan sodyum hidroksit**Tablo 3.4.** Sodyum hidroksit teknik özellikleri

ANALİZ	SPESİFİKASYON
Derece	Ekstra Saf
Tepe formülü	HNaO
Kimyasal formül	NaOH
Molar kütle	40,00 g/mol
Saflık derecesi	≥%98,0
Sodyum karbonat (Na ₂ CO ₃)	≤%0,5
SODYUM KLORÜR (NaCl)	≤%0,02
Demir (Fe)	≤%0,001

3.1.4. CEN standart kumu

Çalışmada, Limak Çimento San. ve Tic. AŞ'den temin edilen TS EN 196-1 [148] Standardına uygun kum (Şekil 3.7.) kullanılmıştır. CEN Standart Kumuna ait granülometri Tablo 3.5.'daki gibidir.



Şekil 3.7. Tez kapsamında kullanılan CEN standart kumu

Tablo 3.5. CEN standart kumuna ait standartlaşmış granülometri

Göz Açıklığı (mm)	Kümülatif Kalan (%)
0,08	99±1
0,16	87±5
0,5	67±5
1	33±5
1,6	7±5
2	0

3.1.5. Agregası

Tez çalışmasında Adana KAMBETON A.Ş. firmasından temin edilen 0-5 mm boyutunda ince ve 5-12 mm boyutunda iri agregası kullanılmıştır. Kullanılan agregası kırmataş kalker agregası olup agregaların görselleri Şekil 3.8.'de verilmiştir.



a



b

Şekil 3.8. Çalışmada kullanılan agregalar (a: ince agrega, b: iri agrega)

3.2. Metot

3.2.1. Ön deneyler

3.2.1.1. Isıl kür ve uygulanabilir sıcaklık değerlerinin belirlenmesi

Isıl kür için kullanılacak en uygun sıcaklık aralığının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen ön deneylerde, belirli Ms modülü (1,6 Ms) ve belirli Na₂O (%8 Na₂O) konsantrasyonuna sahip geopolimer harçlar üretilmiş ve üretilen bu harçlar 45, 60, 80, 90, 100 ve 120 °C derecede etüvde 1 gün boyunca kürlendikten sonra laboratuvar ortamında 1 gün bekletilerek dayanımları belirlenmiştir. En iyi dayanım sonucunu veren sıcaklık aralıkları uygulanabilir sıcaklıklar olarak seçilmiştir. Ön deneyler için hazırlanan geopolimer harçlarda karışıma giren malzeme miktarları Ms modülüne göre hesaplanmış ve Tablo 3.6.'da verilmiştir. Karışım reçeteleri olası kayıplar düşünülerek %15 fazla olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3.6. Uygulanabilir sıcaklık değerlerinin belirlenmesi amacıyla hazırlanan harç özellikleri

Kalıp	Uçucu kül (g)	Aktivatör (g)	Agrega (g)
50x50x50 mm ³ 3 gözlü çelik kalıp	223,44	113,20	670,32
Aktivatör bileşenleri	Sodyum silikat (g)		108,27
	Sodyum hidroksit (g)		4,93

Ön deneylerin uygulanması aşamasında, hazırlanan alkali aktivatör 1 gün dinlendirilip soğutularak döküm açısından uygun hale geldikten sonra geopolimer harçların hazırlanması ve dökülmesi aşamasına geçilmiştir. Bu aşamalar, görsellerle birlikte adım adım şu şekilde özetlenebilir;



Adım 1: CEN Kumunun hazırlanması



Adım 2: Uçucu Kül eklenmesi



Adım 3: Kuru karışım



Adım 4: Kuru karışıma aktivatör eklenmesi



Adım 5: Geopolimer harcın çimento mikseri ile karıştırılması



Adım 6: Harçların kalıplara doldurulması



Adım 7: Isıl kür işleminin gerçekleştirilmesi

Şekil 3.9.'da gösterildiği gibi ısıl kür işleminin ardından numuneler kalıptan çıkarılmış ve TS EN 196-1 standardına uygun bir şekilde basınç dayanımı testine tabi tutularak ısıl kür sıcaklık değerinin dayanım ile ilişkisi belirlenmiştir.



Şekil 3.9. Farklı sıcaklık değerlerinde kürlenmiş geopolimer harçların kalıptan çıkarılması ve dayanımlarının belirlenmesi

Geopolimer konusunda yapılan literatür taramaları da göz önünde bulundurulduğunda özellikle uçucu kül bazlı geopolimer harç ve betonların geopolimerizasyon tepkimesi ile dayanım kazanması açısından belirli bir süre -kullanılan uçucu kül ve aktivatör oranına bağlı olarak- belirli sıcaklıkta kür uygulanması gerekmektedir. Tez çalışmasında üretilen geopolimer harç ve betonlara ısıll kür uygulaması Şekil 3.10.'da görüldüğü gibi etüvde 6, 12 ve 24 saat boyunca kürlenmiştir.



Şekil 3.10. Geopolimer harç ve betonlara ısıll kür uygulaması

3.2.1.2. *Taze harçların işlenebilirlik tayini*

Üretilen harçlar üzerinde gerçekleştirilen ön deneylerde, geopolimer harçlarda aktivatör miktarının kuru karışıma (uçucu kül + kum) göre artışının işlenebilirlik üzerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla 0.5, 0.75, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8 ve 1.9 Ms modülüne ve her bir Ms modülünde %6, 8 ve 10 Na₂O konsantrasyonuna sahip harçlar üretilmiştir. 12 farklı Ms modülü ve 3 farklı Na₂O konsantrasyonu kullanılarak üretilen 36 farklı aktivatör/kuru karışım oranına sahip geopolimer harçlarda kullanılan malzeme miktarları (3 gözlü 50x50x50 mm çelik kalıp için) Tablo 3.7.'de verilmiştir.

Tablo 3.7. İşlenebilirlik tayininde kullanılan malzeme miktarları

Ms Modülü	Na ₂ O (%)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1+2)	(3+4)
		Uçucu Kül (g)	Agrega (g)	Sodyum Silikat (g)	Sodyum Hidroksit (g)	Kuru Karışım (g)	Aktivatör (g)
0,5	6	253,89	761,67	28,84	14,83	1015,56	43,67
	8	248,09	744,26	37,57	19,32	992,35	56,89
	10	242,54	727,63	45,92	23,61	970,17	69,53
0,75	6	249,09	747,26	42,44	12,18	996,35	54,62
	8	242,01	726,02	54,98	15,77	968,03	70,75
	10	235,32	705,95	66,83	19,17	941,27	86
1	6	244,46	733,38	55,54	9,62	977,84	65,16
	8	236,21	708,64	71,55	12,4	944,85	83,95
	10	228,51	685,52	86,52	14,99	914,03	101,51
1,1	6	242,66	727,97	60,64	8,63	970,63	69,27
	8	233,97	701,92	77,96	11,09	935,89	89,05
	10	225,89	677,68	94,09	13,39	903,57	107,48
1,2	6	240,88	722,64	65,67	7,65	963,52	73,32
	8	231,78	695,33	84,25	9,81	927,11	94,06
	10	223,34	670,01	101,48	11,82	893,35	113,3
1,3	6	239,13	717,39	70,62	6,68	956,52	77,3
	8	229,62	688,86	90,42	8,56	918,48	98,98
	10	220,84	662,51	108,7	10,29	883,35	118,99
1,4	6	237,4	712,21	75,51	5,73	949,61	81,24
	8	227,5	682,51	96,48	7,33	910,01	103,81
	10	218,4	655,19	115,77	8,79	873,59	124,56
1,5	6	235,7	707,11	80,32	4,8	85,12	942,81
	8	225,42	676,27	102,43	6,11	108,54	901,69
	10	216,01	648,02	122,68	7,32	130	864,03

Tablo 3.7. İşlenebilirlik tayininde kullanılan malzeme miktarları (devamı)

1,6	6	234,03	702,08	85,07	3,87	88,94	936,11
	8	223,38	670,15	108,27	4,93	113,2	893,53
	10	213,67	641	129,45	5,89	135,34	854,67
1,7	6	232,37	697,12	89,75	2,96	92,71	929,49
	8	221,38	664,14	114	3,76	117,76	885,52
	10	211,38	634,14	136,06	4,49	140,55	845,52
1,8	6	230,74	692,23	94,36	2,06	96,42	922,97
	8	219,41	658,23	119,63	2,61	122,24	877,64
	10	209,14	627,42	142,54	3,11	145,65	836,56
1,9	6	229,14	687,41	98,91	1,17	100,08	916,55
	8	217,48	652,43	125,17	1,49	126,66	869,91
	10	206,95	620,84	148,88	1,77	150,65	827,79

Ayrıca harç karışımları için aktivatörler bir gün önceden hazırlanmış ve tepkime sıcaklıkları kaydedilmiştir. Yeterli işlenebilirliğe sahip harçların dayanımları da bir önceki adımda en iyi dayanım sonucunu veren kür sıcaklık değeri seçilerek 1 gün boyunca etüvde ısıl kür uygulanarak incelenmiştir.

İşlenebilirlik tayini için numunelerin hazırlanmasında öncelikle aktivatör hazırlanmıştır. Aktivatör hazırlanırken, sıvı formdaki sodyum silikat üzerine eklenip karıştırılan sodyum hidroksit ani bir şekilde ekzotermik tepkimeye girerek ortama ısı yayar. Bu nedenle hazırlanan aktivatörün laboratuvar sıcaklığında 24 saat süreyle soğutulmuş karışımda kullanılması önerilmektedir [98]. Üretilecek harç/beton numunelerde kullanılacak aktivatörün hazırlanma aşamaları Şekil 3.11.'de gösterilmiştir.



a: Sodyum Silikatın Hazırlanması



b: Sodyum Hidroksitin Hazırlanması



c: Aktivatörün Karıştırılması



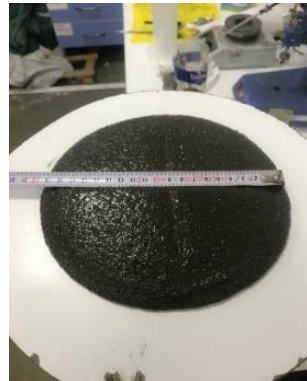
d: Aktivatörün Sıcaklık Ölçümü

Şekil 3.11. Aktivatör hazırlanması

Sodyum silikat içerisinde çözünen sodyum hidroksit karışımının ortaya çıkardığı sıcaklık, Ms oranına ve Na_2O yüzdesine bağlı olarak değişmektedir. Her bir Ms modülünde ve bu Ms modüllerinin her birinin kendi içerisinde %6, 8 ve 10 olarak değişen Na_2O yüzdelere bağlı olarak değişen sıcaklıklar $0,1\text{ }^\circ\text{C}$ hassaslıktaki termometre ile ölçülerek not edilmiş ve bu ilişki incelenmiştir. Aktivatör hazırlanarak 24 saat soğutulduktan sonra harçların hazırlanması aşamasına geçilmiştir. Tez çalışmasında TS EN 196-1'e uygun olarak üretilen taze harçların işlenebilirlik tayininde TS EN 1015-3 [149] standardına uygun yayılma tablası kullanılmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen yayılma çapı ölçümü Şekil 3.12.'de gösterilmiştir.



1,4 Ms %10 Na_2O
Harç Numunesi



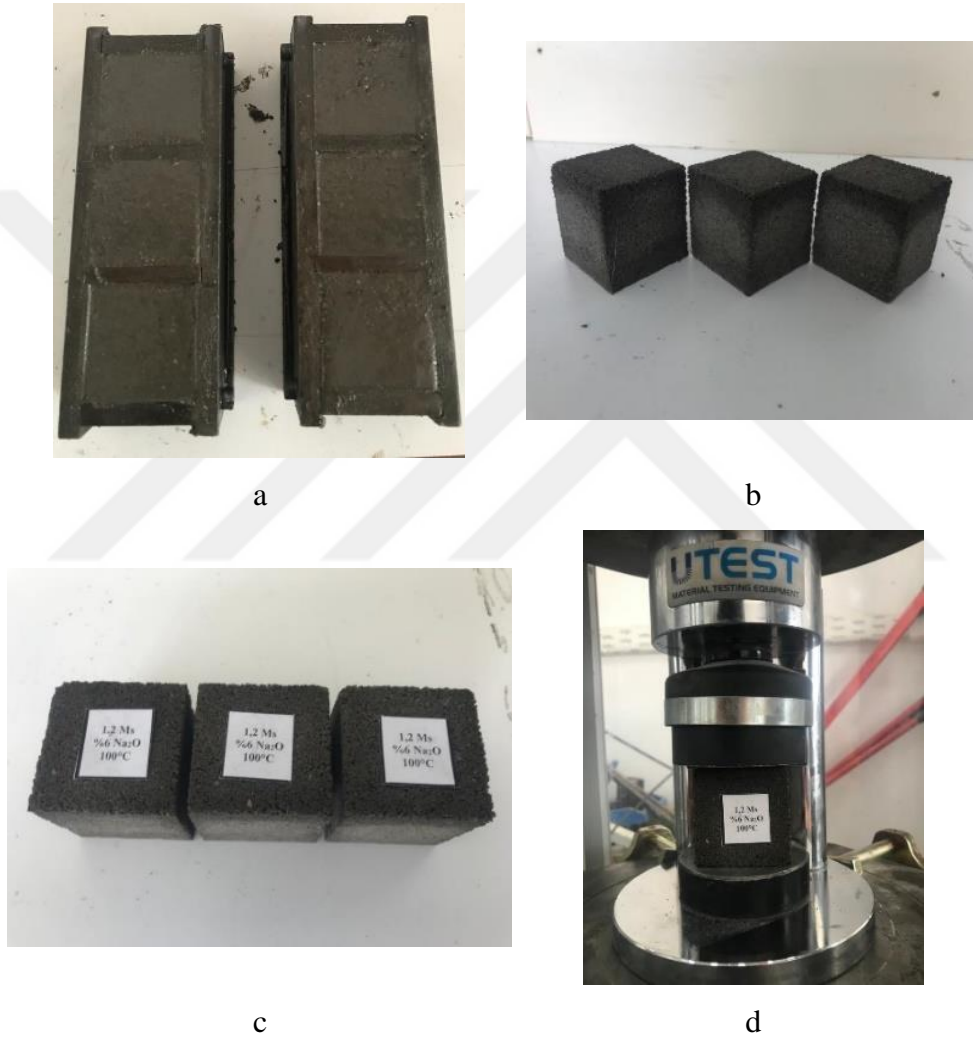
1,6 Ms %10 Na_2O
Harç Numunesi



1,8 Ms %10 Na_2O
Harç Numunesi

Şekil 3.12. Taze harçlarda işlenebilirlik tayini aşamaları

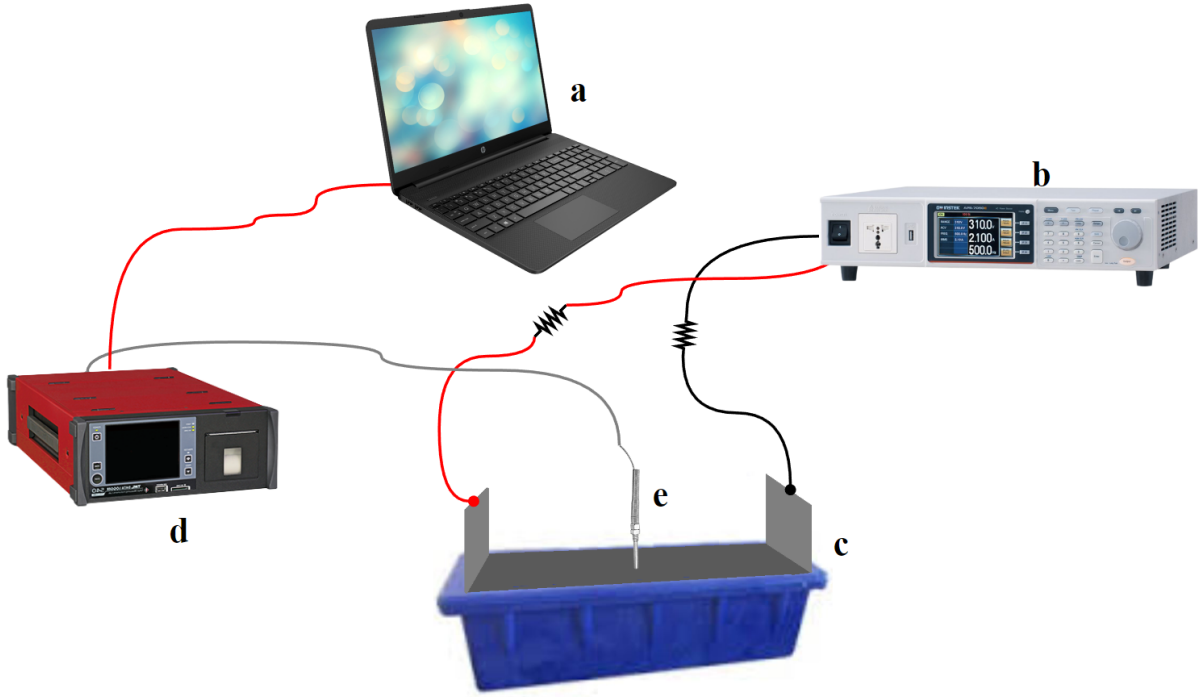
Geopolimer harçların üretiminde Ms oranı çok önemli bir faktördür. Bu faktör, geopolimer harç/betonlarda işlenebilirlik ve dayanımı etkilemektedir. Ön deneylerde seçilen uygun işlenebilirliğe sahip harçlar Şekil 3.13.'te görüldüğü gibi kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıplara yerleştirilen harçlara 100°C sıcaklıkta 24 saat boyunca ısı küt uygulanmış ve küt uygulanmasının ardından dayanım değeri incelenerek uygun işlenebilirlik/dayanım ilişkisini veren harç numunelerinin tespiti yapılmıştır.



Şekil 3.13. Farklı Ms modülü ve Na₂O yüzdelere sahip harç karışımlarının kalıplanması ve dayanımlarının belirlenmesi (a: Harç numunesinin kalıplara yerleştirilmesi, b: ısı küt uygulanan numunelerin kalıptan çıkarılması, c: numune etiketlenmesi, d: numunelerin dayanımlarının belirlenmesi)

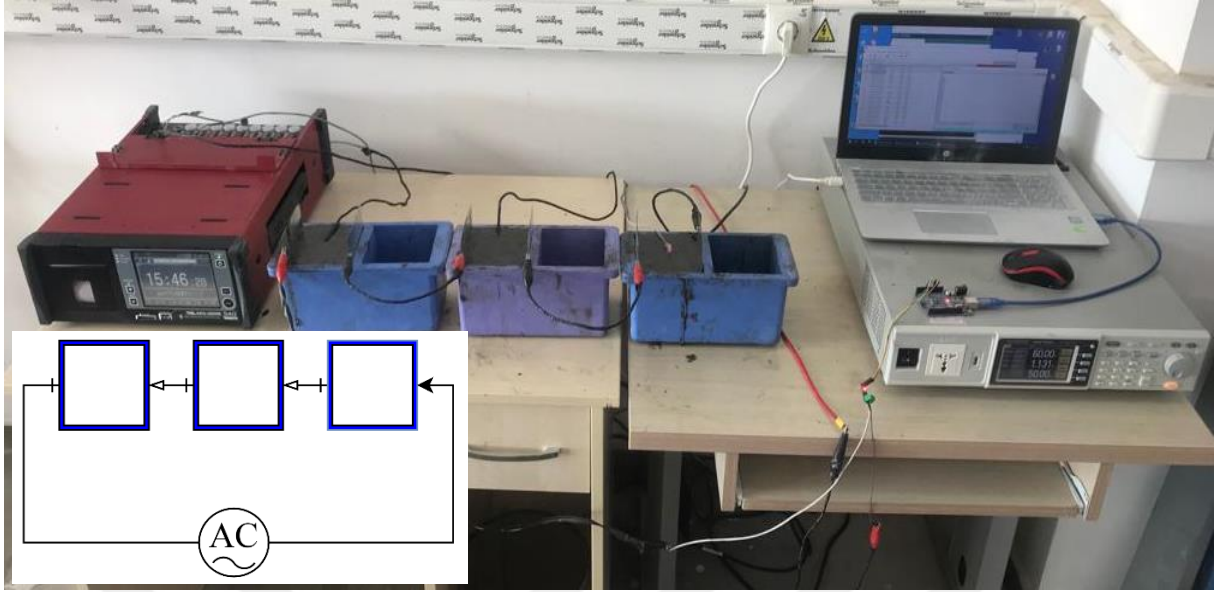
3.2.1.3. Elektriksel kür uygulaması

Betonların erken priz alması ve kalıptan erken alınması veya erken dayanım kazanması gereken durumlarda uygulanan çeşitli hızlandırılmış kür yöntemleri mevcuttur. Hızlandırılmış kür yöntemlerinden olan elektriksel kür uygulanması yöntemi; betonlara, taze haldeyken farklı gerilim değerlerinin uygulanması esasına dayanır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen elektriksel kür uygulaması Şekil 3.14.'te şematize edilmiştir.

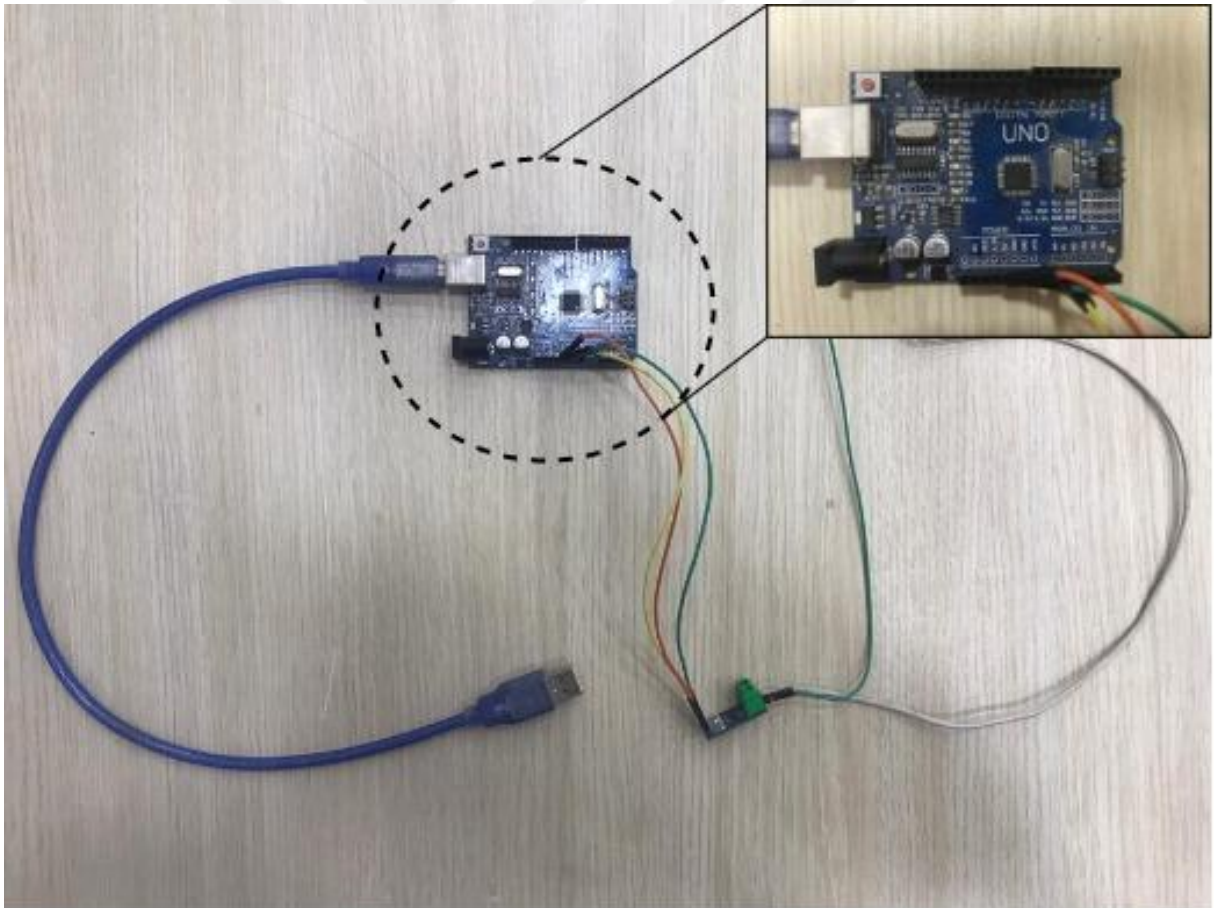


Şekil 3.14. Elektriksel kür şeması (a: Bilgisayar, b: AC güç kaynağı, c: Harç/beton numune, d: Datalogger, e: Termokupl)

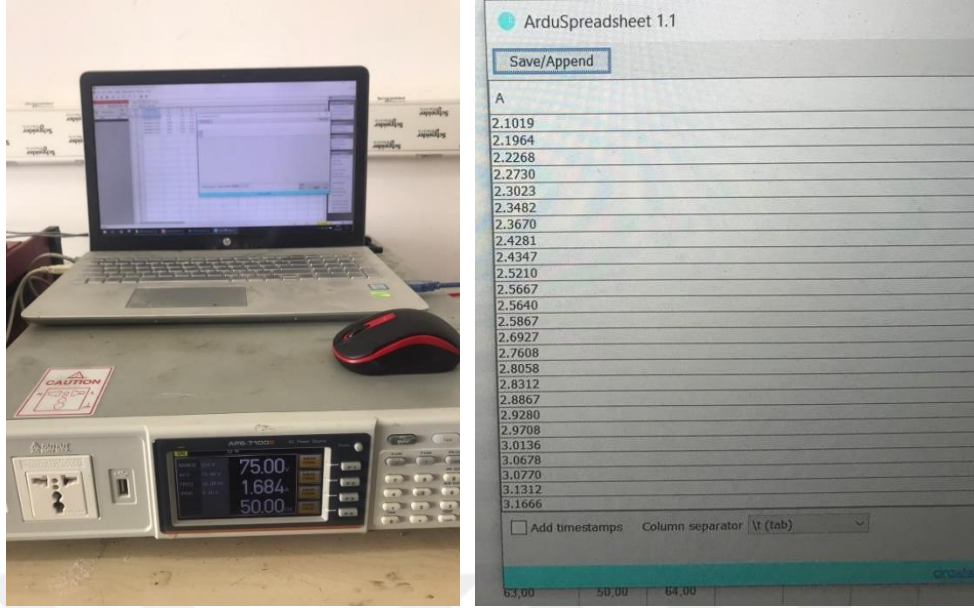
Deneyin uygulanmasında, Şekil 3.14'te görülen kalıbın her iki ucuna birer tane iletken levha yerleştirilmiştir. AC güç kaynağında bulunan pozitif kutup bir levhaya negatif kutup ise diğer levhaya bağlanmış ve AC güç kaynağı 6 – 12 – 24 saat çalıştırılmıştır. Ayrıca datalogger kullanılarak numunelerin sıcaklık değerleri termokupl vasıtası ile, numune içerisinden geçen akım değerleri ise arduino sistemi vasıtası ile her 30 saniyede bir bilgisayara aktarılmıştır. Aktarılan veriler daha sonra excel yardımı ile grafik haline getirilmiştir. Tez çalışmasında geopolimer harç ve betonlara elektriksel kür uygulanması Şekil 3.15.'te, deney boyunca da iki uç arasındaki akımları kaydeden akım kaydedici arduino sistemi Şekil 3.16.'da ve bu sistem kurularak elde edilen örnek akım ölçümleri Şekil 3.17.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Elektriksel kür uygulanması ve seri bağlantı şeması



Şekil 3.16. Çalışma kapsamında tasarlanmış ve üretilmiş akım kaydedici arduino devre elemanı



Şekil 3.17. Akım ölçme sisteminin bilgisayar ile bağlantısı ve elde edilen örnek akım ölçümleri

Elektriksel kür uygulanmasında geopolimer harçlara uygulanabilecek etkin gerilim değerlerinin belirlenmesi kapsamında harçların üretimi “3.2.1.1. Isıl Kür ve Uygulanabilir Sıcaklık Değerlerinin Belirlenmesi” bölümünde anlatıldığı gibi yapılmış ve 100x100x100 mm’lik kalıplara yerleştirilmiştir. Bu harçlara elektriksel kür uygulanması aşamaları Şekil 3.18.’de gösterilmiştir.



Karışımın kalıplara
şişlenerek
yerleştirilmesi

AC Güç kaynağının hazırlanması
($30/3=10$ volt)

Deney düzeneğinin hazırlanması
ve elektriksel kür uygulaması

Şekil 3.18. 100x100x100 mm küp numunelerin dökümü ve deney düzeneğinin hazırlanması

Elektriksel kürde, kalıplar kendi arasında seri bağlı bir sistem olduğu için (Şekil 3.15.) her bir kalıptaki beton numunenin maruz kaldığı gerilim değeri, uygulanan toplam gerilim değerinin numune sayısına bölünmesi ile basitçe hesaplanabilir. (Denklem 3.1.)

$$V_{sistem} = \frac{\text{Cihazdan Çıkan Gerilim}}{\text{Numune Sayısı}} = V_{sol} = V_{orta} = V_{sağ} \quad (3.1)$$

3.2.2. Harç deneyleri

Ön deney sonucunda belirlenen sıcaklık, geopolimer karışım dizaynı, uygulanabilir gerilim değeri ve süre parametreleri göz önünde bulundurularak geopolimer harçların, ısıl kür ve elektriksel kür yöntemi ile ayrı ayrı üretimi aşamasına geçilmiştir. Bu aşamaların detayları aşağıda verilmiştir.

3.2.2.1. Isıl kür ile harç üretimi

100x100x100 mm'lik kalıplar kullanılarak üretilen harçlara, ısıl kür ve uygulanabilir sıcaklık değerlerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen ön deneyler sonucunda seçilen 60, 80, 100 ve 120 °C sıcaklık değerleri kullanılarak 6 ve 12 saat süre ile ısıl kür uygulanmıştır.

3.2.2.2. Elektriksel kür ile harç üretimi

100x100x100 mm'lik kalıplar kullanılarak üretilen harçlara, elektriksel kür gerilim değerlerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen ön deneyler sonucunda seçilen 20, 25, 30, 35 volt gerilim değerleri kullanılarak 6 ve 12 saat süre ile elektriksel kür uygulanmıştır.

3.2.2.3. Elektriksel kür ve ısıl kür ile üretilen harçların basınç dayanımlarının belirlenmesi

Elektriksel kürde 4 farklı gerilim değeri, 4 Ms modülüne göre karışım dizaynı ve 2 farklı süre kullanılarak 32 farklı parametre ile 3 tekrarlı olacak şekilde toplamda 96 harç numunesi üretilerek, üretilen tüm harçların basınç dayanımları belirlenmiştir. Isıl kürde ise 4 farklı gerilim değeri yerine 4 farklı sıcaklık değeri kullanılarak yine 3 tekrarlı olacak şekilde 96 harç numunesi üretilmiş ve üretilen harçların basınç dayanımları belirlenmiştir. Toplam 192 harç numunesinde gerçekleştirilen basınç dayanımı deneyleri sonrasında elektriksel kür için bir kombinasyon ve ısıl kür içinde bir kombinasyona sahip tasarım nihai beton deneylerini gerçekleştirmek üzere seçilmiştir. Numune seçiminde her iki kür uygulaması için seçilen harçların yaklaşık basınç dayanımına sahip olması referans parametre olarak göz önünde bulundurulmuştur.

3.2.3. Beton deneyleri

Elektriksel kür ve ısıl kür yöntemi ile üretilen harçlardan seçilecek nihai parametrelerle geopolimer beton üretimi aşamasına geçilmiş ve bu betonlar üzerinde kür yönteminin etkisini incelemek amacı ile fiziksel ve mekanik özellikler üzerine çeşitli deneyler yapılmıştır. Geopolimerler beton karışımlar, harç karışımlardan farklı olarak CEN standart kumu yerine totalde aynı miktarda olacak şekilde farklı oranlarda DYK halde ince ve iri agrega içermektedir. Geopolimer üretim aşamaları Şekil 3.19.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Geopolimer beton üretimi

Geopolimer beton üretiminin ardından mekanik ve fiziksel özellik deneylerine geçilmiştir. Tez kapsamında geopolimer betonlar ve geleneksel PÇ betonlara uygulanan deneyler alt başlıklar halinde sunulmuştur.

3.2.3.1. Basınç dayanımı

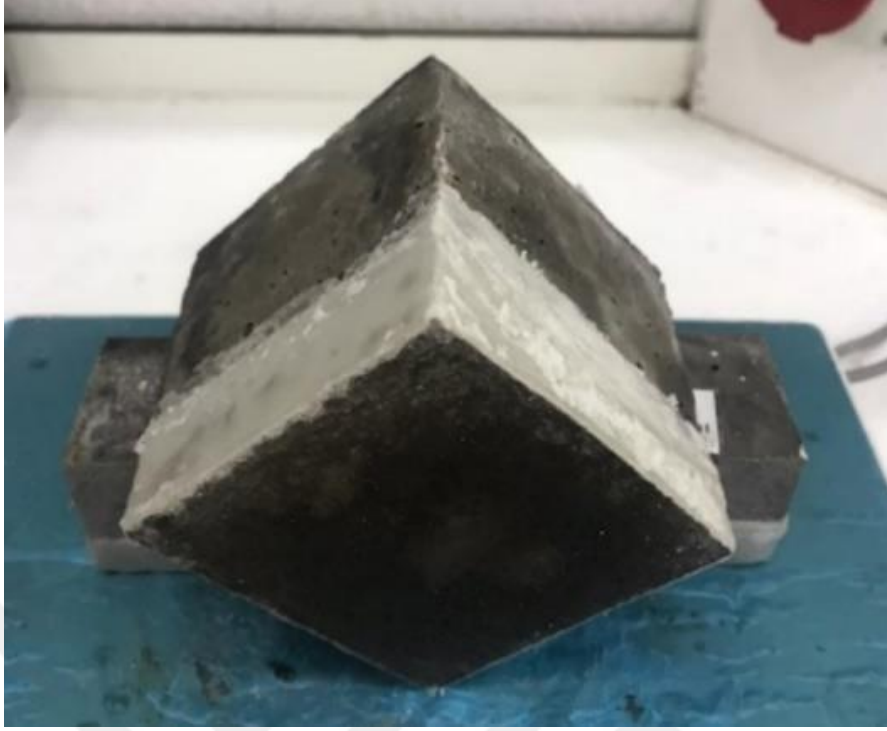
Çalışma kapsamında, ön deneyler sonrası referans olarak seçilen ve ısıtılma kütür/elektriksel kütür uygulanarak üretilen betonlar üzerinde basınç dayanımı deneyleri 100x100x100 mm kütür numuneler kullanılarak TS EN 196-1'e ve TS EN 12390-3'e [150] uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.20.). Basınç dayanımı deneyinde yüklenme hızı; ilgili standartta 0,2-1,0 MPa/sn aralığında verilmiş olup tez çalışması kapsamında 0,6 MPa/sn olarak seçilmiştir.



Şekil 3.20. Geopolimer harç ve betonların basınç dayanım tayini

3.2.3.2. Kılcallık deneyi

Tez çalışmasında üretilen betonların kılcallıkları ASTM C1585 – 11 [151] standardına uygun olarak belirlenmiştir. Kılcallık katsayısı belirlenirken tez çalışması boyunca kullanılan 100x100x100 mm boyutlarındaki kalıplarda üretilen beton numuneler kullanılmıştır. Kılcallık deney numunelerinin yan yüzeyleri Şekil 3.21.'de gösterilen şekilde parafin ile kaplanmıştır.



Şekil 3.21. Parafin ile kaplanan numuneler

Parafin ile kaplanan numunelerin etüv kurusu başlangıç ağırlıkları not edilmiş ve daha sonra bu numuneler Şekil 3.22.'de görülen 5 mm yüksekliğe kadar su ile dolu deney düzeneği içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.22. Kılcallık deney düzeneği

Deney başlangıcından itibaren numuneler 1., 2., 3., 4., 6., 8., 12., 16., 20., 25., 36., 49., 64., 81. ve 120. dk.'larda deney düzeneğinden alınarak 0.01 g hassasiyetli tartı ile (Şekil 3.23.) tartılmıştır.



Şekil 3.23. Kılcallık deneyinde kullanılan 0,01 g hassasiyetli elektronik tartı

Ağırlıklar, her bir zaman aralığında not edilmiş ve ağırlık farkı (Q), zaman (t) ve yüzey alanı (A) ilişkisi ile kılcallık katsayısı Denklem 3.2.'ye göre belirlenmiştir.

$$\frac{Q}{A} = k \cdot \sqrt{t} \quad (3.2)$$

Q= Numune ağırlığı

A=Yüzey alanı

\sqrt{t} = belirli zaman aralıklarının kare kökü

3.2.3.3. *Ultrases geçiş hızı deneyi*

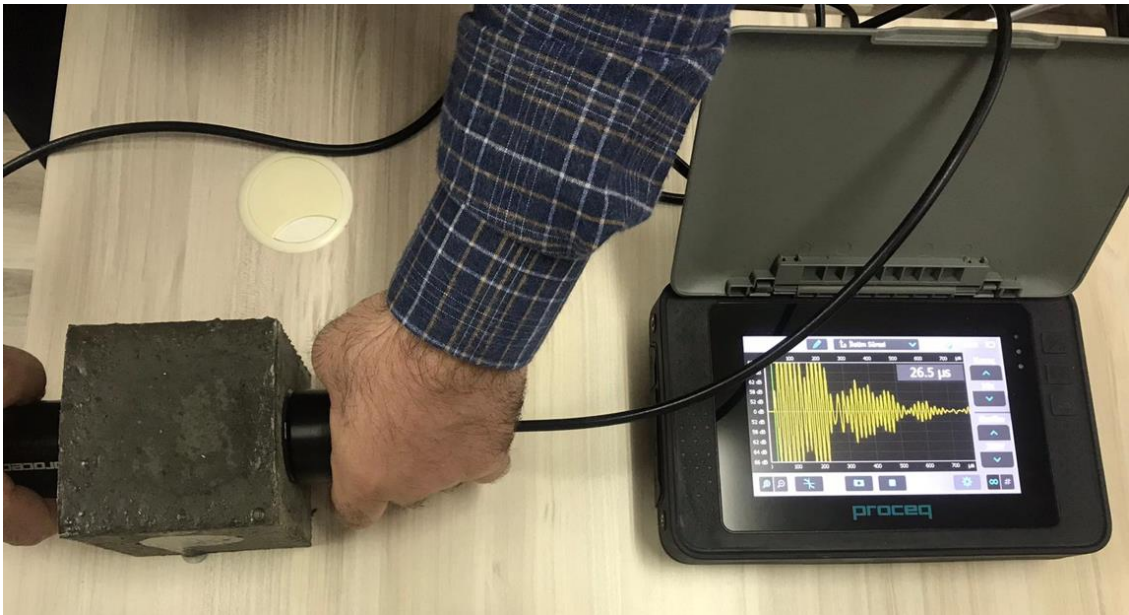
Tez çalışmasında üretilen beton numuneler üzerinde ultrases geçiş hızı deneyi, beton numunelerin kalıp tabanına dik doğrultularında uygulanmıştır. Numuneler düzgün bir zemin üzerine yerleştirildikten sonra uygulama yapılacak doğrultu fırça yardımı ile temizlenmiş ve Şekil 3.24'teki gösterilen alıcı ve verici problara ultrasonik jel sürülerek numune ile proplar arasında boşluk kalmayacak şekilde numunelerde ölçümler gerçekleştirilmiştir [152,153].



Şekil 3.24. Ultrases hızı deney aleti

Ultrases hız ölçümü beton basınç dayanımı hakkında kesin bilgi vermemekle birlikte bu parametre hakkında fikir sahibi olmamızı sağlar. TS EN 12504-4 ve ASTM C597 standartları, ultrasonik test yönteminin uygulanmasında baz alınan standartlardır [154-156].

Ultrases geçiş hızı cihazı yardımı ile beton içerisinden geçen ses dalgası mikrosaniye (μs) cinsinden bulunmuş (Şekil 3.25.) ve iki uç arasındaki mesafeye bölünerek Tablo 3.8.'de [157] gösterilen sınıflar içerisinden beton sınıfı belirlenmiştir.



Şekil 3.25. Beton numunelerin UGH ölçümleri

Tablo 3.8. Ultrases geçiş hızına göre beton kalitesi [153]

UGH (km/sn)	Beton Kalitesi
>4,5	çok iyi
3,5 – 4,5	İyi
3,0 – 3,5	Orta
<3,0	Kötü

3.2.3.4. Böhme aşınma deneyi

Deneyde kullanılacak numuneler 71x71x71 mm olacak şekilde kesilmiştir. Kesim aşaması ve kesilen numuneler şekil 3.26. ve şekil 3.27.'de gösterilmiştir.



şekil 3.26. Üretilen betonların böhme aşınma deneyi için kesilmesi



şekil 3.27. Kesilen beton numuneler

Böhme aşınma deneyi, geopolimer betonlar ile karşılaştırma amacıyla üretilen geleneksel çimentolu beton numunelerin üst yüzünün F80 tane büyüklüğüne sahip zımpara tozu ile aşındırılması yoluyla TS 2824 EN 1338 [157] standardına uygun olarak uygulanmıştır. Deney uygulaması Şekil 3.28.'de gösterilmiştir.



Böhme aşınma deney aleti



Beton numune ve aşındırıcı toz

Şekil 3.28. Böhme aşınma deneyi uygulaması

3.2.3.5. *Betonların birim hacim ağırlık, görünür porozite ve su emme özellikleri*

Çalışma kapsamında üretilen beton numunelerin doymun kuru yüzey ağırlıkları, Arşimet terazisi metodu ile sudaki ağırlıkları ve etüv kurusu ağırlıkları belirlenmiştir (Şekil 3.29.). Denklem 3.3., Denklem 3.4. ve Denklem 3.5. yardımıyla numunelerin birim hacim ağırlıkları, su emmeleri ve görünür poroziteleri belirlenmiştir [158].

$$\text{Birim Hacim Ağırlık (kg/m}^3\text{)} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad (3.3.)$$

$$\text{Su Emme (\%)} = \frac{m_1 - m_3}{m_3} * 100 \quad (3.4.)$$

$$\text{Görünür Porozite (\%)} = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} * 100 \quad (3.5.)$$

m_1 : suya doymun havada ağırlık (kg);

m_2 : su içerisinde asılı ağırlık (kg);

m_3 : etüv kurusu ağırlık (kg) değerlerini ifade etmektedir.

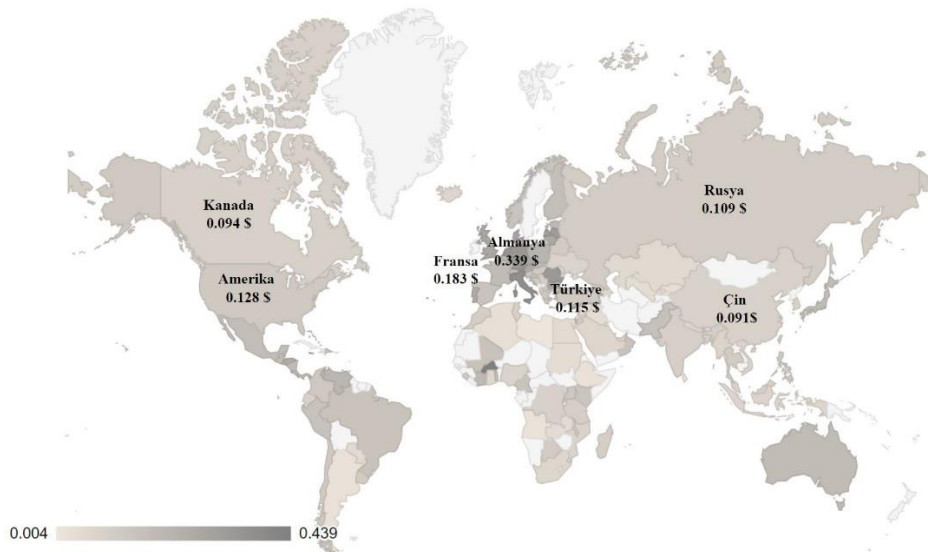


a: suya doygun havada ağırlık b: su içerisinde asılı ağırlık c: etüv kurusu ağırlık

Şekil 3.29. Beton numunelerin ağırlıklarının belirlenmesi

3.2.3.6. Maliyet Analizi

Geopolimer harç ve betonların dayanım kazanmasında ısıl kür uygulaması yaygın olarak kullanılmakta fakat bu kür uygulamasında ortaya çıkan enerji tüketimi genellikle göz ardı edilmektedir. Dünyada ve ülkemizde elektrik birim fiyatının artış göstermesi enerji konusunda tasarrufa önem verilmesi gerekliliği konusunu ön plana çıkardığı için bu tez çalışmasında enerji tüketim maliyetleri hesaplanmıştır. Şekil 3.30., 2022 yılı aralık ayında çeşitli ülkelerde sanayi kullanımları için kWh başına elektrik ücretlerinin globalpetrolprices.com’da yer alan dolar bazlı güncel birim fiyatlarını göstermektedir ve çalışmadaki maliyet analizinde bu güncel birim fiyatlar kullanılmıştır.



Şekil 3.30. Çeşitli ülkelerde kwh başına elektrik birim fiyatı (\$) [159]

Çalışmadaki bulgular ve literatürde geleneksel betonlara uygulanan elektriksel kür uygulaması ile ilgili çalışmalar dikkate alındığında, geopolimer betonların çok daha düşük gerilim değerlerinde dayanım kazanabilmesi ve bu sayede daha düşük bir elektrik enerjisi tüketme potansiyeli, yapılacak olan bu maliyet analizini daha anlamlı hale getirmektedir.

Çalışma kapsamında üretilen tüm harç numunelerin her bir saat aralığında sarf ettikleri enerji kW.h cinsinden Denklem 3.6. ve Denklem 3.7.'ye göre bulunmuş ve harcanan elektrik miktarı kW cinsinden ifade edilmiştir. Deney esnasında kaydedilen akım değerleri ve bilinen gerilim değerleri ile bulunan elektrik sarfıyatı, ülke bazında elektrik tüketiminin birim fiyatı ile çarpıldığında her bir ülkede potansiyel enerji maliyeti Denklem 3.8.'e göre hesaplanabilir.

$$\text{Güç (Watt)} = \text{Akım (I)} * \text{Gerilim (V)} \quad (3.6.)$$

$$\text{Saatlik Enerji Tüketimi} = \text{kW.h} \quad (3.7.)$$

$$\text{Enerji Tüketimi} * \text{Elektrik Birim Fiyatı (\$)} = \text{Harcanan elektrik ücreti (\$)} \quad (3.8.)$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Ön Deneyler ile Belirlenen Deney Parametrelerine Ait Bulgular

4.1.1. Aktivatör sıcaklıklarının belirlenmesi

Geopolimer üretiminde en önemli aşamalardan bir tanesi de kullanılacak olan aktivatörün hazırlanması ve oda sıcaklığına getirilmesidir. Bu çalışmada, aktivatör çözeltileri tüm karışımlar için dökümden 24 saat önce hazırlanmış ve döküm esnasına kadar oda sıcaklığına ulaşacak şekilde soğumaya bırakılmıştır. Çalışmada hazırlanan tüm aktivatör çözeltilerinin ölçülen ilk sıcaklık değerleri Tablo 4.1.'de verilmiştir.

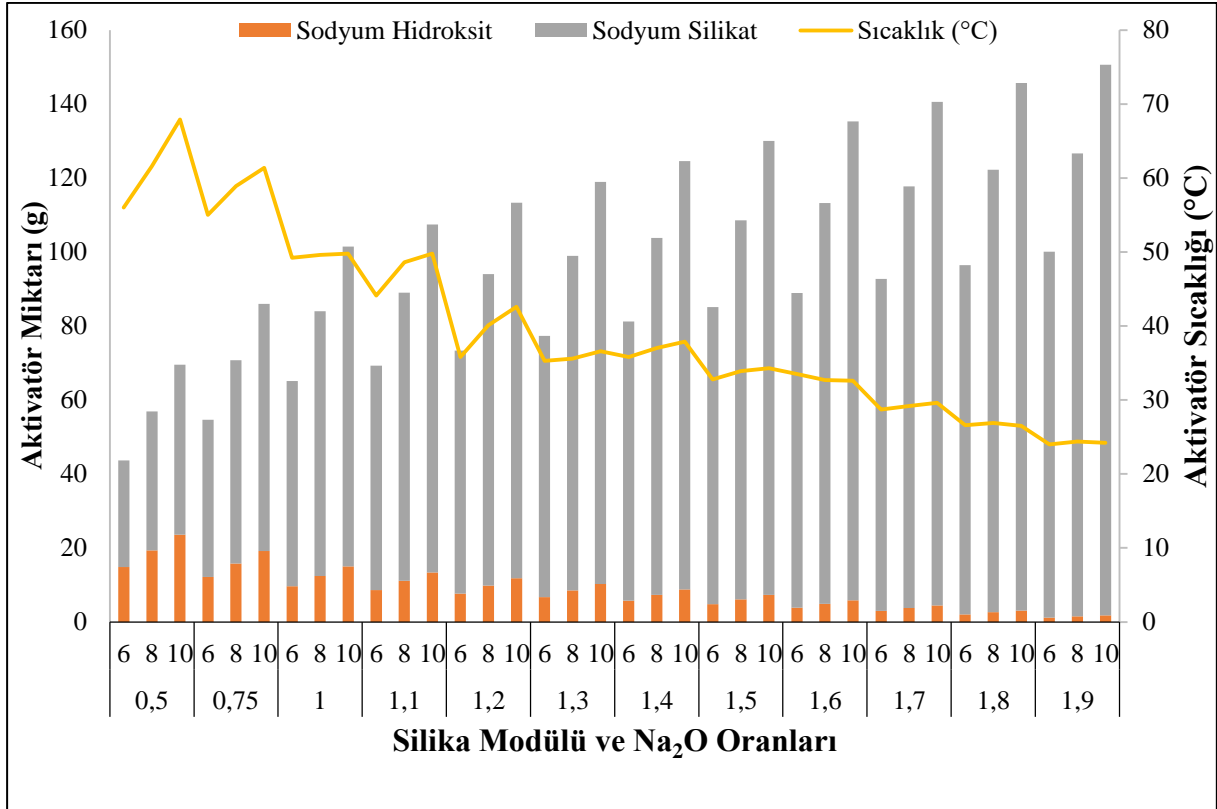
Tablo 4.1. Aktivatör sıcaklık değerleri

Ms	Na ₂ O (%)	Sodyum Silikat (g)	Sodyum Hidroksit (g)	Sıcaklık (°C)
0,5	6	28,8	14,8	56
	8	37,6	19,3	61,6
	10	45,9	23,6	67,9
0,75	6	42,4	12,2	55
	8	55,0	15,8	58,9
	10	66,8	19,2	61,4
1	6	55,5	9,6	49,2
	8	71,6	12,4	49,6
	10	86,5	15,0	49,8
1,1	6	60,6	8,6	44,1
	8	78,0	11,1	48,6
	10	94,1	13,4	49,8
1,2	6	65,7	7,7	35,8
	8	84,3	9,8	40,1
	10	101,5	11,8	42,6
1,3	6	70,6	6,7	35,3
	8	90,4	8,6	35,6
	10	108,7	10,3	36,6

Tablo 4.1. Aktivatör sıcaklık değerleri (devamı)

1,4	6	75,5	5,7	35,8
	8	96,5	7,3	37
	10	115,8	8,8	37,9
1,5	6	80,3	4,8	32,8
	8	102,4	6,1	33,9
	10	122,7	7,3	34,3
1,6	6	85,1	3,9	33,5
	8	108,3	4,9	32,7
	10	129,5	5,9	32,6
1,7	6	89,8	3,0	28,7
	8	114,0	3,8	29,2
	10	136,1	4,5	29,6
1,8	6	94,4	2,1	26,6
	8	119,6	2,6	26,9
	10	142,5	3,1	26,5
1,9	6	98,9	1,2	24,0
	8	125,2	1,5	24,4
	10	148,9	1,8	24,2

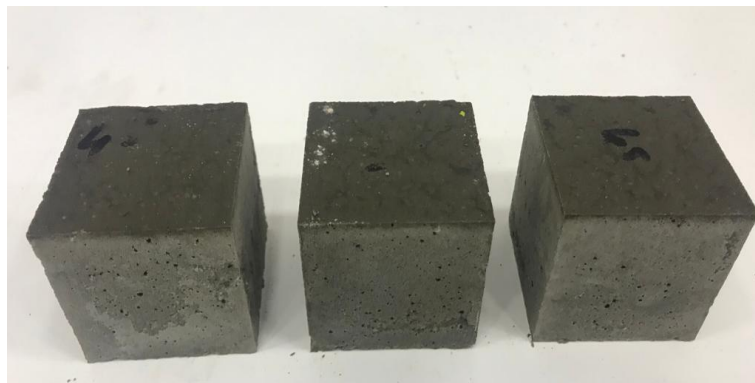
Elde edilen bulgular incelendiğinde, en yüksek aktivatör sıcaklık değerinin 67,9 °C ile 0,5 Ms modülü ve %10 Na₂O içeren çözeltiliye ait olduğu, en düşük aktivatör sıcaklık değerinin ise 24,2 °C ile 1,9 Ms modülü ve %6 Na₂O içeren çözeltiliye ait olduğu belirlenmiştir. Bulgular genel olarak Ms modülü ve Na₂O parametrelerine göre değerlendirildiğinde, Ms oranındaki artış ile birlikte (sabit Na₂O oranında) sıcaklık değerinin düştüğü, fakat aynı Ms modülüne sahip karışımlarda Na₂O oranındaki artış ile birlikte alkali aktivatörün ilk karışım sıcaklığının artış gösterdiği görülmüştür. Tablo 4.1.'deki karışım verilerinden ve Şekil 4.1.'den de görüleceği üzere, sodyum silikat içerisinde çözünen sodyum hidroksit miktarı arttıkça aktivatör tepkime sıcaklığı da artış göstermektedir.



Şekil 4.1. Ms modülü ve Na₂O konsantrasyonuna bağlı olarak değişen sodyum silikat/sodyum hidroksit miktarı ve aktivatör sıcaklıkları

4.1.2. Isıl kür için uygun sıcaklık değerlerinin belirlenmesi

Isıl kür için uygun sıcaklık değerlerinin belirlenmesi amacı ile hazırlanan 1,6 Ms – %8 Na₂O'ya sahip harçlar 3 gözlü 50x50x50 mm'lik çelik kalıplara dökülmüş ve harçlara 45, 60, 80, 90, 100 ve 120 °C sıcaklık değerlerinde ayrı ayrı 24 saat boyunca ısıl kür uygulanmıştır. Çalışma kapsamında 45, 60, 80, 90, 100 ve 120 °C etüvde kürlenmiş numuneler sırasıyla Şekil 4.2., Şekil 4.3., Şekil 4.4., Şekil 4.5., Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.'de gösterilmiştir.



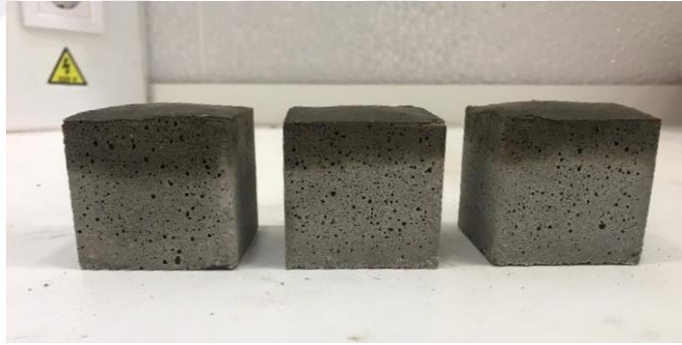
Şekil 4.2. 45 °C'de kürlenmiş numuneler



Şekil 4.3. 60 °C'de kürlenmiş numuneler



Şekil 4.4. 80 °C'de kürlenmiş numuneler



Şekil 4.5. 90 °C'de kürlenmiş numuneler



Şekil 4.6. 100 °C'de kürlenmiş numuneler

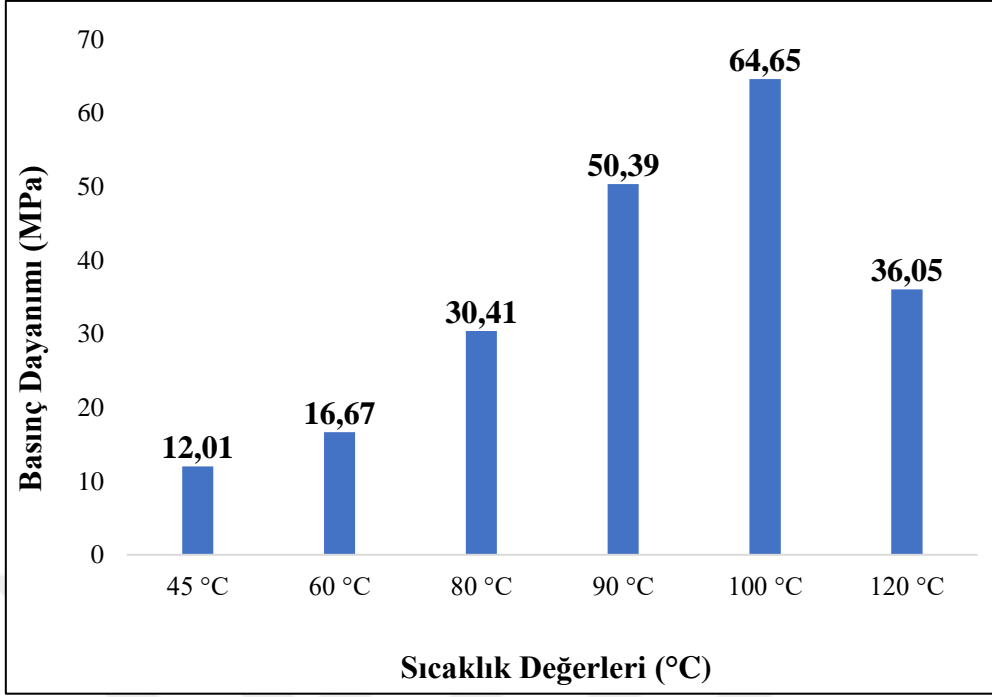


Şekil 4.7. 120 °C’de kürlenmiş numuneler

Numuneler üzerinde görsel analiz yapıldığında artan sıcaklık ile birlikte geopolimer harçların üst yüzeyinin sıcaklığa bağlı bir şişme gösterdiği görülmüştür. 24 saat etüvde bekletilen numuneler etüvden alınarak kalıptan çıkartılmış ve oda sıcaklığında 24 saat boyunca bekletilmiştir. 24 saat ısıtılma uygulamasının ardından 24 saat oda sıcaklığında bekletilen harç numuneler üzerinde bu sürelerin sonunda tek eksenli basınç testi uygulanmıştır. Sabit Ms – Na₂O’ya sahip harçlara farklı sıcaklıklarda uygulanan ısıtılma sonrası elde edilen basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 4.2.’de ve 3 tekrarlı olacak şekilde uygulanan deneylerin ortalama değerleri ise Şekil 4.8.’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Farklı sıcaklıkların basınç dayanımına etkisi

Sıcaklık Değerleri	Dayanım Değerleri (MPa)		
45 °C	11,94	11,81	12,29
60 °C	14,17	17,29	18,54
80 °C	31,08	29,61	30,53
90 °C	53,53	43,26	54,38
100 °C	54,53	69,56	69,86
120 °C	42,5	32,31	33,35

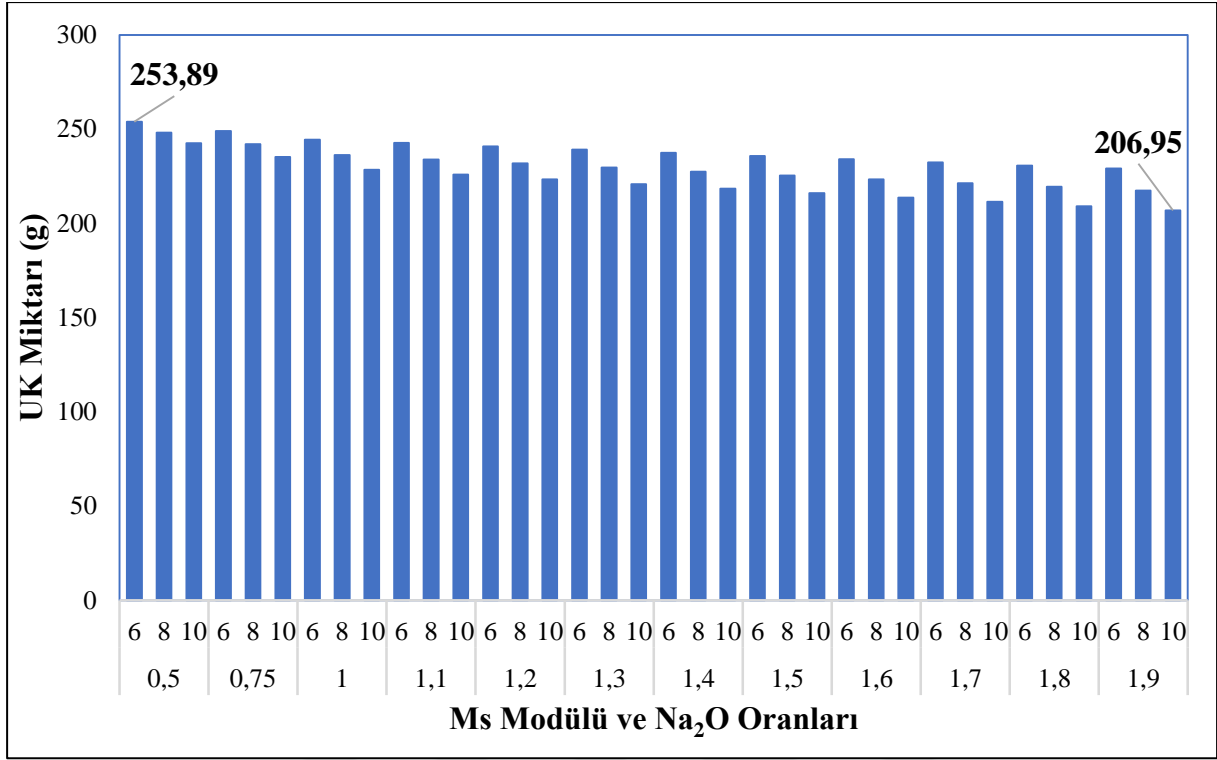


Şekil 4.8. 1,6 Ms – %8 Na₂O ortalama basınç dayanımı değerleri

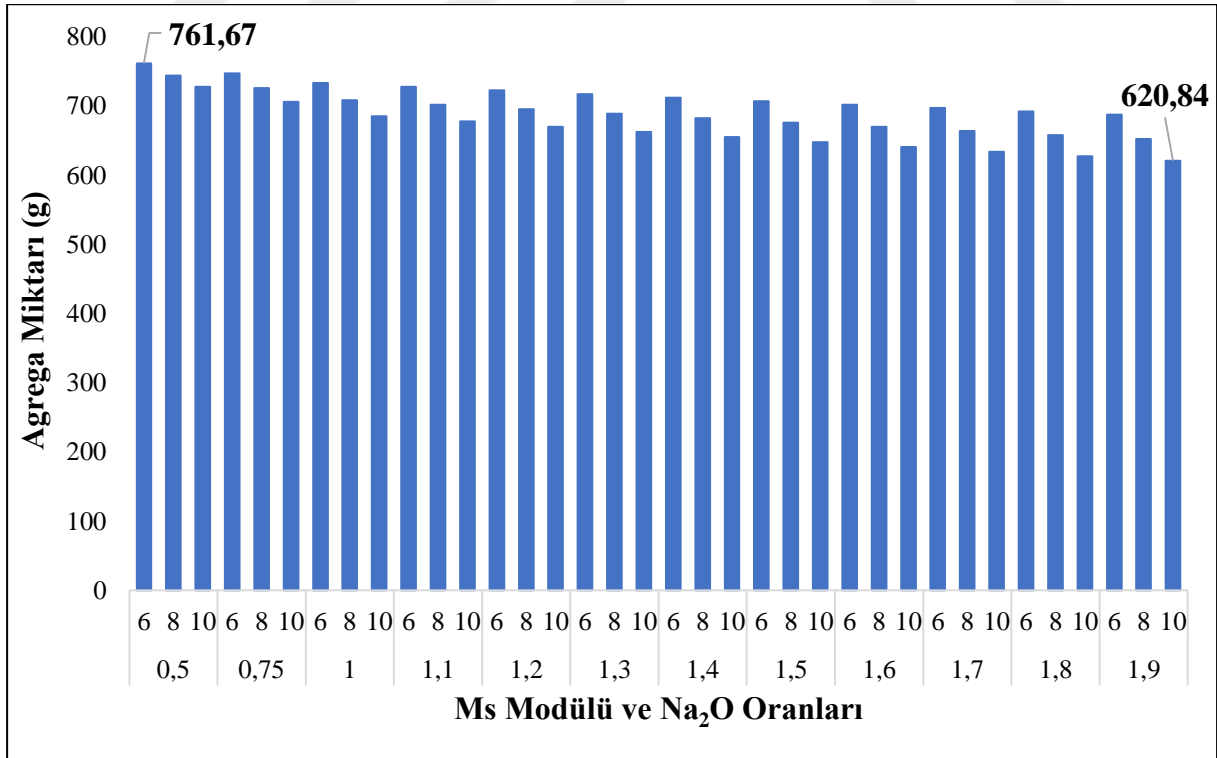
Elde edilen bulgular incelendiğinde; en düşük basınç dayanımının 45 °C ısıl kürde 12,01 MPa olarak ve en yüksek basınç dayanımının ise 100 °C ısıl kürde 64,65 MPa olarak elde edildiği görülmüştür. Ayrıca ısı artışına bağlı olarak geopolimer harçların basınç dayanımının artış eğiliminde olduğu fakat optimum değer olarak görünen 100 °C'nin üzerine çıktığında basınç dayanımında azalma meydana geldiği görülmektedir. Elde edilen bu bulgulara göre elektriksel kür deneylerinde referans olarak kullanılacak optimum ısıl kür sıcaklığının 100 °C olarak seçilmesinin uygun olacağı belirlenmiştir.

4.1.3. İşlenebilirlik/basınç dayanımı kriterine göre Ms modülü ve Na₂O konsantrasyonunun belirlenmesi

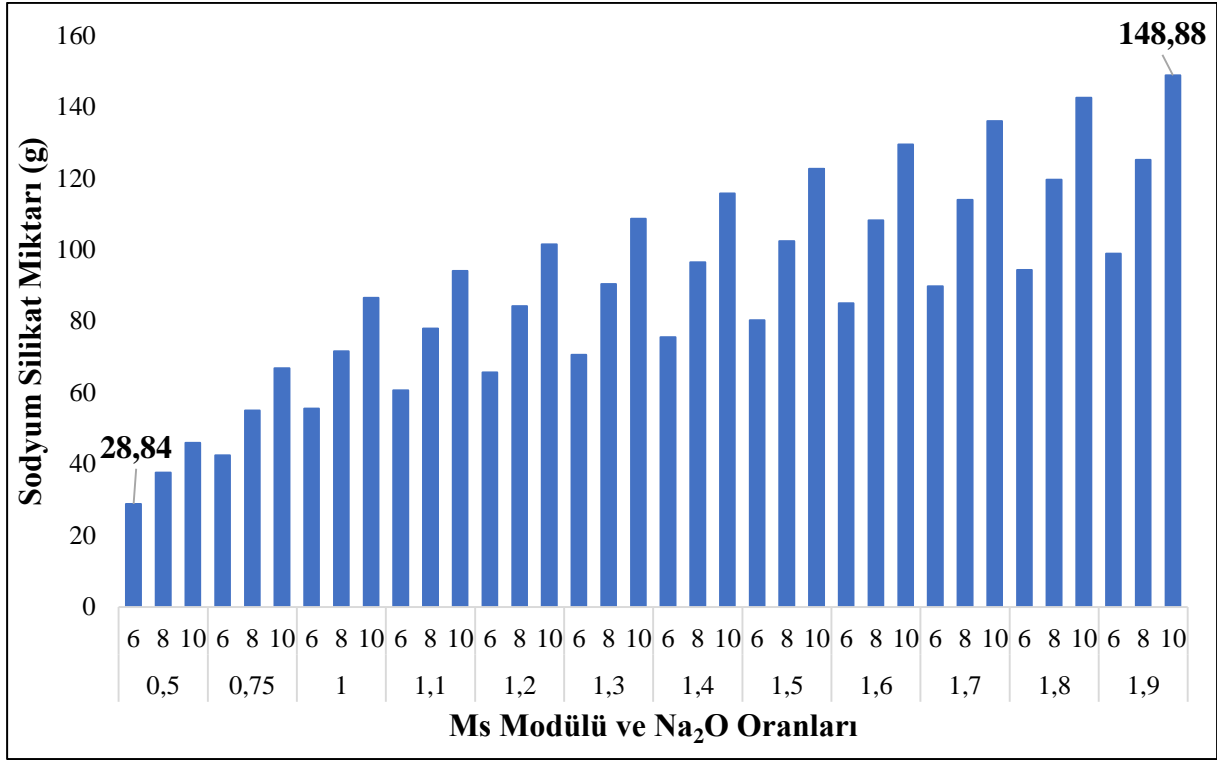
Tez çalışmasında uygun işlenebilirlik değerleri araştırılırken farklı Ms modülleri ve Na₂O konsantrasyonları kullanılmıştır. Bu değişkenler, geopolimer harçlarda kullanılacak olan sodyum silikat – sodyum hidroksit miktarını, uçucu kül miktarını ve kum miktarını etkileyerek işlenebilirlik – dayanım üzerinde önemli rol oynamaktadırlar. Karışım dizaynına bağlı olarak belirlenen UK – Silika modülü – Na₂O – Agrega – Sodyum silikat miktarlarındaki değişimin işlenebilirlikle ilişkilendirilerek yorumlanması amacıyla Şekil 4.9., Şekil 4.10., Şekil 4.11., Şekil 4.12. ve Şekil 4.13. oluşturulmuştur.



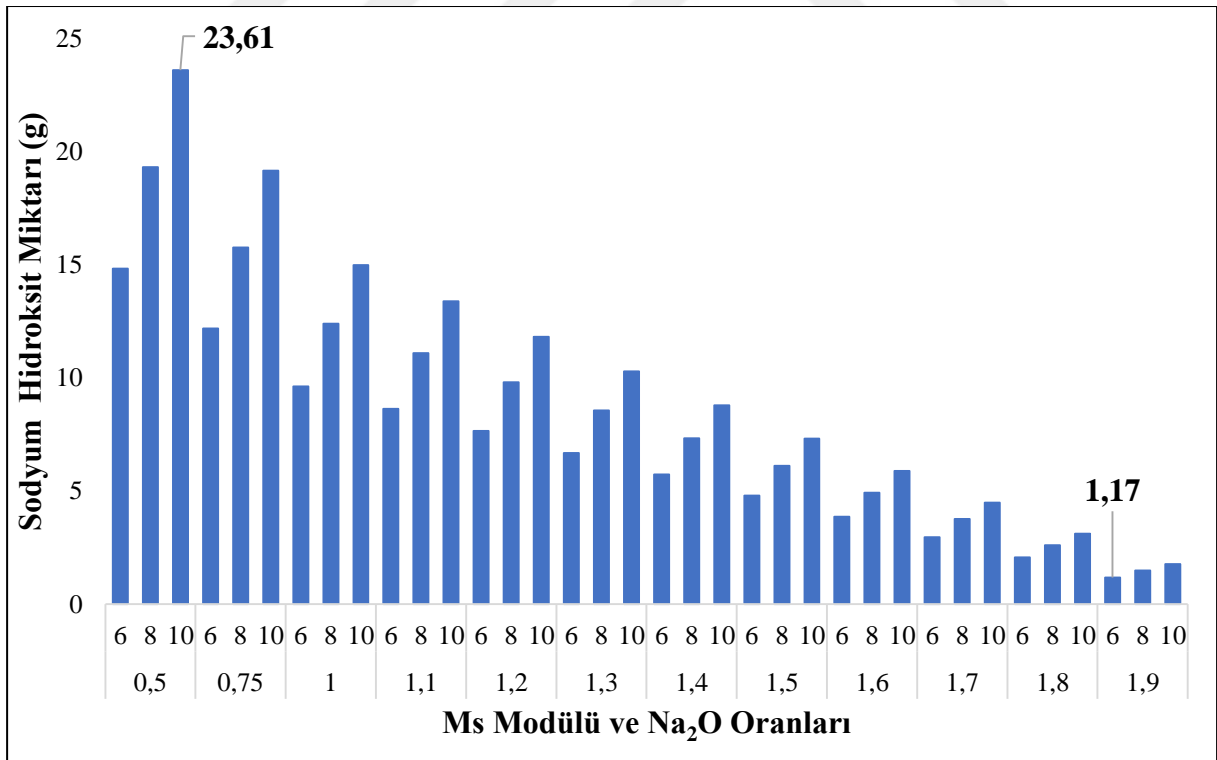
Şekil 4.9. Ms modülü – uçucu kül – Na₂O ilişkisi



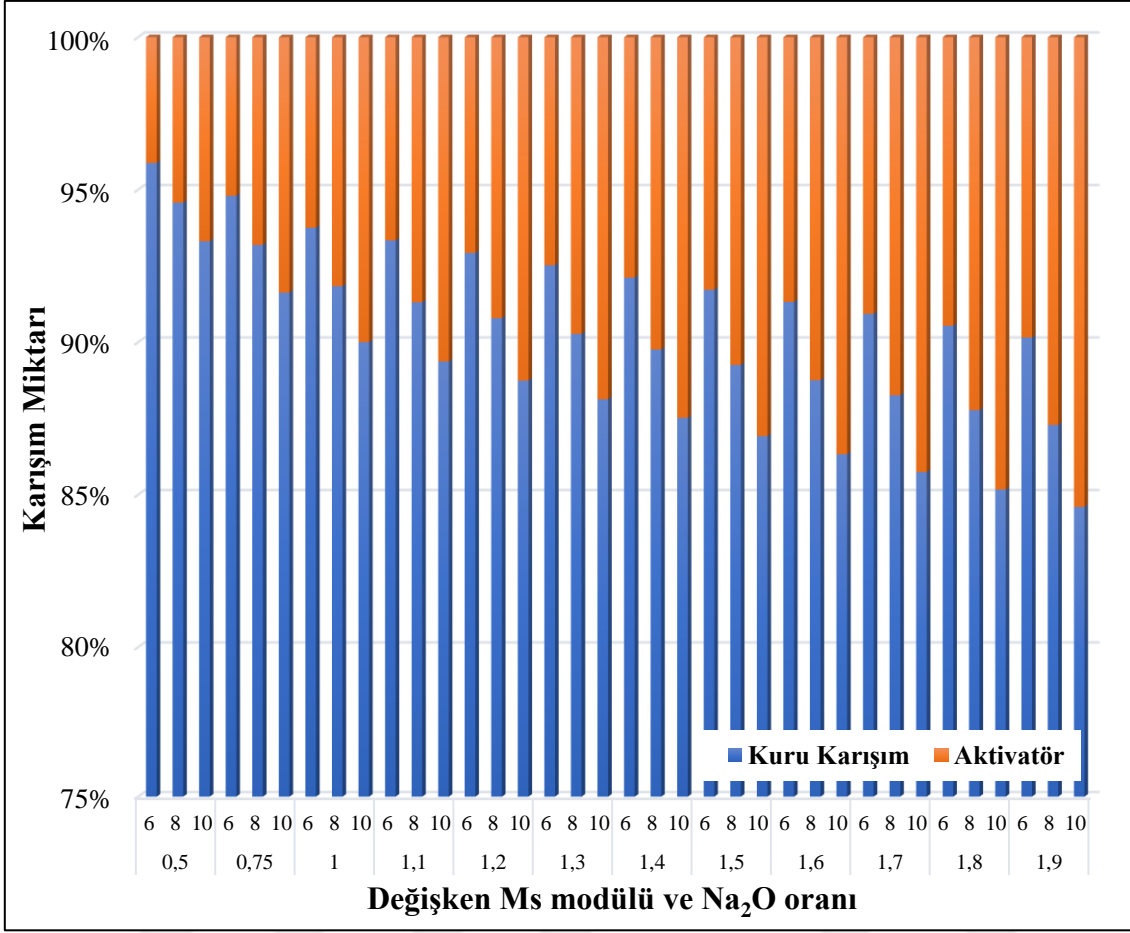
Şekil 4.10. Ms modülü – agregat – Na₂O ilişkisi



Şekil 4.11. Ms modülü – sodyum silikat – Na₂O ilişkisi



Şekil 4.12. Ms modülü – sodyum hidroksit – Na₂O ilişkisi



Şekil 4.13. Ms modülü / Na₂O (%) – kuru karışım – aktivatör ilişkisi

Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.’da her bir Ms modülüne (1,4 – 1,9 arasında) bağlı olarak değişen Na₂O yüzdeleri (%6, 8, 10) ve bu değişimlerin, üretimde kullanılan uçucu kül ve agrega miktarını nasıl değiştirdiği görülmektedir. Elde edilen bulgulara göre; kullanılması planlanan uçucu kül miktarı en yüksek, 253,89 g değeri ile 0,5 Ms – %6 Na₂O karışımında bulunurken kullanılması planlanan uçucu kül miktarı en düşük 253,89 g değeri ile 1,9 Ms – %10 Na₂O karışımında bulunmuştur. Uçucu kül miktarı, teorik hesaplamalarda agrega miktarının 1/3’ü olduğundan UK’daki değişim kullanılacak agrega miktarını da aynı oranda değiştirmektedir. Genel anlamda Ms oranı arttıkça, kullanılması planlanan UK ve agrega miktarının azaldığı, ayrıca sabit Ms değerlerinde karışımdaki Na₂O yüzdeleri arttırıldığında da aynı şekilde kullanılması planlanan UK ve agrega miktarının azaldığı görülmektedir.

Şekil 4.11. ve Şekil 4.12.’de, her bir Ms modülüne (1,4 – 1,9 arasında) bağlı olarak değişen Na₂O yüzdeleri (%6, 8, 10) ve bu değişimlerin, üretimde kullanılan sodyum silikat ve sodyum

hidroksit miktarına etkisi görülmektedir. Elde edilen bulgulara göre; kullanılması planlanan sodyum silikat miktarı en düşük, 28,84 g değeri ile 0,5 Ms – %6 Na₂O karışımında bulunurken en yüksek sodyum silikat miktarı 148,88 g değeri ile 1,9 Ms – %10 Na₂O karışımında bulunmuştur. Kullanılması planlanan sodyum hidroksit miktarı ise en yüksek, 23,61 g değeri ile 0,5 Ms – %10 Na₂O karışımında bulunurken en düşük 1,17 g değeri ile 1,9 Ms – %6 Na₂O karışımında bulunmuştur. Buna göre, Ms oranındaki artış ile birlikte kullanılması planlanan sodyum silikat miktarı genel bir artış, sodyum hidroksit miktarı ise genel bir azalış eğilimindedir. Sabit Ms modüllerinde Na₂O etkisi değerlendirildiğinde ise, Na₂O konsantrasyonundaki artış ile birlikte sodyum silikat miktarı azalış, sodyum hidroksit miktarı ise artış eğilimindedir.

Son olarak Şekil 4.13. incelenecek olursa, Ms modülü arttıkça toplam hacimde kullanılan kuru karışım miktarının azaldığı bu esnada da aktivatör miktarının arttığı görülmektedir. Aynı durum sabit Ms Modülünde artan Na₂O %'si için de geçerlidir. Sonuç olarak agrega – UK yani kuru malzeme karışımındaki azalma ve karışıma giren sıvı çözelti miktarındaki artış işlenebilirliği belirgin bir şekilde arttırmaktadır.

Çalışma kapsamında hazırlanan 36 farklı geopolimer harç karışımlarının çimento yayılma tablası yardımı ile belirlenen yayılma çapları Tablo 4.3.'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Harç karışımlarının yayılma değerleri

Ms	NA ₂ O (%)	Yayılma (1) (cm)	Yayılma (2) (cm)	Yayılma (ort) (cm)
0,5	6	10	10	10
	8	10	10	10
	10	10	10	10
0,75	6	10	10	10
	8	10	10	10
	10	10	10	10
1	6	10	10	10
	8	10	10	10
	10	10	10	10
1,1	6	10	10	10
	8	10	10	10
	10	10	10	10

Tablo 4.3. Harç karışımlarının yayılma değerleri (devamı)

1,2	6	10	10	10
	8	10	10	10
	10	12,1	12,2	12,15
1,3	6	10	10	10
	8	10	10	10
	10	13	12,9	12,95
1,4	6	10	10	10
	8	10,7	10,9	10,8
	10	15	15,1	15,05
1,5	6	10	10	10
	8	12	12	12
	10	16,1	16,4	16,25
1,6	6	10	10	10
	8	13,8	14	13,9
	10	19,1	19,4	19,25
1,7	6	10	10	10
	8	14,4	14,6	14,5
	10	21,7	21,6	21,65
1,8	6	10	10	10
	8	16,7	16,9	16,8
	10	23,2	23,1	23,15
1,9	6	11	11	11
	8	17,6	18,4	18
	10	26,5	26,4	26,45

Elde edilen bulgulara göre, Ms modülü 0,5'ten 1,1'e kadar tüm Na₂O değişkenlerinde toplamda 12 harç karışımında ve Ms 1,2 ile Na₂O %10'a kadar olan toplamda 2 karışımında herhangi bir yayılma gözlenmemiştir. Bu durum, bahsi geçen 14 farklı karışımın harç/beton üretimi için uygun olmadığını göstermektedir.

İlk yayılma, 12,15 mm ile 1,2 Ms – %10 Na₂O karışımında gerçekleşmiş ve artan Ms modülüne ve Na₂O oranına bağlı olarak harçlardaki yayılma artış göstermiştir. Bulgular incelendiğinde, geopolimer harçlarda yayılma çapını etkileyen en temel etkenin aktivatör çözeltisindeki Na₂O konsantrasyonu olduğu görülmektedir. 1,9 Ms değerine kadar %6 Na₂O konsantrasyonuna sahip harçlar hiç yayılma göstermez iken düşük Ms modüllerinde Na₂O konsantrasyonundaki her artış işlenebilirlik üzerinde olumlu bir etki yapmıştır. Öyle ki Ms modülü 1,9 değerinde sabit tutulduğunda %6'dan %8'e çıkarılan Na₂O konsantrasyonu geopolimer harçta yaklaşık

olarak %64 daha fazla yayılmaya neden olmuş ve %6'dan %10'a çıkarıldığında ise yaklaşık olarak %140 daha fazla yayılmaya neden olmuştur.

Tasarlanan tüm karışımlar için 50x50x50 mm boyutlarındaki üçer adet küp numune hazırlanmış ve hazırlanan bu numunelere 24 saat 100 °C'de ısıtılma uygulanmıştır. Isıtılma sonrası 24 saat laboratuvar ortamında bekletilen küp numunelere tek eksenli basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Yeterli işlenebilirlik ve yapısal stabilite gösteren tüm harçlardan elde edilen basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 4.4.'te verilmiştir.

Üretilen Geopolimer harçlarda Ms 0,5'den 1,1'e kadar tüm Na₂O değişkenlerinde toplamda 12 harç karışımında herhangi bir yayılma gözlenmemiş ve işlenebilirlik elde edilememiştir. Çok kuru kalan veya topaklanma gösteren bu harçlara basınç dayanımı testi uygulanamamıştır.

Tablo 4.4. Harç karışımların basınç dayanım değerleri

MS	Na ₂ O (%)	1. numune (MPa)	2. numune (MPa)	3. numune (MPa)	Ortalama (MPa)
1,2	6	10,35	10,39	11,11	10,62
	8	33,8	33,8	33,1	33,57
	10	75,84	77,06	71,81	74,90
1,3	6	14,51	14,58	13,61	14,23
	8	67,53	66,55	60,45	64,84
	10	69,97	68,51	69,12	69,20
1,4	6	17,92	15,62	17,78	17,11
	8	65,34	70,9	67,66	67,97
	10	73,53	72,98	75,42	73,98
1,5	6	45,62	37,11	36,8	39,84
	8	65,95	66,44	64,98	65,79
	10	58,2	61,74	61,8	60,58
1,6	6	49,16	48,73	45,68	47,86
	8	59,11	59,91	55,82	58,28
	10	48,49	49,1	52,27	49,95

Tablo 4.4. Harç karışımların basınç dayanım değerleri (devamı)

	6	61,37	56,43	63,08	60,29
1,7	8	39,94	39,02	36,24	38,40
	10	37,39	32,89	35,48	35,25
	6	46,47	47,08	45,44	46,33
1,8	8	37,11	39,02	40,67	38,93
	10	31,69	31,69	32,31	31,90
	6	39,02	40,24	41,47	40,24
1,9	8	32,98	26,77	31,88	30,54
	10	26,83	20,31	22,4	23,18

Basınç dayanımı deneyinden elde edilen bulgulara göre, Ms modülü değeri düşük seviyelerde iken (1,2 ile 1,5 arası) Na₂O artışına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinde artış gözlenmiştir. Ms 1,5’den büyük bir değer aldığı anda ise bunun tam tersi olarak Na₂O artışına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinin düşüş gösterdiği gözlenmiştir. Buna göre, Ms modülü veya Na₂O konsantrasyonu ile harçların basınç dayanımı arasında doğrudan anlamlı bir ilişki kurmanın mümkün olmadığı ve Ms modülü ile Na₂O konsantrasyonunun birlikte değerlendirilmesinin daha anlamlı olacağı söylenebilir.

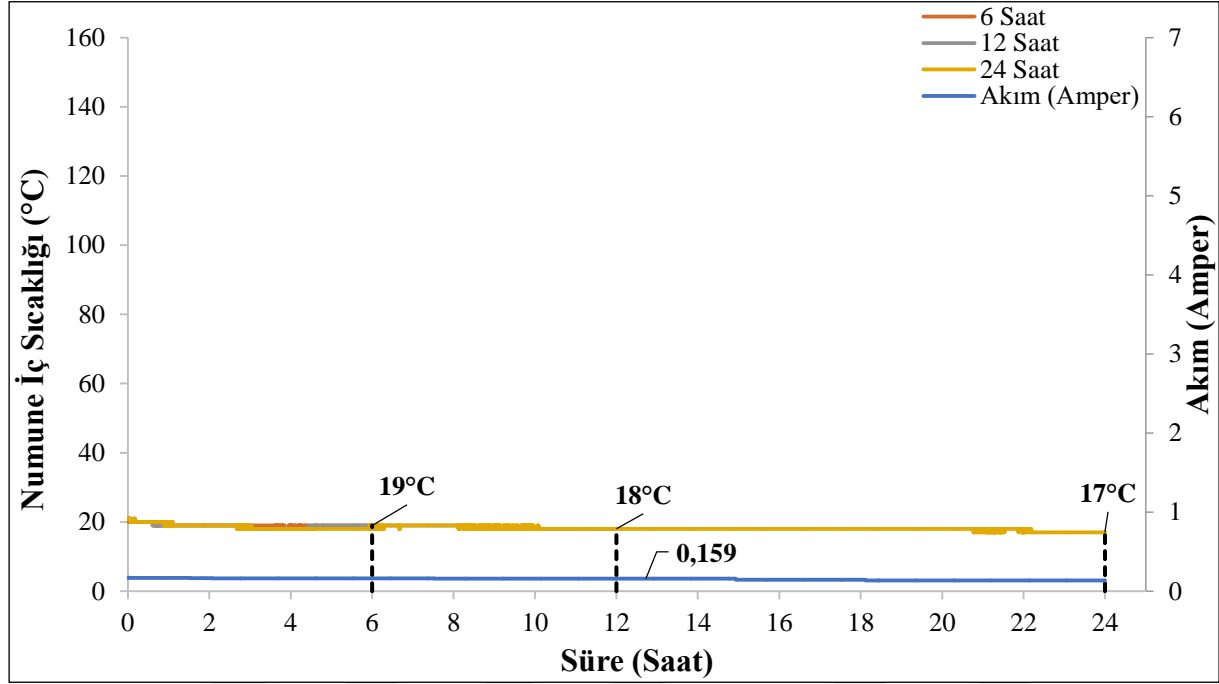
4.1.4. Elektriksel kür uygulaması için en uygun gerilim değerlerinin belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında, ön deneyler sonrası nihai deneylerde üretilecek tüm harç ve beton karışımlarına uygulanacak gerilim değerleri için en uygun aralıkların belirlenmesi amacıyla sabit Ms oranı ve Na₂O yüzdesi ile (1,6 Ms – %8 Na₂O) örnek bir harç karışımı hazırlanmış ve 100x100x100 mm’lik kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıba yerleştirilen harçlara, kalıba entegre bir iletken levha vasıtasıyla, her bir parametre değişiminde yeni bir harç numune kullanılarak, 10, 20, 25, 30, 35 ve 40 volt gerilim değerleri 6, 12 ve 24 saat boyunca ayrı ayrı uygulanmıştır. Belirli sürelerde, belirli düzeyde gerilim uygulanan numunelerde daha sonra tek eksenli basınç dayanımı testi uygulanmış ve uygulanan gerilim değerinin ve uygulanma süresinin geopolimer harç numunesinin dayanım gelişimine etkisi incelenmiştir.

4.1.4.1. Uygulanan gerilim-beton sıcaklığı ilişkisinin analizi

10 volt gerilim değerinde 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması

1,6 Ms ve %8 Na₂O oranına sahip geopolimer harçlara 6 – 12 – 24 saat boyunca 10 volt gerilim uygulanması sonucu elde edilen numune iç sıcaklığı-süre ilişkisi ile uygulama süresince okunan akım değerinin değişimini gösteren grafik Şekil 4.14.'te sunulmuştur.

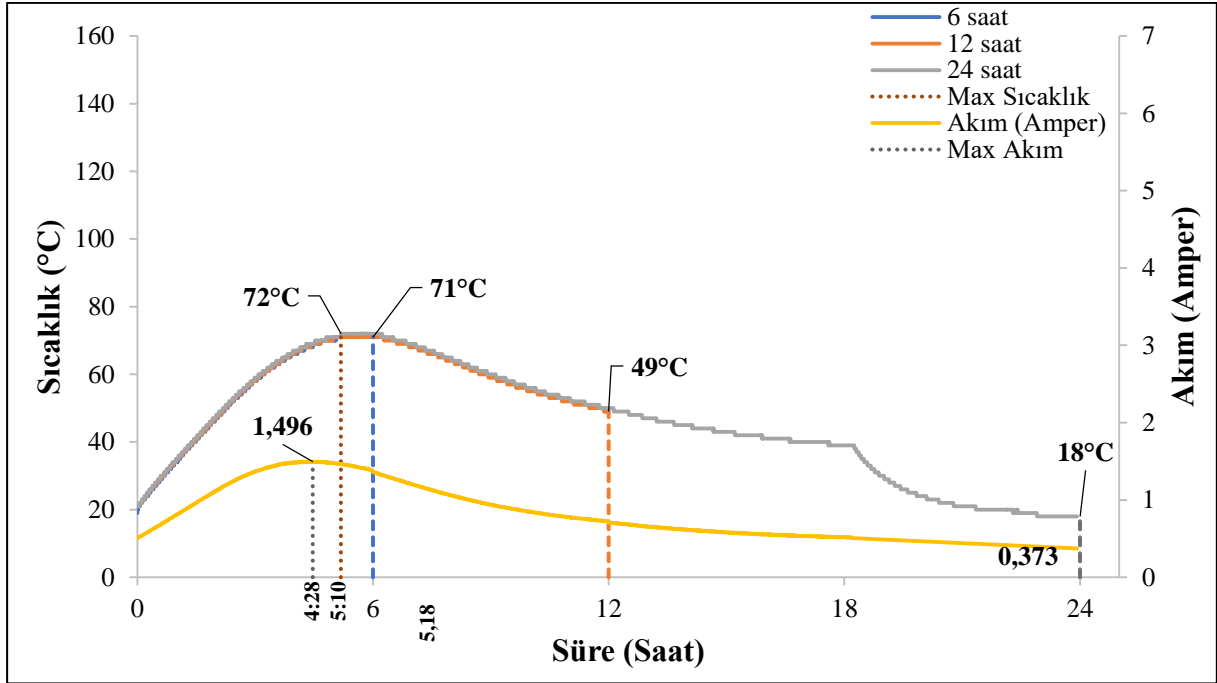


Şekil 4.14. 10 volt 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması

Geopolimer yapıda genel olarak, iletkenlik – iyon hareketi – iç sıcaklık parametreleri birbirleri ile bağlantılı şekildedir [120,121]. İyon hareketliliği sıcaklığa bağlı olarak artış göstermekte, sıcaklık da iletkenliğe bağlı olarak artış göstermektedir. Bulgular incelendiğinde, 100x100x100 mm'lik kalıptaki geopolimer harçlarda 10 volt gerilim numune iç sıcaklığında belirgin bir artışa neden olmamış ve iç sıcaklık 6, 12 ve 24 saat boyunca basınç dayanımını etkileyecek düzeyde bir değişim göstermemiştir. Bu durum, 10 volt gerilim uygulamasının, harç içerisinde sıcaklık artışına neden olacak düzeyde iyon hareketliliği oluşturamadığını göstermektedir ve bunun sonucunda da 10 volt gerilim uygulanan harç numunelerde herhangi bir basınç dayanımı elde edilememiştir.

20 volt gerilim değerinde 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması

1,6 Ms ve %8 Na₂O oranına sahip geopolimer harçlara 6 – 12 – 24 saat boyunca 20 volt gerilim uygulanması sonucu elde edilen numune iç sıcaklığı – süre ilişkisi ile uygulama süresince okunan akım değerinin değişimini gösteren grafik Şekil 4.15.'te sunulmuştur.

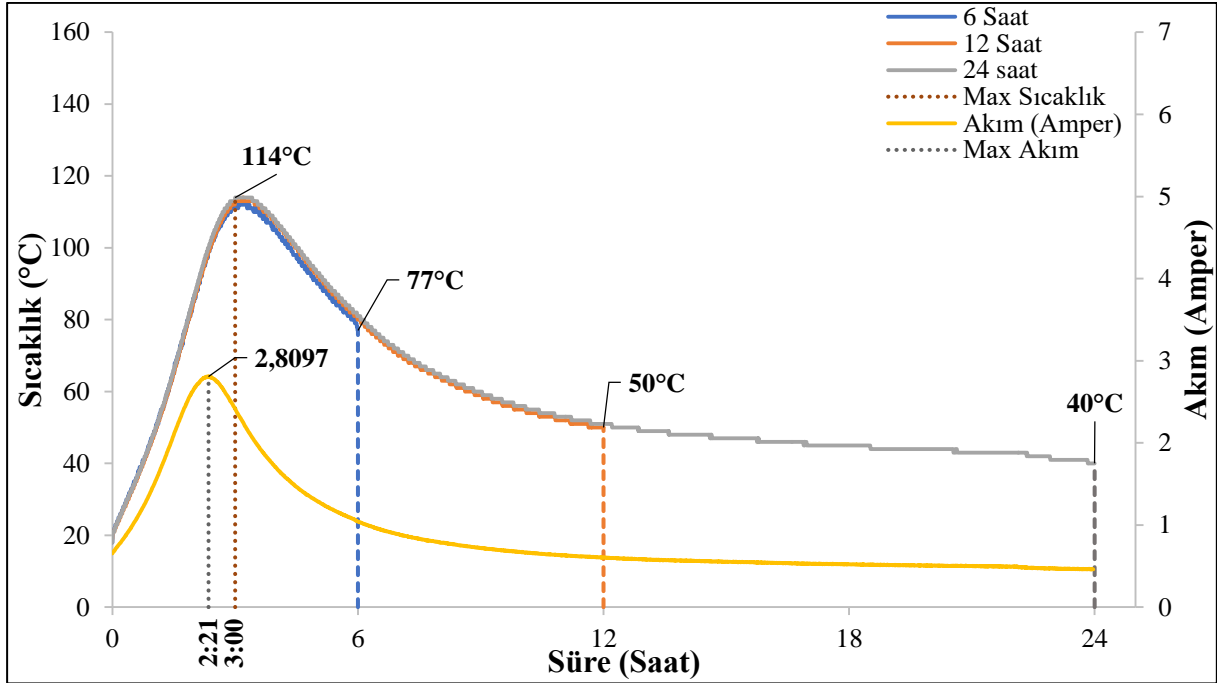


Şekil 4.15. 20 volt 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması

Bulgular incelendiğinde, 20 volt gerilim uygulanan geopolimer harçta 4 saat 28 dakika sonunda 1,496 amper maksimum akım değerine ulaşıldığı görülmektedir. Bu durum iyon hareketliliğinin başladığını göstermektedir. İyon hareketliliğinin başladığı bu andan itibaren harçta oluşan iyon hareketliliğine bağlı olarak sıcaklık artışı 42 dakika daha devam ederek 5 saat 10 dakika sonunda 72 °C maksimum harç iç sıcaklığına ulaşılmıştır. Akım ve sıcaklık pik değere ulaştıktan sonra harç iç yapısında oluşan sertleşme ve dayanım kazanma süreçlerinden dolayı iç yapı sıvı halden katı hale geçiş yapmış ve akımda hızlı bir düşüş meydana gelmiştir. İletkenlik maksimum sıcaklığa ulaşıldıktan sonra azalmaya başlayarak 12. saatten sonra tamamen durmuş ve elektriksel kürün etkisi ortadan kalkmıştır. 6 saatlik gerilim uygulamasında sıcaklığın 71 °C'ye, 12 saatlik ve 24 saatlik gerilim uygulamasında ise sıcaklığın sırasıyla 49 °C ve 18 °C'ye düşmesi elektriksel kürün etkisinin ortadan kalktığını net bir biçimde göstermektedir.

25 volt gerilim değerinde 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması

1,6 Ms ve %8 Na₂O oranına sahip geopolimer harçlara 6 – 12 – 24 saat boyunca 25 volt gerilim uygulanması sonucu elde edilen numune iç sıcaklığı – süre ilişkisi ile uygulama süresince okunan akım değerinin değişimini gösteren grafik Şekil 4.16.'da sunulmuştur.

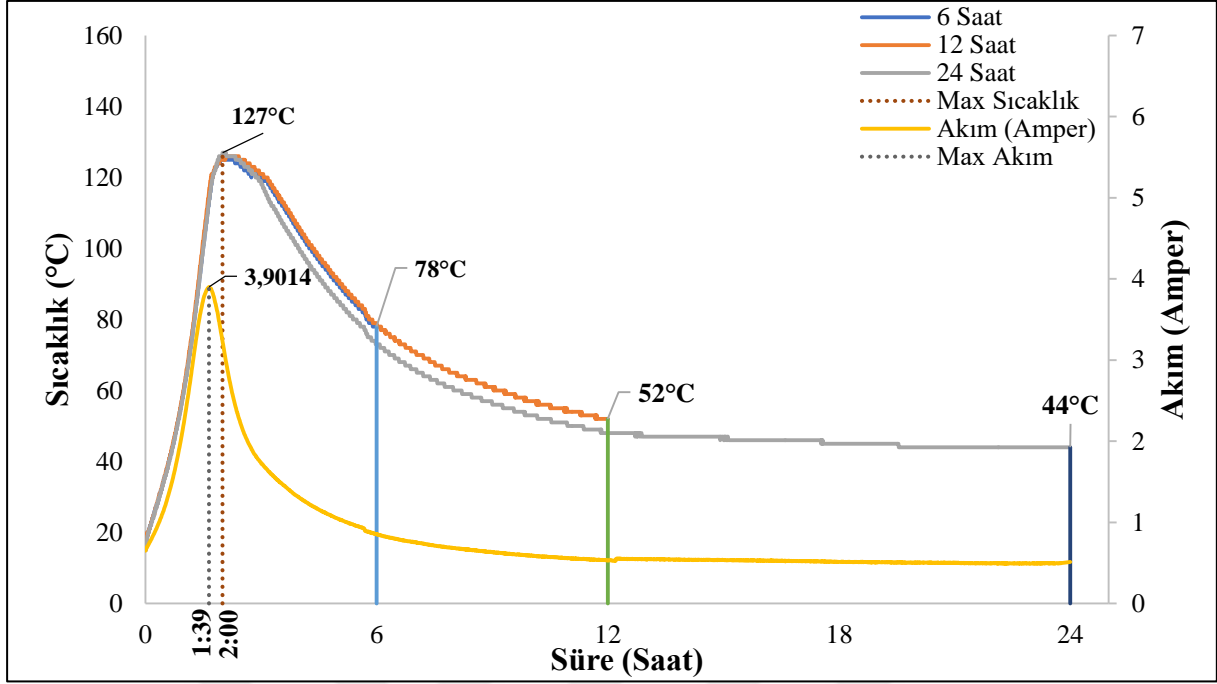


Şekil 4.16. 25 volt 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması

Bulgular sonucunda, geopolimer harç numunede 2 saat 21 dakika sonra 2,8097 amper maksimum akım çekilmiş ve buna bağlı olarak 3 saat sonunda da 114 °C iç sıcaklığa ulaşılmıştır. Numuneler sırası ile 6 saat sonunda 77 °C değerine, 12 saat sonunda 50 °C değerine, 24 saat sonunda 40 °C değerine ulaşmıştır. Artan gerilim değeri, ile birlikte ölçülen maksimum akım 2,8097 amper değerine ulaşarak daha önce uygulanan gerilim değerlerine göre artış göstermiştir. Numune iç sıcaklık değerleri de 6, 12 ve 24 saatlik süreler sonunda sırasıyla 77°C, 50°C ve 40°C ölçülmüş 10 volt ve 20 volt gerilim değerlerindeki numune sıcaklık değerlerinin üstüne çıktığı belirlenmiştir.

30 volt gerilim değerinde 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması

1,6 Ms ve %8 Na₂O oranına sahip geopolimer harçlara 6 – 12 – 24 saat boyunca 30 volt gerilim uygulanması sonucu elde edilen numune iç sıcaklığı – süre ilişkisi ile uygulama süresince okunan akım değerinin değişimini gösteren grafik Şekil 4.17.'de sunulmuştur.

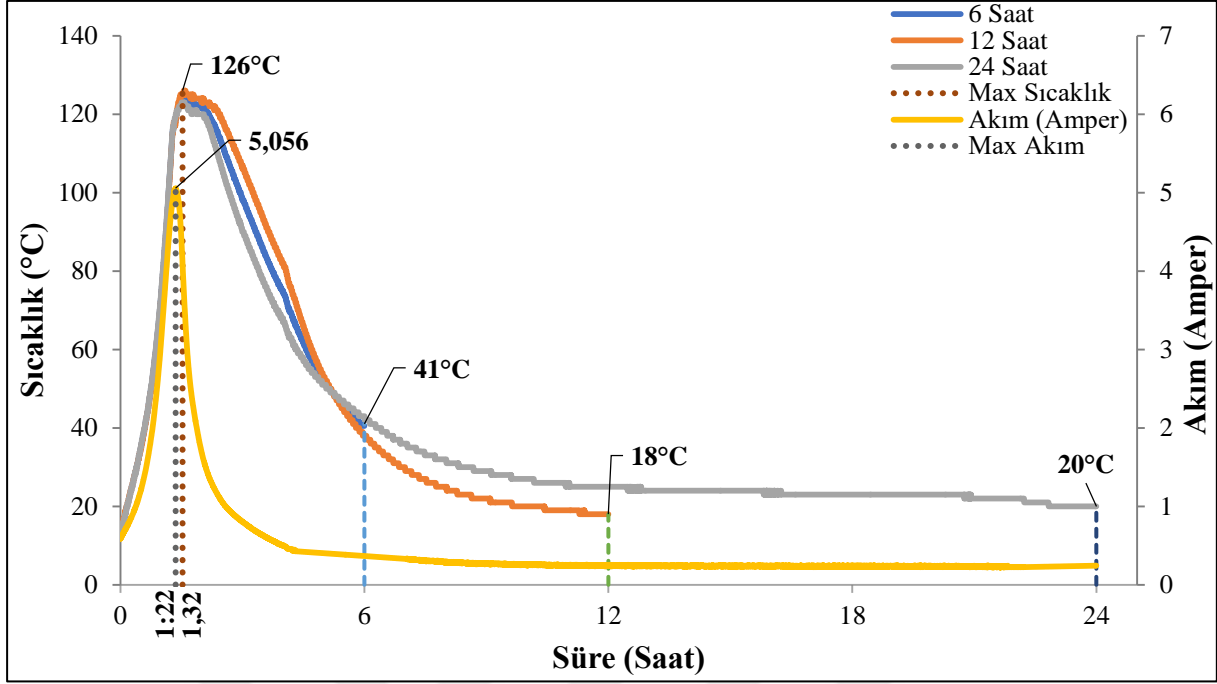


Şekil 4.17. 30 volt 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması

Bulgular incelendiğinde, numunede maksimum akım değeri olan 3,9014 amper değerine 1 saat 39 dakikada ulaşılmış ve buna bağlı olarak 2 saat sonunda da 127 °C maksimum iç sıcaklığa ulaşılmıştır. Numuneler sırası ile 6 saat sonunda 77 °C değerine, 12 saat sonunda 52 °C değerine, 24 saat sonunda 44 °C değerine ulaşmıştır. Artan gerilim değerine bağlı sıcaklık değerlerindeki artış burada da görülmektedir.

35 volt gerilim değerinde 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması

1,6 Ms ve %8 Na₂O oranına sahip geopolimer harçlara 6 – 12 – 24 saat boyunca 35 volt gerilim uygulanması sonucu elde edilen numune iç sıcaklığı – süre ilişkisi ile uygulama süresince okunan akım değerinin değişimini gösteren grafik Şekil 4.18.'de sunulmuştur.

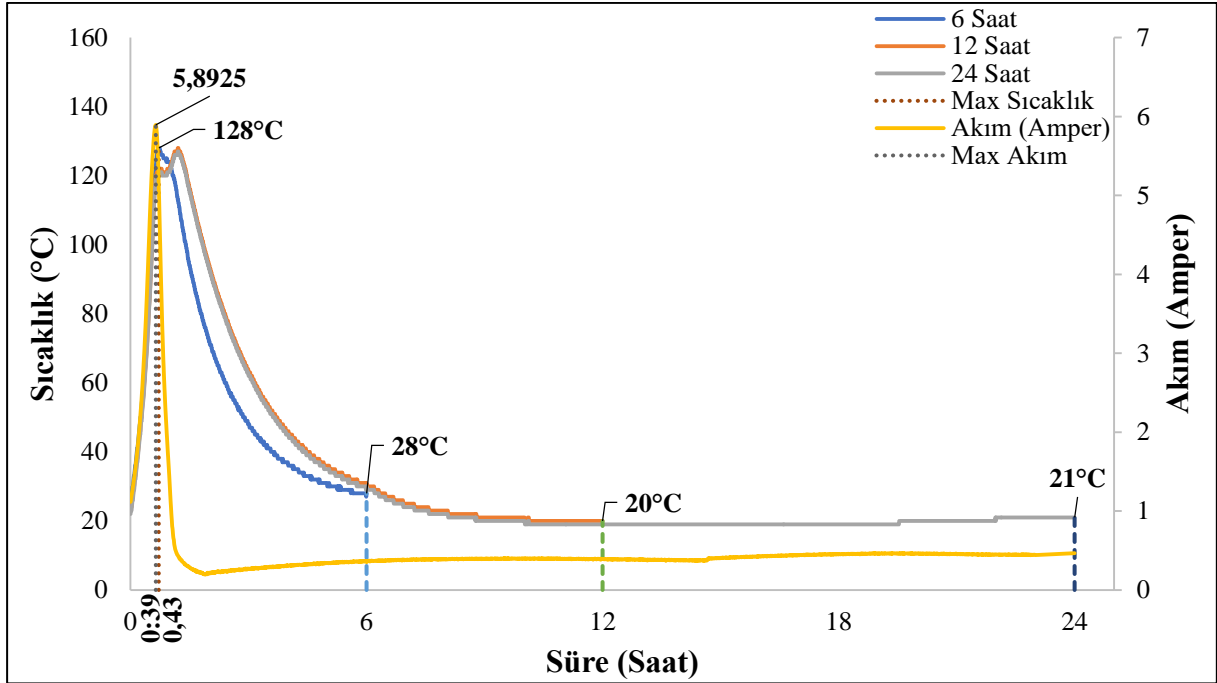


Şekil 4.18. 35 volt 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması

Bulgular incelendiğinde, artan gerilim değeri ile birlikte maksimum sıcaklık ve akım değerine ulaşma süresinin oldukça azaldığı, 1 saat 22 dakika sonunda numune içerisinde 5,056 akım geçtiği ve 1 saat 32 dakika sonunda da 126 °C sıcaklık değerine ulaşıldığı görülmektedir. Hızlı bir şekilde katı forma geçen numunelerde bu sürelerden sonra iletkenlik ve sıcaklık değerlerinde büyük bir düşüş meydana geldiği gözlemlenmektedir.

40 volt gerilim değerinde 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması

1,6 Ms ve %8 Na₂O oranına sahip geopolimer harçlara 6 – 12 – 24 saat boyunca 40 volt gerilim uygulanması sonucu elde edilen numune iç sıcaklığı – süre ilişkisi ile uygulama süresince okunan akım değerinin değişimini gösteren grafik Şekil 4.19.’da sunulmuştur.



Şekil 4.19. 40 volt 6 – 12 – 24 saat elektriksel kür uygulanması

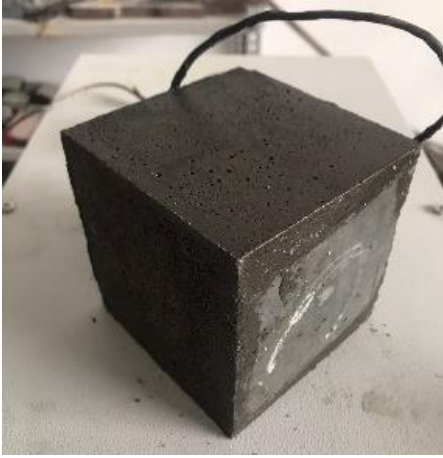
Son olarak 40 volt gerilim verilen geopolimer harç numunesinden elde edilen bulgular incelendiğinde maksimum çekilen akım (5,8925 amper) değerine minimum (39 dakika) sürede ulaştığı görülmektedir. Bunun yanında 43 dakika sonunda 128 °C sıcaklık değerine ulaşan numunede bu süreden sonra sıcaklık değerleri büyük bir düşüş sergilemektedir. 2 saatlik süreyi doldurmadan iletkenlik neredeyse sıfıra yaklaşmış, numune yavaşça soğumuş ve numune sıcaklığı laboratuvar ortam sıcaklığına kadar düşmüştür.

4.1.4.2. Uygulanan gerilim değeri ile basınç dayanımı ilişkisinin analizi

Geopolimer harç/beton üretiminde elektriksel kürün incelendiği bu çalışmada, ön deneylerde geopolimer harçlara 10, 20, 25, 30, 35 ve 40 volt gerilim değeri 6 saat, 12 saat ve 24 saat boyunca uygulanmış ve harç numunelerin iletkenlik, numuneler içerisinde geçen akım, numune iç sıcaklığı gibi özellikleri incelenmiştir. Bu bölümde uygulanan gerilim değerlerinin ve uygulanma sürelerinin geopolimer harçlarda ne kadar etkili olduğu tek eksenli basınç dayanımı testi ile Şekil 4.20.'deki gibi incelenmiş ve elde edilen basınç dayanımı değerleri Tablo 4.5.'te verilmiştir.



20 volt 6 Saat Gerilim Uygulanan Numune



Numunelerin kalıptan çıkarılması

40 volt 24 Saat Gerilim Uygulanan Numune

Şekil 4.20. Elektriksel kür uygulanan numunelerin basınç dayanımı değerinin belirlenmesi

Tablo 4.5. Uygun gerilim değerlerinin belirlenmesi kapsamında elektriksel kür uygulanan numunelerin basınç dayanımı değerleri

Gerilim değeri (volt)	Dayanım (MPa)		
	6 saat	12 saat	24 saat
10	-	-	-
20	8,75	18,10	19,82
25	30,09	32,85	35,55
30	29,35	31,56	32,18
35	22,48	22,95	26,30
40	11,15	9,80	9,48

Deneysel olarak elde edilen ve Tablo 4.5.'ten verilen sonuçlar yorumlanacak olursa;

- **10 volt** gerilim uygulanan numunelerde, iletkenlik ve iç sıcaklıkta artış olmamasından dolayı 6, 12 ve 24 saatlik gerilim uygulanan numunelerin prizini almadığı ve dayanım kazanmadığı görülmektedir.
- **20 volt** gerilim uygulanan numunelerde, 4 saat sonunda maksimum akım (1,496 A) çekildiği ve 5 saat 10 dakika sonunda maksimum iç sıcaklığa (72 °C) ulaşıldığı ifade edilmişti. Bu numunede, 6 saat sonucunda 8,75 MPa basınç dayanım değeri elde edilirken gerilim uygulama süresindeki artış ile birlikte dayanım 12 saatte 18,10 MPa'ya ve daha sonra 24 saat sonucunda da 19,82 MPa değerine ulaşıldığı görülmektedir.
- **25 volt** gerilim uygulanan numunelerde, 2 saat 21 dakika sonra maksimum akım (2,8097 amper) çekildiği, 3 saat sonunda da maksimum iç sıcaklığa (114 °C) ulaştığı ifade edilmişti. 6 saatin sonunda 30,09 MPa dayanım değerine ulaşan numunede, 12 saatin sonunda 32,85 ve 24 saatin sonunda da 35,55 MPa dayanım elde edilmiştir. Maksimum akım ve iç sıcaklığa ulaşma sürelerindeki azalmaya rağmen iç sıcaklıktaki artış ile birlikte dayanımda iyileşmelerin olduğu görülmektedir.
- **30 volt** gerilim uygulanan numunelerde, maksimum akıma (3,9014 amper) 1 saat 39 dakikada, maksimum iç sıcaklığa (127 °C) 2 saatte ulaşıldığı ifade edilmişti. Artan gerilim değeri ile birlikte maksimum sıcaklık ve akım değerine ulaşma süresinde yine bir azalma meydana geldiği fakat bu durumun dayanım kazanma konusunda olumlu bir etki göstermediği Tablo 4.5.'te açıkça görülmektedir. 6 saatlik gerilim uygulanan numunede 29,35 MPa, 12saatlik gerilim uygulanan numunede 31,56 MPa ve 24 saatlik gerilim uygulanan numunede 32,58 MPa dayanım elde edilmiştir.
- **35 volt** gerilim uygulanan numunelerde, çekilen akımın ve iç sıcaklığın önemli derecede arttığı, bu durumun da geopolimer harç numunelerinin dayanımında olumsuz etkiye sebep olduğu; 6 saatlik numunenin 22,48 MPa değerine, 12 saatlik numunenin 22,95 MPa değerine ve 24 saatlik numunenin 26,30 MPa değerine düşmesi ile açık bir şekilde görülmektedir.
- **40 volt** gerilim uygulanan numunelerde de 30 ve 35 volt gerilim değeri uygulanan numunelerdeki gibi yüksek iç sıcaklık ve akım değerinin yanı sıra erken dayanım kazanma etkisi bu gruptaki numunelerin dayanımlarının ciddi bir düşüşüne sebep olmuştur. Öyle ki 6,12 ve 24 saatlik gerilim uygulama süreleri sonucunda elde edilen en iyi dayanım değerinin 11,15 MPa değeri olduğu görülmektedir.

Tüm ön deneylerde elde edilen bulgulara göre, hem uygulanan gerilim değeri ile işlenebilirlik arasındaki ilişki hem de uygulanan gerilim değeri ile basınç dayanımı arasındaki ilişkisi birlikte değerlendirilmiş ve en iyi performans elde edilen deney parametreleri nihai harç ve beton deneyleri için seçilmiştir. Seçilen nihai deney parametreleri ile gerçekleştirilen tüm ön deney parametreleri Tablo 4.6.'da görülmektedir.

Tablo 4.6. Harç deneylerinde araştırılacak parametreler

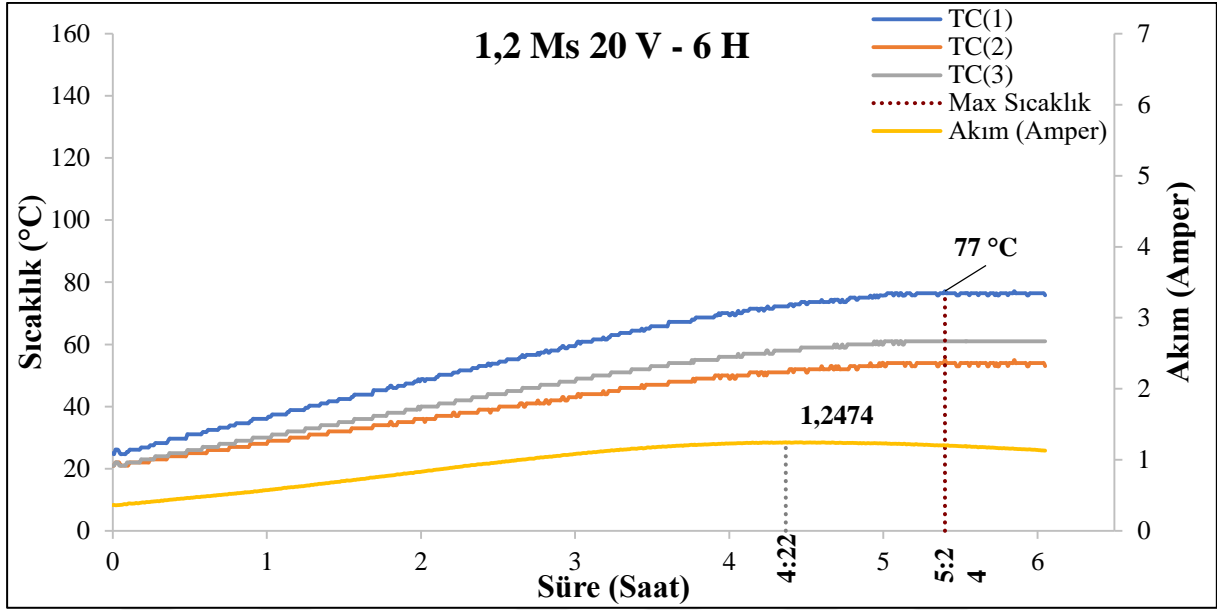
Parametre	Ön Deneylerde Araştırılan Parametreler	Harç/Beton Deneylerinde Kullanılmak Üzere Seçilen Parametreler
Ms Modülü	0,5 – 0,75 – 1,0 – 1,1 – 1,2 – 1,3 – 1,4 – 1,5 – 1,6 – 1,7 – 1,8 – 1,9	1,2 – 1,4 – 1,6 – 1,8
Na ₂ O Konsantrasyonu	%6 – %8 – %10	%10
Isıl Kür Sıcaklığı	45°C – 60°C – 80°C – 90°C – 100°C – 120°C	60°C – 80°C – 100°C – 120°C
Gerilim Değeri	10V – 20V – 25V – 30V – 35V – 40V	20V – 25V – 30V – 35V
Süre	6 – 12 – 24 Saat	6 – 12 Saat

4.2. Geopolimer Harç Deneylerine Ait Bulgular

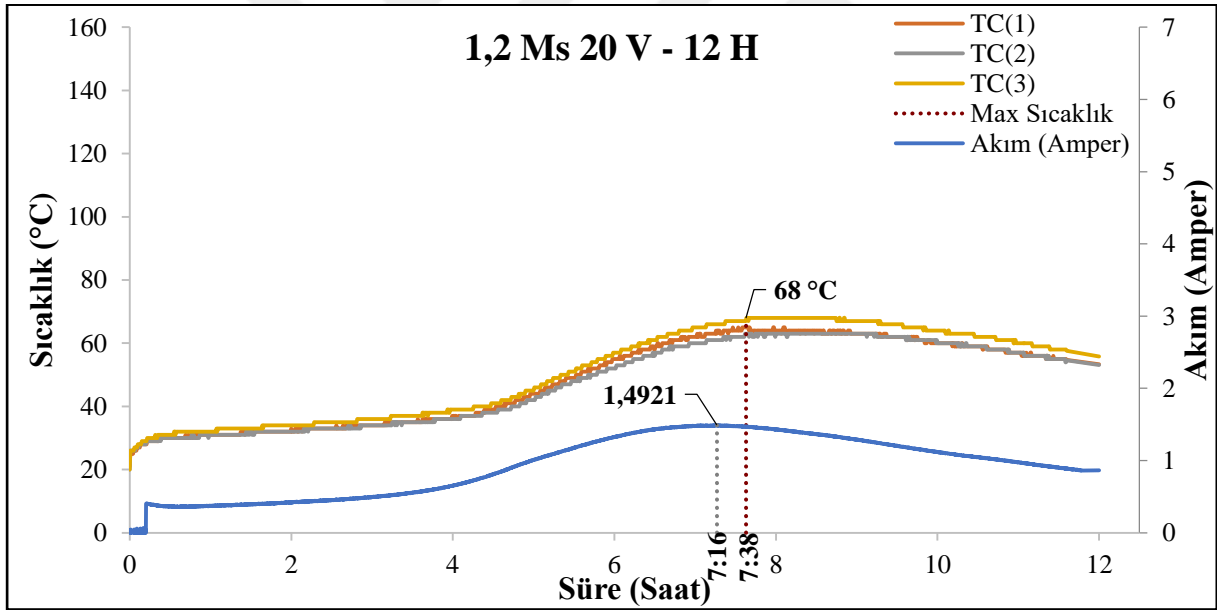
Bu bölümde, daha önce gerçekleştirilen kapsamlı ön deneylerde elde edilen ön çalışma bulguları dikkate alınarak seçilen Ms modülü, Na₂O konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve gerilim değeri değişkenlerine bağlı olarak üretilmiş ve deneyleri gerçekleştirilmiş harçlara ait deneysel bulgular alt başlıklar halinde sunulmuştur.

4.2.1. Elektriksel kür uygulanarak üretilen harçlara bulgular

Elektriksel kür uygulanarak üretilen harçlarda öncelikle en düşük Ms modülü değerleri ile üretilen harç numuneler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle ilk olarak 1,2 Ms sabit seçilmiş ve 6 – 12 saat boyunca 20, 25, 30 ve 35 volt gerilim uygulanmıştır. Gerçekleştirilen elektriksel kür uygulamasında elde edilen numune iç sıcaklığı – süre ilişkisi ile uygulama süresince okunan akım değerinin değişimini gösteren grafikler sırasıyla 20 V için Şekil 4.21. ve 4.22.'de, 25 V için Şekil 4.23. ve 4.24.'te, 30 V için Şekil 4.25. ve 4.26.'da 35 V için ise Şekil 4.27. ve 4.28.'de verilmiştir.



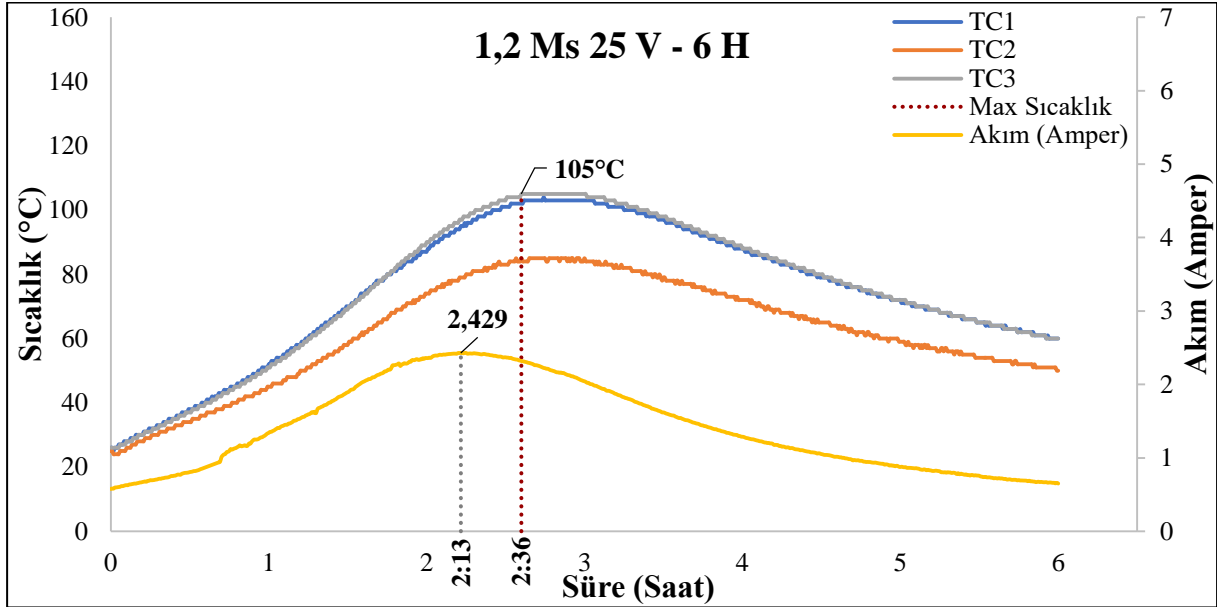
Şekil 4.21. 1,2 Ms %10 Na₂O 20 volt 6 saat elektriksel kür



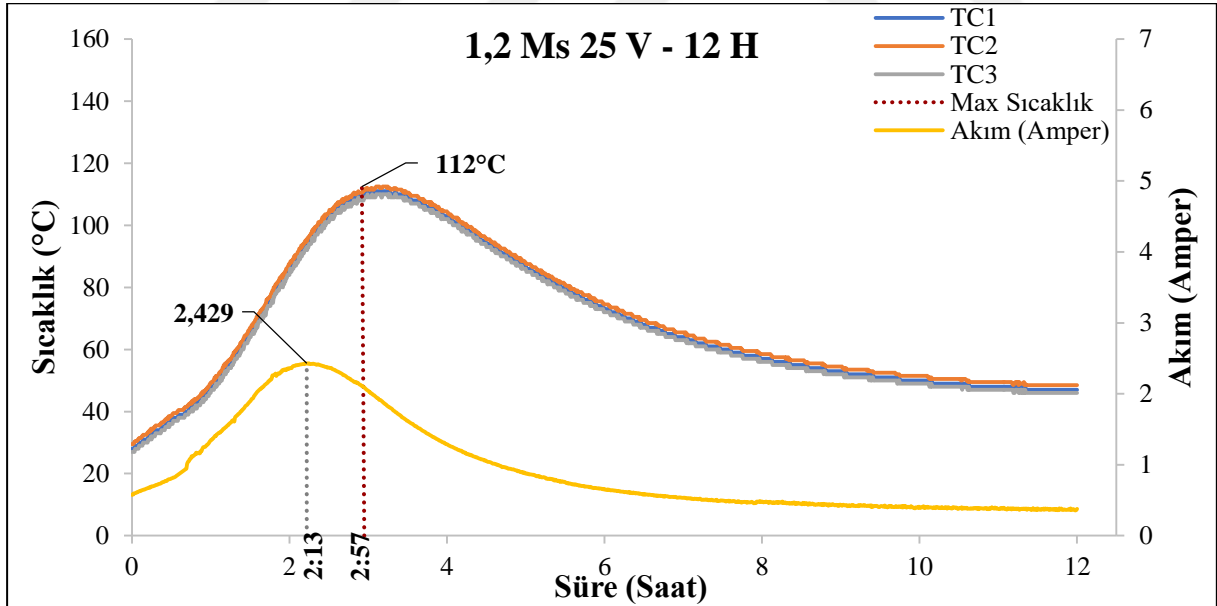
Şekil 4.22. 1,2 Ms %10 Na₂O 20 volt 12 saat elektriksel kür

20 V gerilim için Şekil 4.21. ve 4.22. incelendiğinde, 6 saat kür uygulaması tamamlandığında tekrarlı olarak gerçekleştirilen her üç numunede de sıcaklık artışının devam ettiği görülmektedir. Bu durum kür süresinin daha yüksek tutulmasını işaret etmektedir. 12 saatlik kür uygulamasında da bu durumu destekleyen bir sıcaklık değişimi belirlenmiş ve 7 saat 38. dakikaya kadar beton iç sıcaklığı artmaya devam etmiş ve pik noktada ortalama 68 °C sıcaklığa

ulaşmıştır. Akımda buna benzer şekilde 7 saat 16. dakikaya kadar artmış ve pik noktada 1,4921 A değerini almıştır.



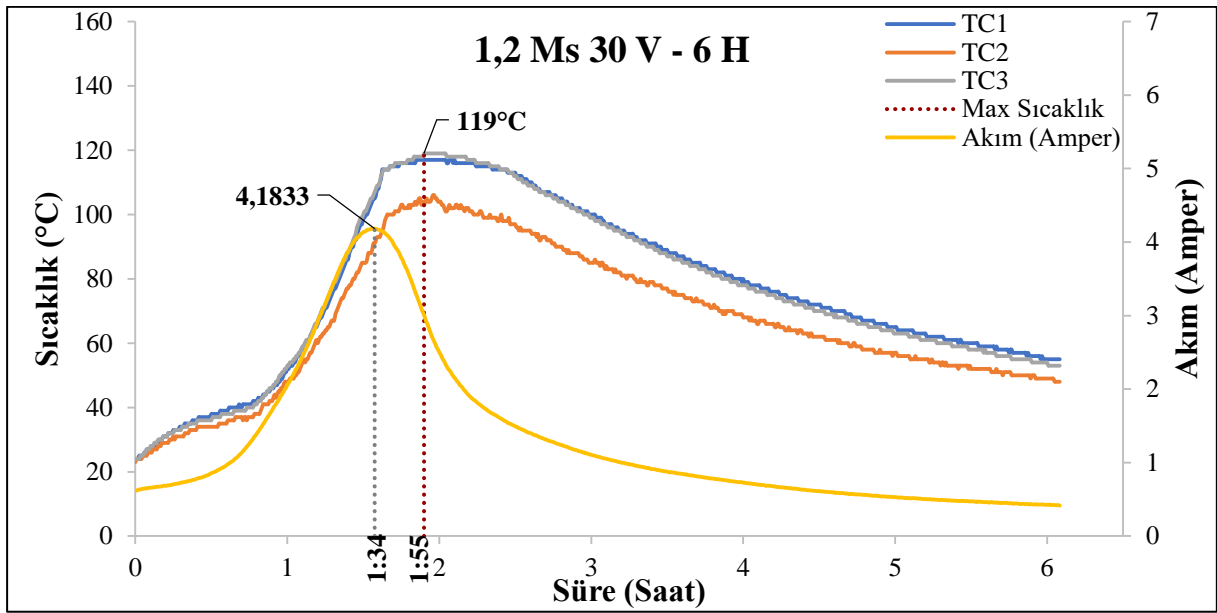
Şekil 4.23. 1,2 Ms %10 Na₂O 25 volt 6 saat elektriksel kür



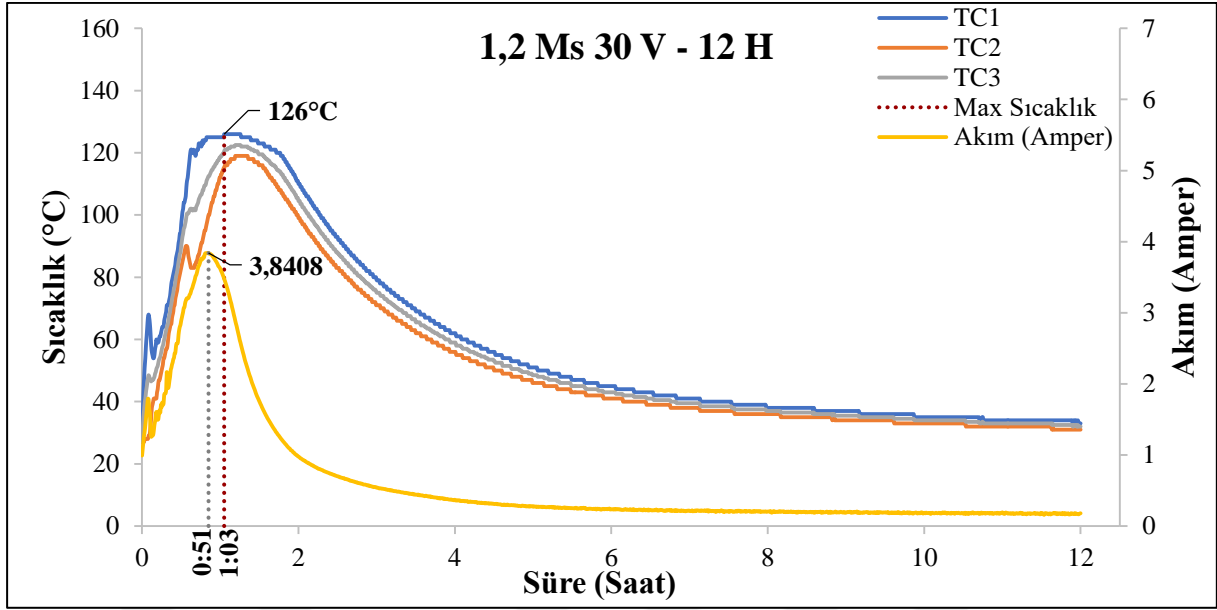
Şekil 4.24. 1,2 Ms %10 Na₂O 25 volt 12 saat elektriksel kür

Şekil 4.23. ve 4.24. incelendiğinde 25 volt gerilim için sıcaklık artışının 20 volt gerilim uygulamasından farklı bir eğilim gösterdiği net bir şekilde görülmektedir. 25 volt gerilim uygulandığında 6 saat kür için ilk 2 saat 13. dakikada sıcaklık 105 °C ye kadar ulaşmış, 12 saat

kür için ise 2 saat 57. dakikada sıcaklık 112 °C ye ulaşmıştır. Her iki kür süresinde de harç içerisindeki akım değerleri hemen hemen pik sıcaklığa ulaşma süresine yakın bir değerde en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Her iki deneyde de harç iç sıcaklığının hemen hemen aynı sürede birbirine çok yakın pik sıcaklık değerine ulaştığı görülmektedir. Pik değere ulaşan sıcaklıkların daha sonra hızlı bir şekilde düştüğü de grafiklerde net bir biçimde görülmektedir. Bu durum 25 volt gerilim uygulandığı zaman yaklaşık 3. saatten sonra elektriksel kür uygulamasına gerek olmadığını ve bu süreden sonra yapılacak elektriksel kür uygulamasının enerji sarfiyatı açısından çok doğru olmayacağını göstermektedir.

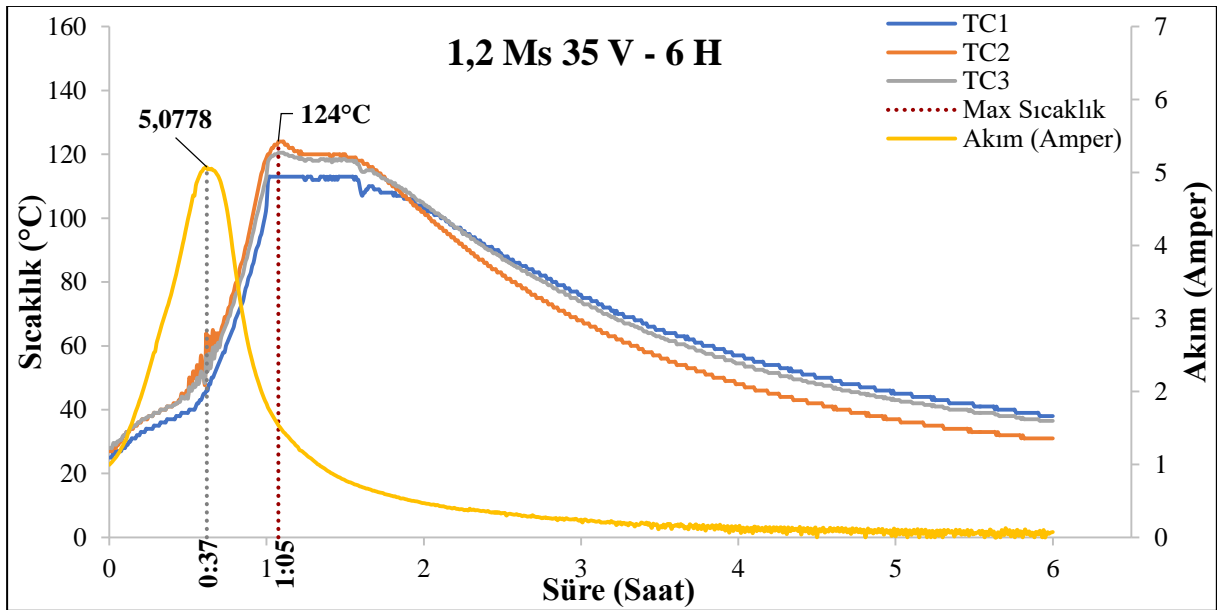


Şekil 4.25. 1,2 Ms %10 Na₂O 30 volt 6 saat elektriksel kür

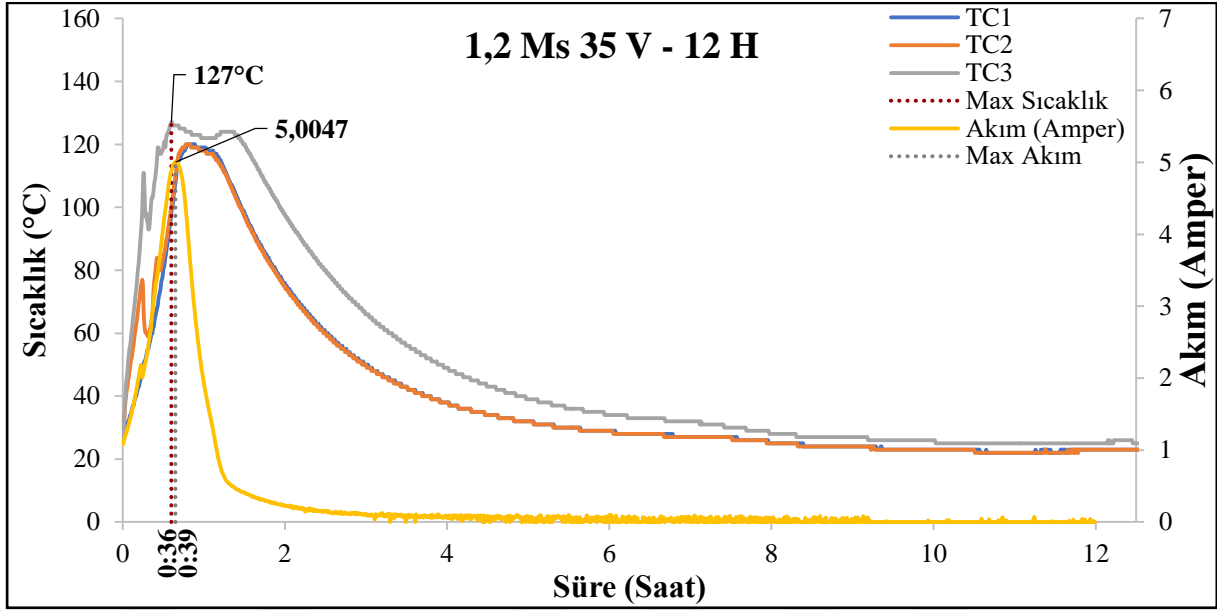


Şekil 4.26. 1,2 Ms %10 Na₂O 30 volt 12 saat elektriksel kür

Şekil 4.25. ve 4.26. incelendiğinde, 6 saat kür uygulamasında 1 saat 55. dakikada 119 °C pik sıcaklık ve 12 saat kür uygulamasında ise 1 saat 3. dakikada 126 °C pik sıcaklık ölçülmüştür. Harçların iç sıcaklıklarının pik değere ulaşma süresindeki azalma dikkate alınacak olursa 30 V gerilim uygulamasının 20 ve 25 volt gerilimlere göre harçlarda iç sıcaklık artışında daha etkin rol oynadığı görülmektedir.

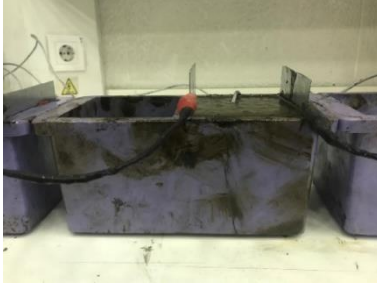


Şekil 4.27. 1,2 Ms %10 Na₂O 35 volt 6 saat elektriksel kür



Şekil 4.28. 1,2 Ms %10 Na₂O 35 volt 12 saat elektriksel kür

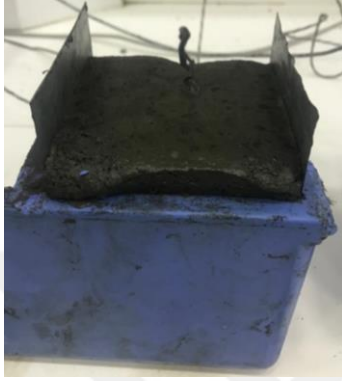
Şekil 4.27. ve 4.28. incelendiğinde, 35 volt gerilim uygulamasının harçların iç sıcaklıklarında en hızlı artışı sağlayan gerilim olduğu söylenebilir. 35 volt gerilim uygulanan numunelerde pik sıcaklığa ulaşma süresi ortalama 1 saat ve daha altında değerlere ulaşmıştır. 1,2 Ms modülü sabit olan ve farklı gerilim değerlerinde elektriksel kür uygulanan tüm harçlardaki sıcaklık değişimleri dikkate alındığında gerilim ile en yüksek sıcaklığa ulaşma süresi arasındaki anlamlı bir ilişki görülmektedir. Fakat aynı karışımdan alınarak 6 veya 12 saat aynı koşullarda elektriksel kür uygulandığında bazı farklılıklarda görülebilmektedir. Örneğin 1,2 Ms ve 35 volt gerilimde 6 saat kür için hazırlanan numune 1 saat 5 dakikada pik değere ulaşırken 12 saat kür için hazırlanan aynı numune aynı koşullarda 39 dakikada pik değere ulaşmıştır. Bu durumun deneyler esnasında ısınan harçlarda meydana gelen hacimsel şişmeden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Şekil 4.29.'da görüldüğü gibi şişen numunenin kalıp dışında çıkan miktarı elektriksel iletimi etkilemektedir ve bu kontrolsüz hacimsel stabilite değişimi de kürün etkinliğini etkilemektedir.



a. kaliba ilk yerleştirme



b. ısınan geopolimer harcın hacim değişikliği



c. şişen geopolimer harc



d. kür sonunda kalıptan çıkarılan numuneler

Şekil 4.29. Geopolimer harçta ısınmaya bağlı hacim değişikliği

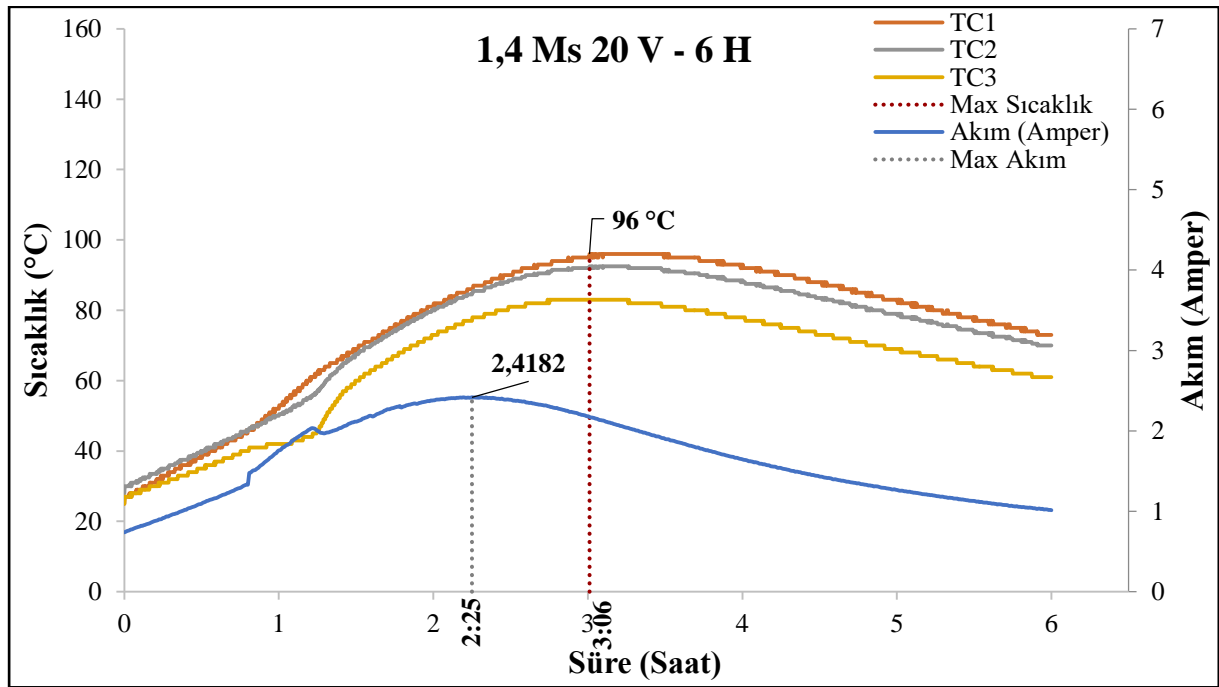
1,2 Ms modülüne sahip 20, 25, 30 ve 35 volt gerilim uygulaması ile üretilen harçlardan elde edilen deneysel veriler özetle Tablo 4.7.'de verilmiştir.

Tablo 4.7. 1,2 Ms %10 Na₂O deneysel veri özetleri

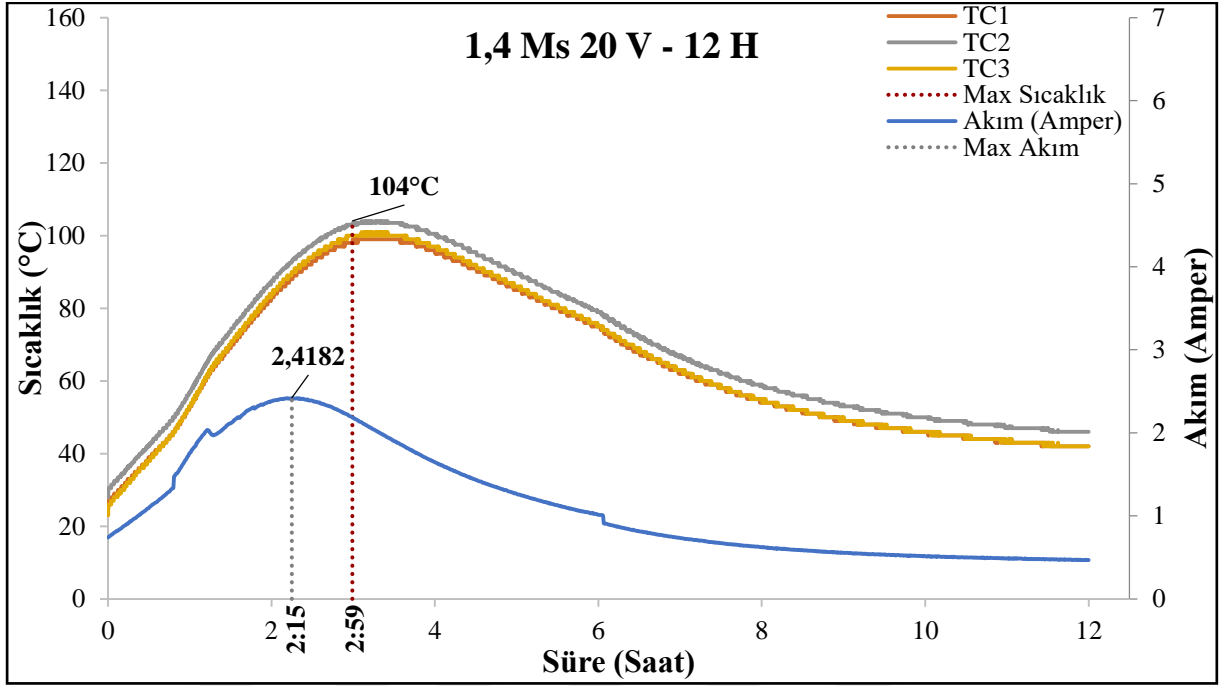
1,2 Ms %10 Na ₂ O Deneysel Veri Özetleri					
Kür Süresi	Ölçülen Değerler	Uygulanan Gerilim Değerleri			
		20V	25V	30V	35V
6 saatlik Kür	Pik Sıcaklık	77	105	119	124
	Ulaşılan Süre	5:24	2:36	1:55	1:05
	Pik Akım	1,2474	2,4290	4,1833	5,0778
	Ulaşılan Süre	4:22	2:13	1:34	0:37
12 saatlik Kür	Pik Sıcaklık	68	112,5	126	127
	Ulaşılan Süre	7:38	2:57	1:03	0:39
	Pik Akım	1,4921	2,4290	3,8408	5,0047
	Ulaşılan Süre	7:16	2:13	0:51	0:36

• saat: dakika

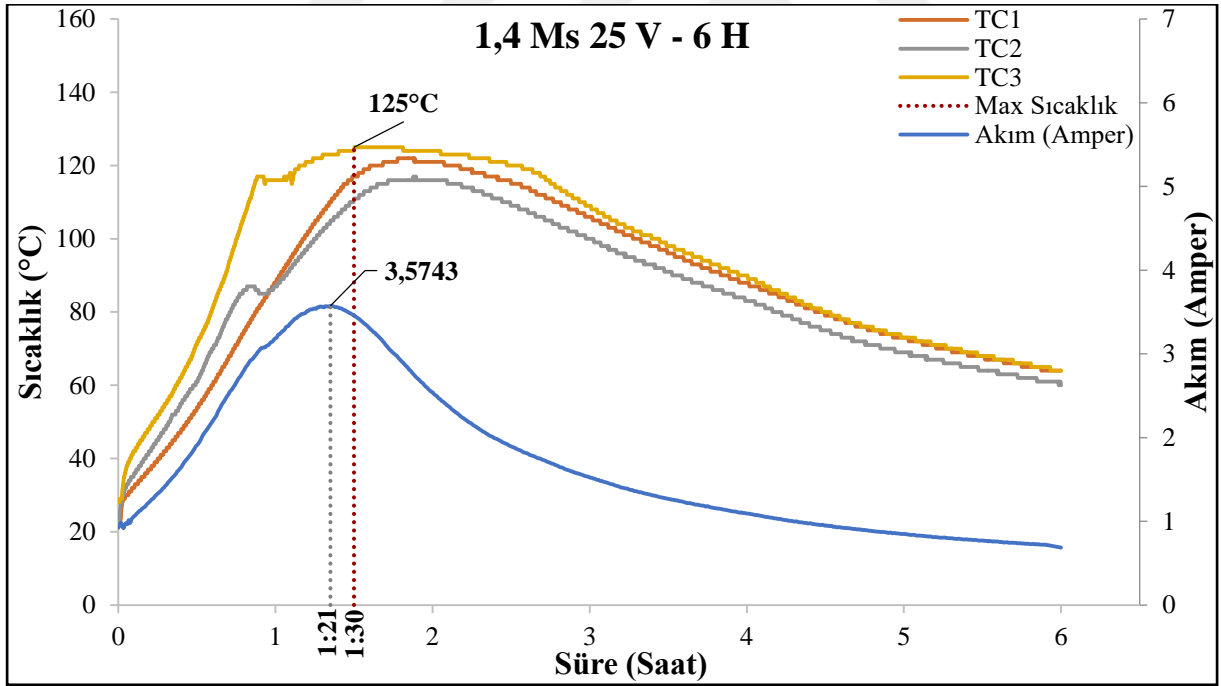
Ms 1,4, 1,6 ve 1,8 sabit seçilmiş ve 6 – 12 saat boyunca 20, 25, 30 ve 35 volt gerilim uygulanmış numunelerde elde edilen numune iç sıcaklığı – süre ilişkisi ile uygulama süresince okunan akım değerinin değişimini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 4.30. – 4.52. 'de verilmiştir. Uygulanan gerilim ve süreye bağlı olarak sıcaklık değişimleri 1,2 Ms'deki gerilim – süre – sıcaklık ilişkisine benzer şekilde değişim gösterdiğinden grafikler her bir Ms modülü için tek tek yorumlanmamış ve tüm Ms değerlerinde gerilime bağlı olarak pik sıcaklık değerine ulaşma süreleri ile akım değerleri toplu olarak Tablo 4.7., Tablo 4.8., Tablo 4.9. ve Tablo 4.10.'da sunulmuştur.



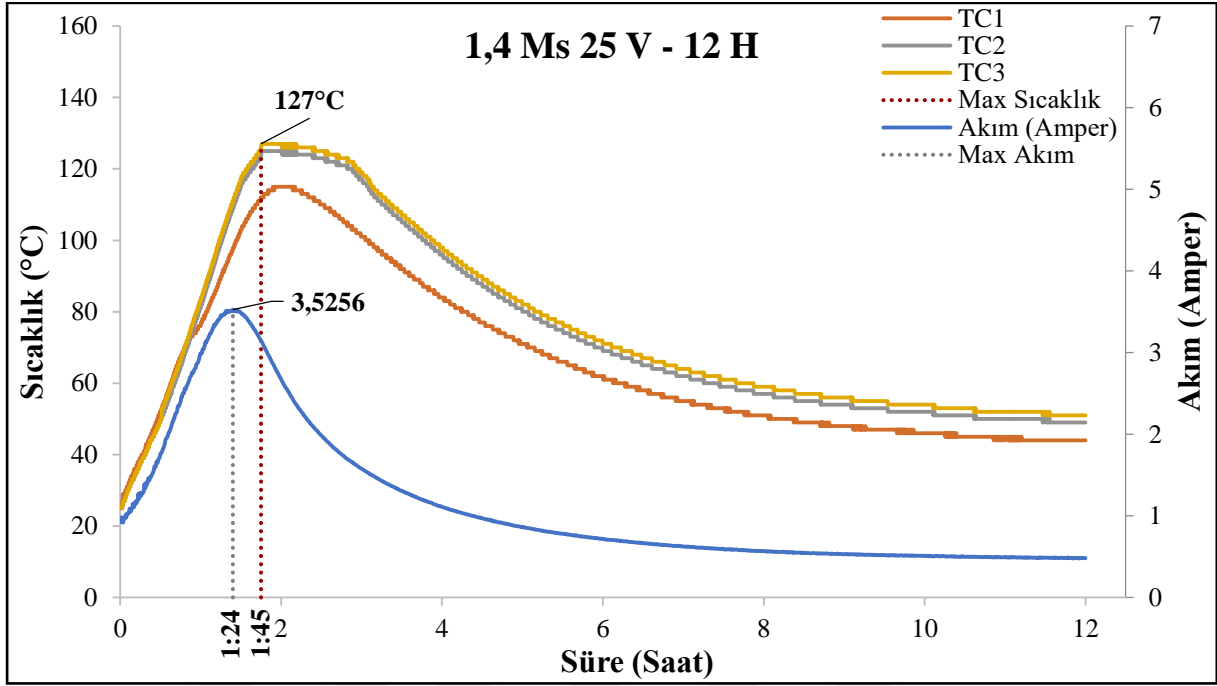
Şekil 4.30. 1,4 Ms %10 Na₂O 20 volt 6 saat elektriksel kür



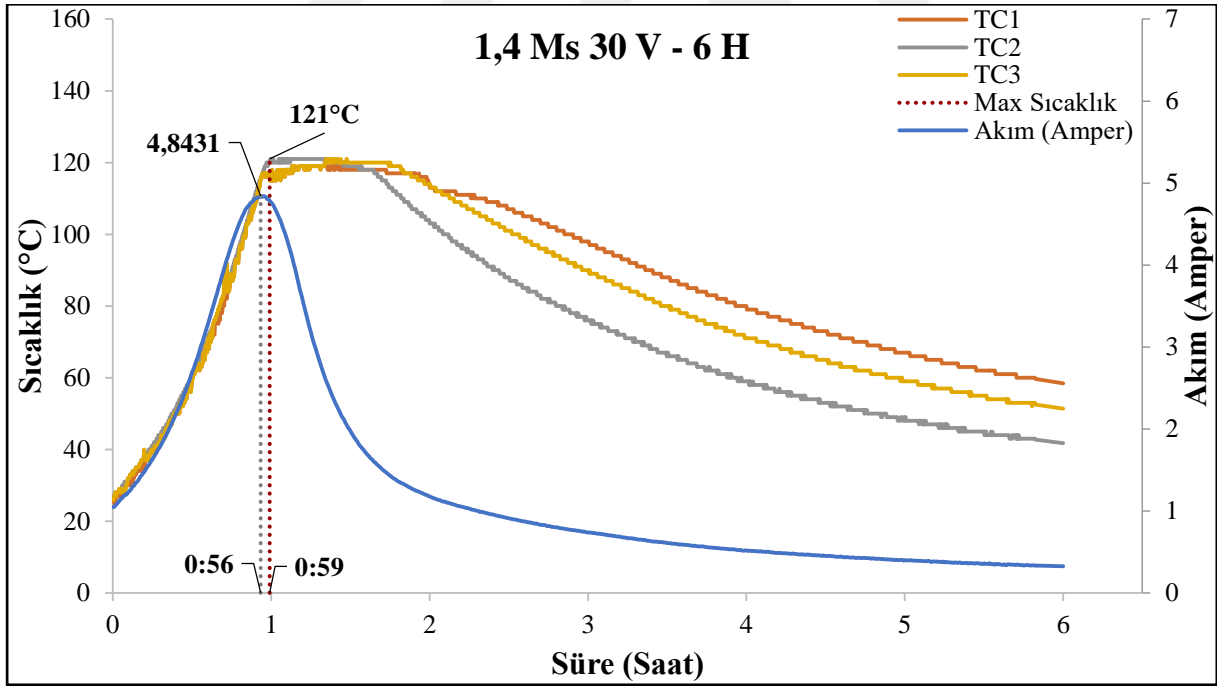
Şekil 4.31. 1,4 Ms %10 Na₂O 20 volt 12 saat elektriksel kür



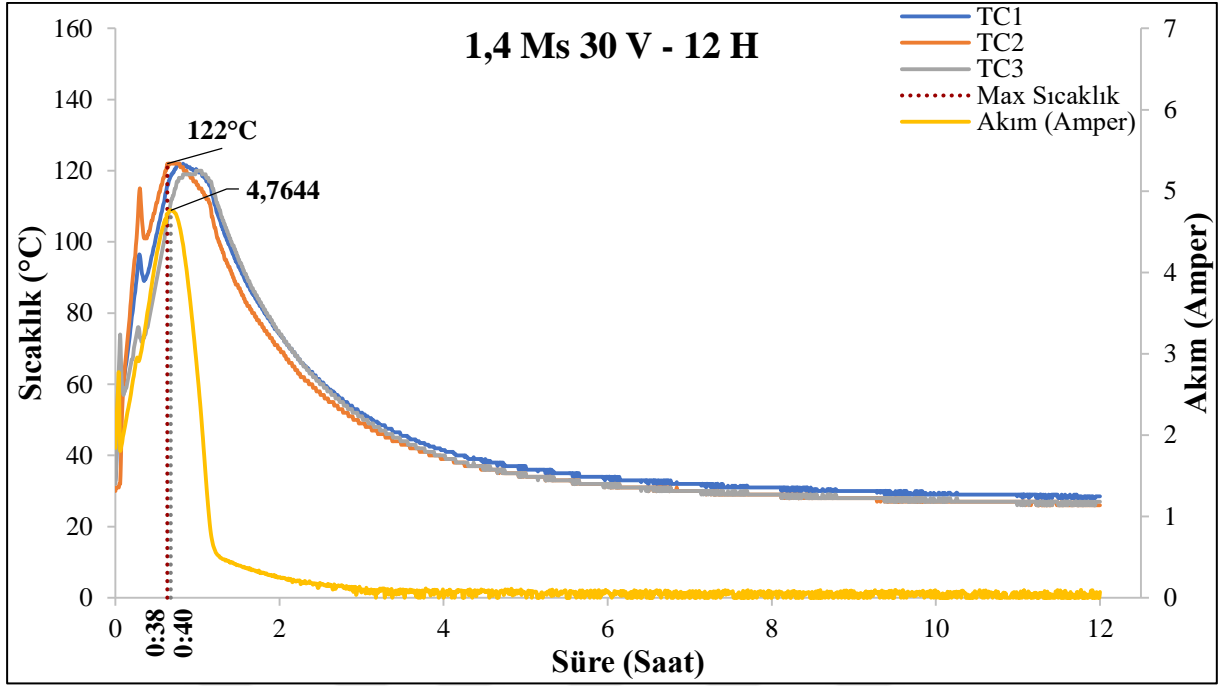
Şekil 4.32. 1,4 Ms %10 Na₂O 25 volt 6 saat elektriksel kür



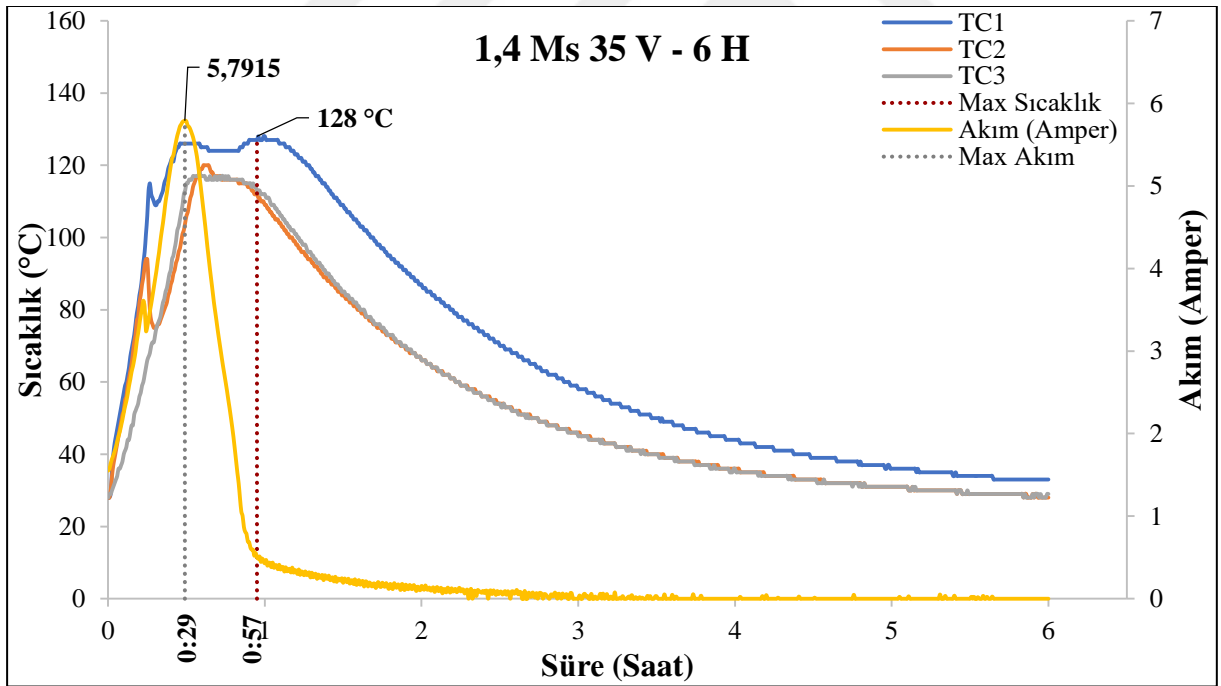
Şekil 4.33. 1,4 Ms %10 Na₂O 25 volt 12 saat elektriksel kür



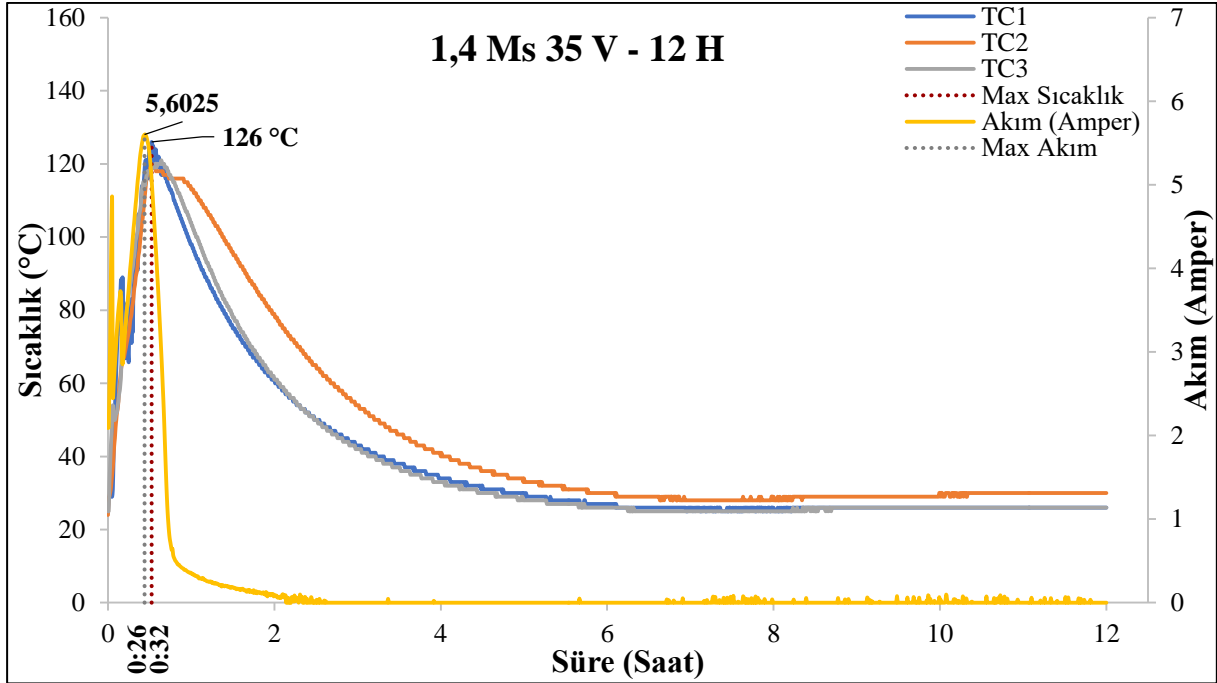
Şekil 4.34. 1,4 Ms %10 Na₂O 30 volt 6 saat elektriksel kür



Şekil 4.35. 1,4 Ms %10 Na₂O 30 volt 12 saat elektriksel kür



Şekil 4.36. 1,4 Ms %10 Na₂O 35 volt 6 saat elektriksel kür



Şekil 4.37. 1,4 Ms %10 Na₂O 35 volt 12 saat elektriksel kür

1,4 Ms modülüne sahip 20, 25, 30 ve 35 volt gerilim uygulaması ile üretilen harçlardan elde edilen deneysel veriler özetle Tablo 4.8.'de verilmiştir.

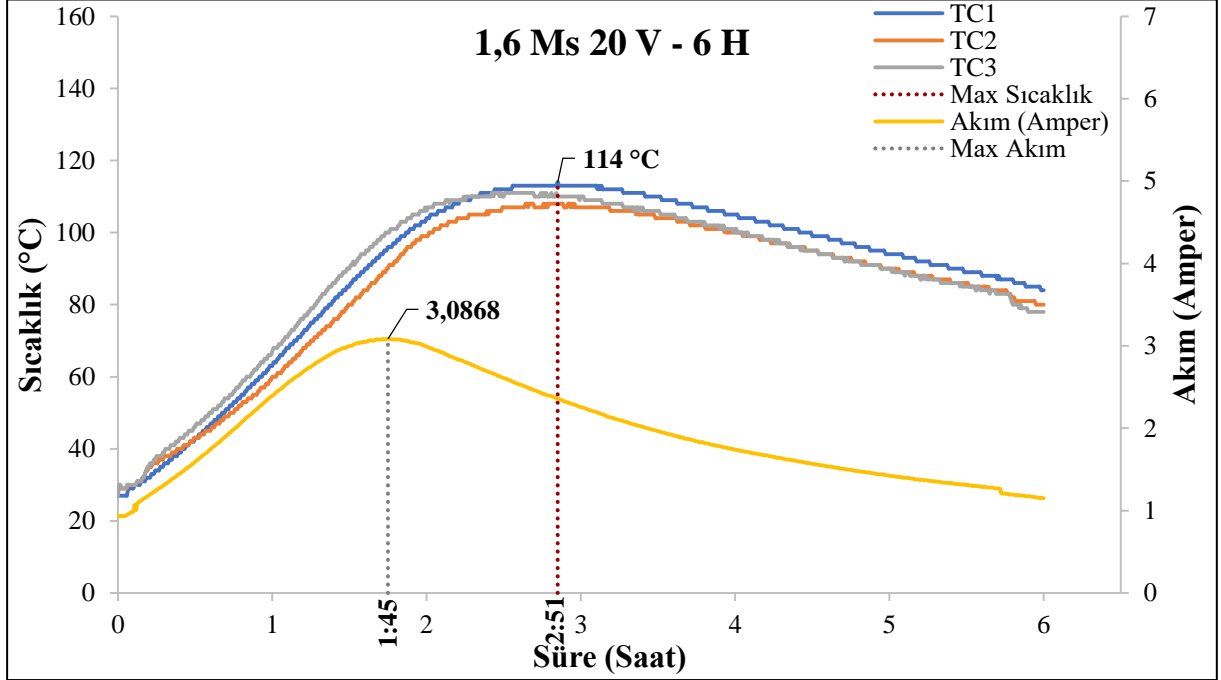
Tablo 4.8. 1,4 Ms %10 Na₂O deneysel veri özetleri

1,4 Ms %10 Na ₂ O Deneysel Veri Özetleri					
Kür Süresi	Ölçülen Değerler	Uygulanan Gerilim Değerleri			
		20V	25V	30V	35V
6 saatlik Kür	Pik Sıcaklık	96	125	121	128
	Ulaşılan Süre	3:06	1:30	0:59	0:57
	Pik Akım	2,4182	3,5743	4,8431	5,7915
	Ulaşılan Süre	2:25	1:21	0:56	0:29
12 saatlik Kür	Pik Sıcaklık	104	127	122	126
	Ulaşılan Süre	2:59	1:45	0:40	0:32
	Pik Akım	2,4182	3,5256	4,7644	5,6025
	Ulaşılan Süre	2:15	1:24	0:38	0:26

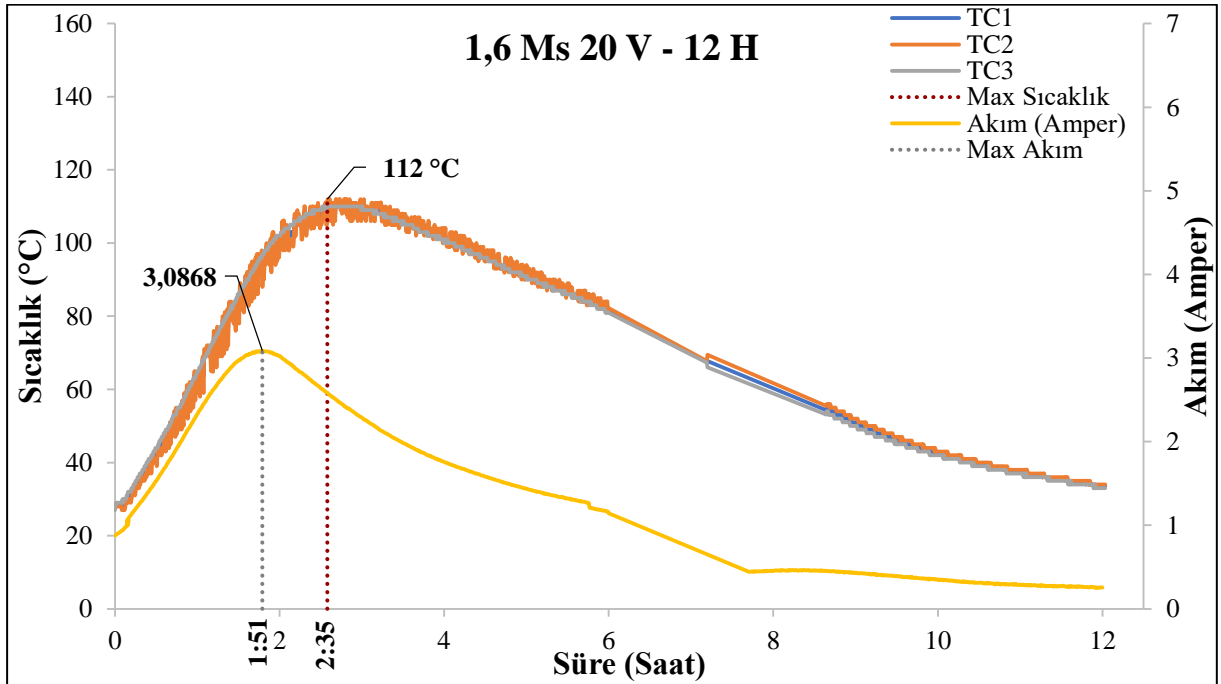
• saat: dakika

Tablo 4.8.'de görüldüğü gibi en düşük pik sıcaklık değeri 20 volt gerilim 96 °C ve en yüksek pik sıcaklık değeri ise 35 volt gerilimde 128 °C olarak elde edilmiştir. 1,4 Ms modülü için grafikler ve deneysel veri özet tablosu birlikte değerlendirildiğinde gerilimdeki artışın sıcaklık

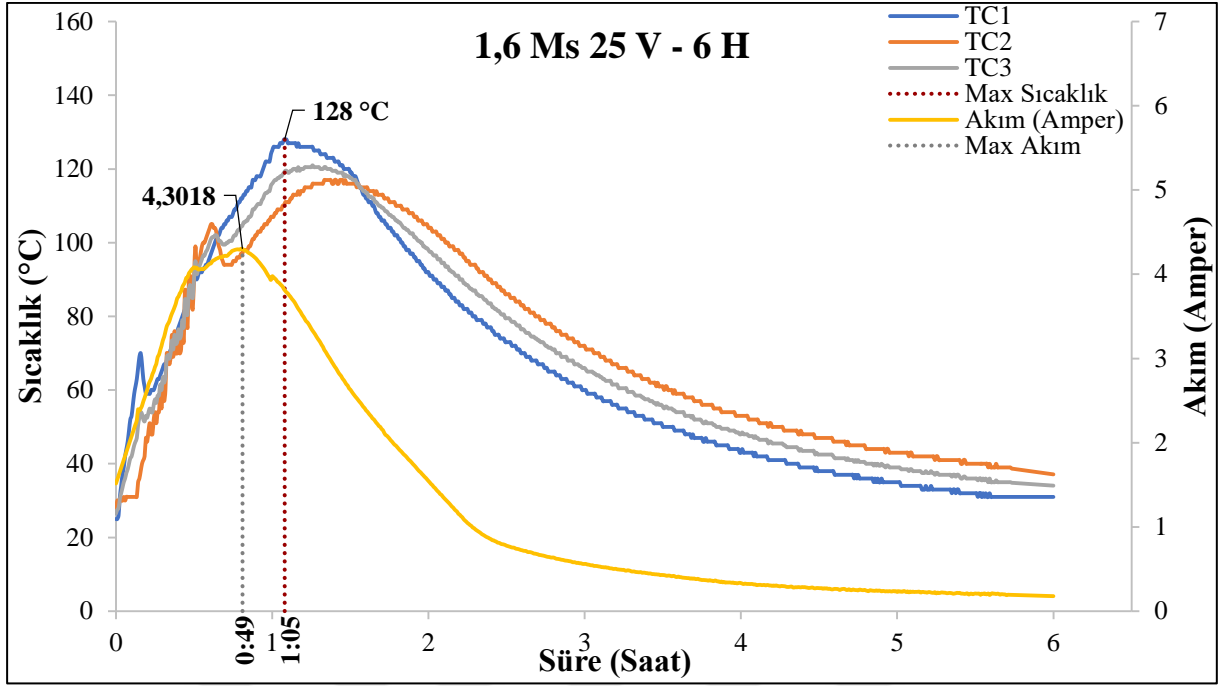
artış hızı üzerinde çok bir rol oynadığı, fakat sınır bir değer ile 125 – 128 °C arasında maksimum sıcaklığa çıktığı söylenebilir.



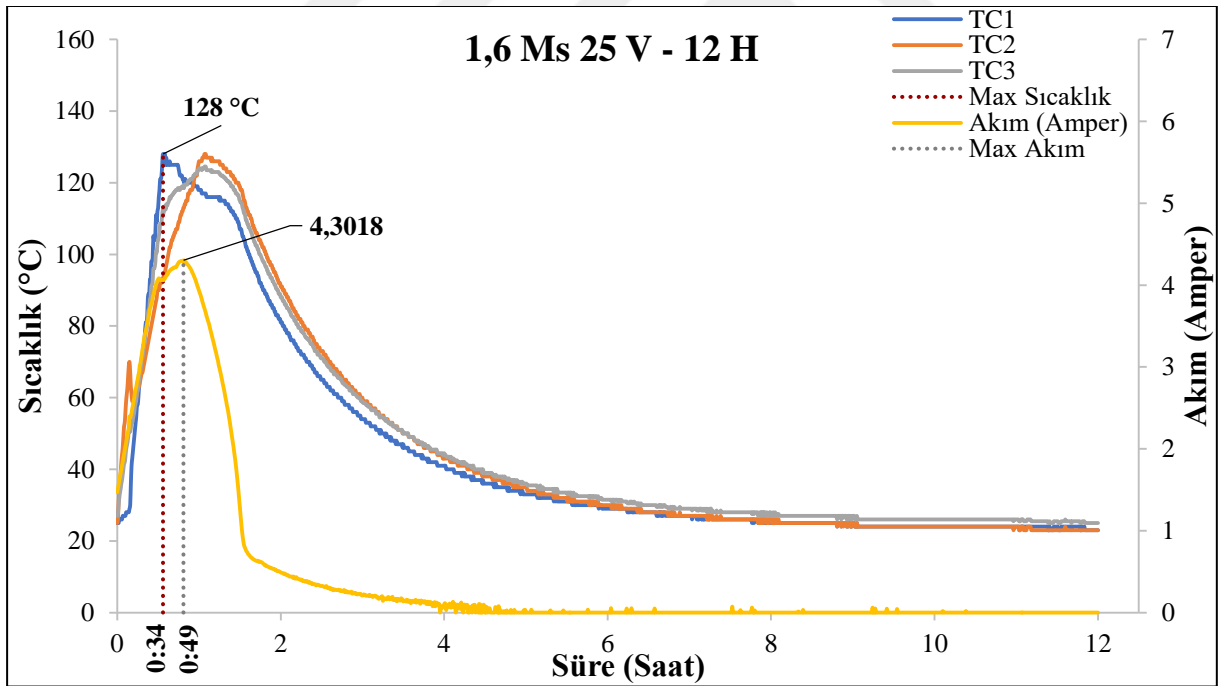
Şekil 4.38. 1,6 Ms %10 Na₂O 20 volt 6 saat elektriksel kür



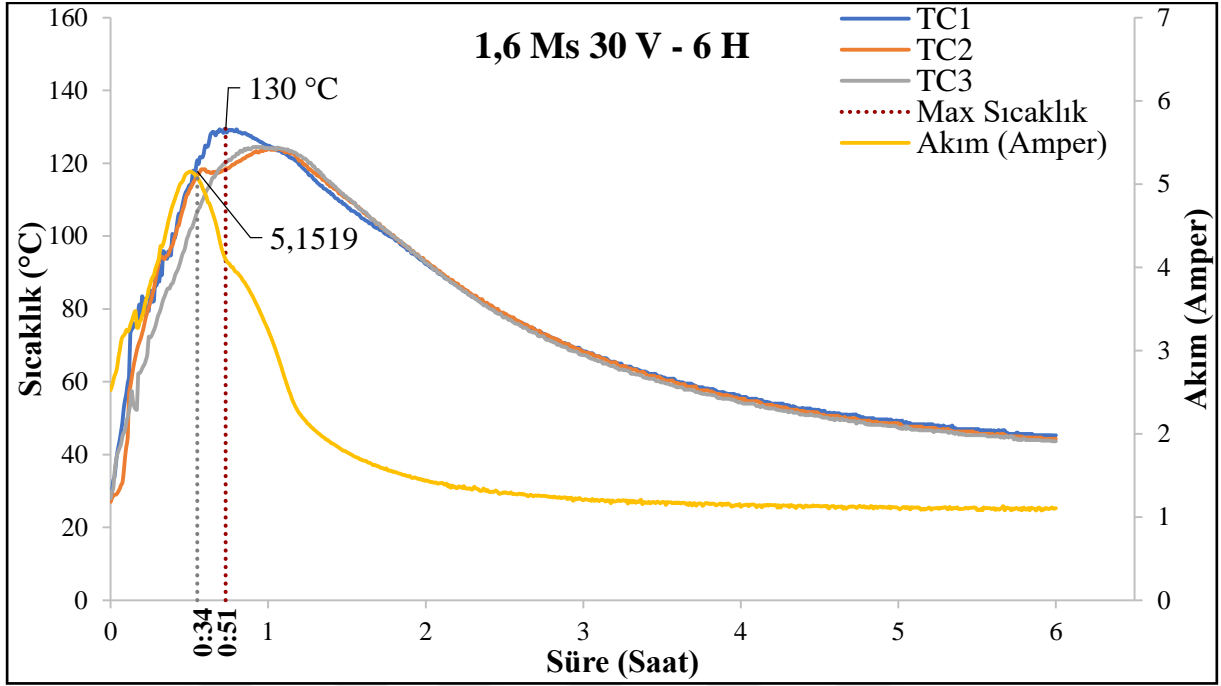
Şekil 4.39. 1,6 Ms %10 Na₂O 20 volt 12 saat elektriksel kür



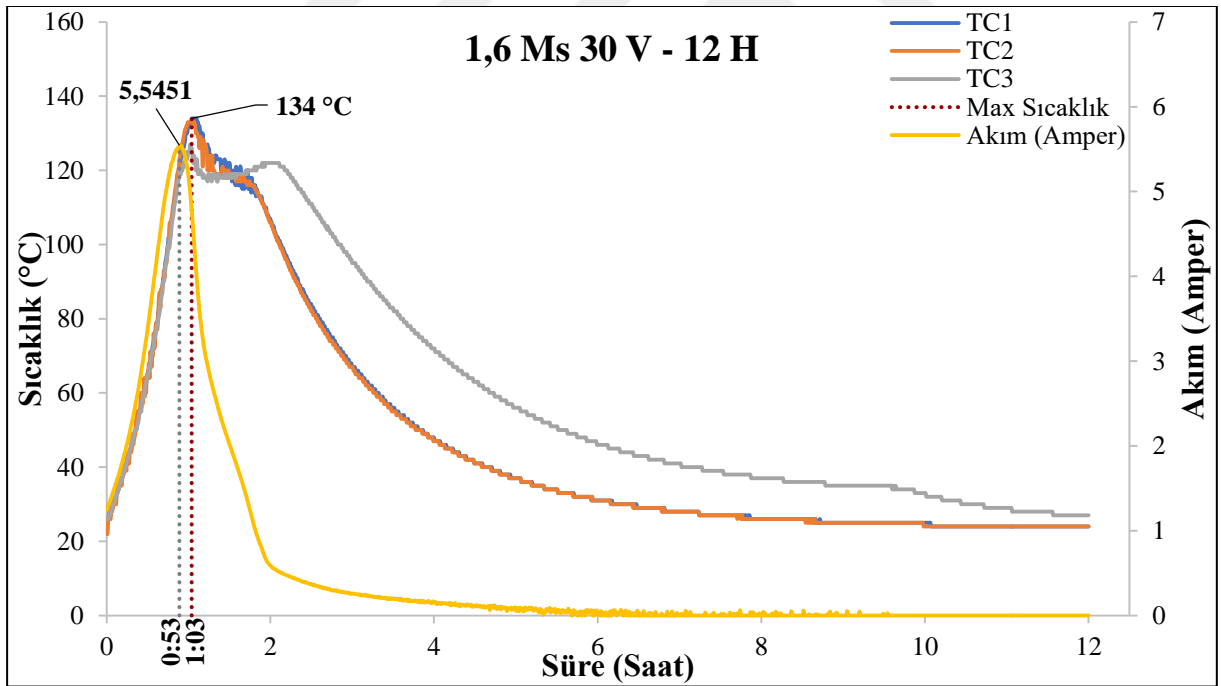
Şekil 4.40. 1,6 Ms %10 Na₂O 25 volt 6 saat elektriksel kür



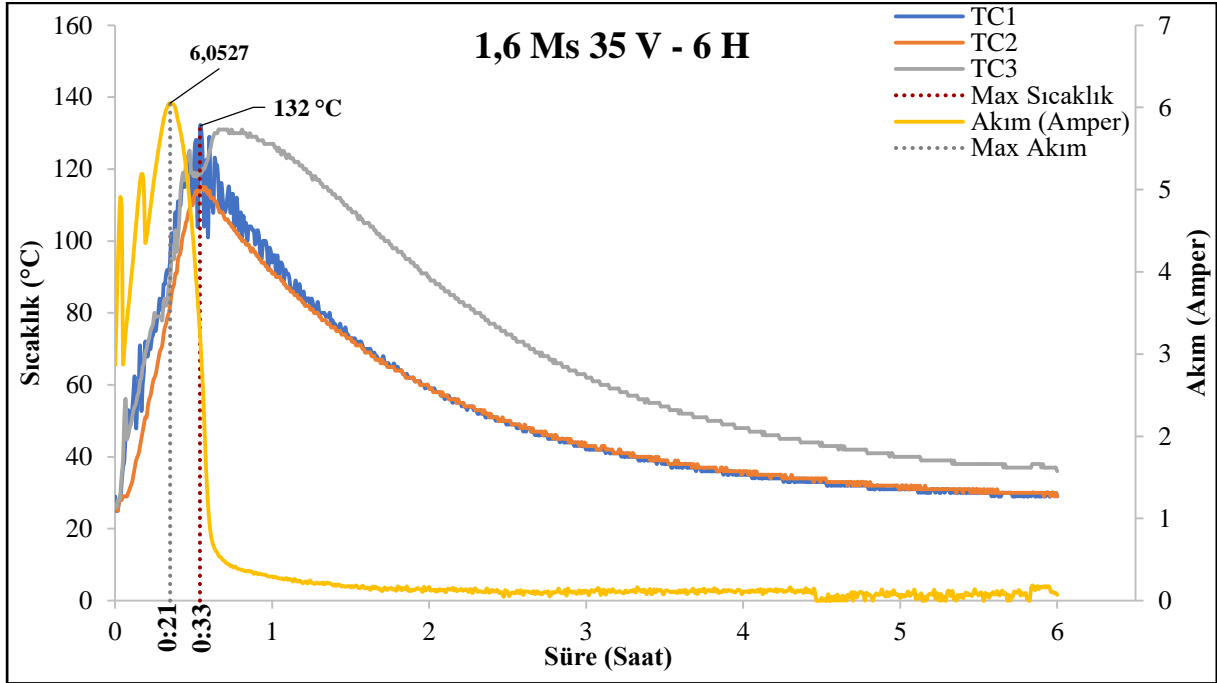
Şekil 4.41. 1,6 Ms %10 Na₂O 25 volt 12 saat elektriksel kür



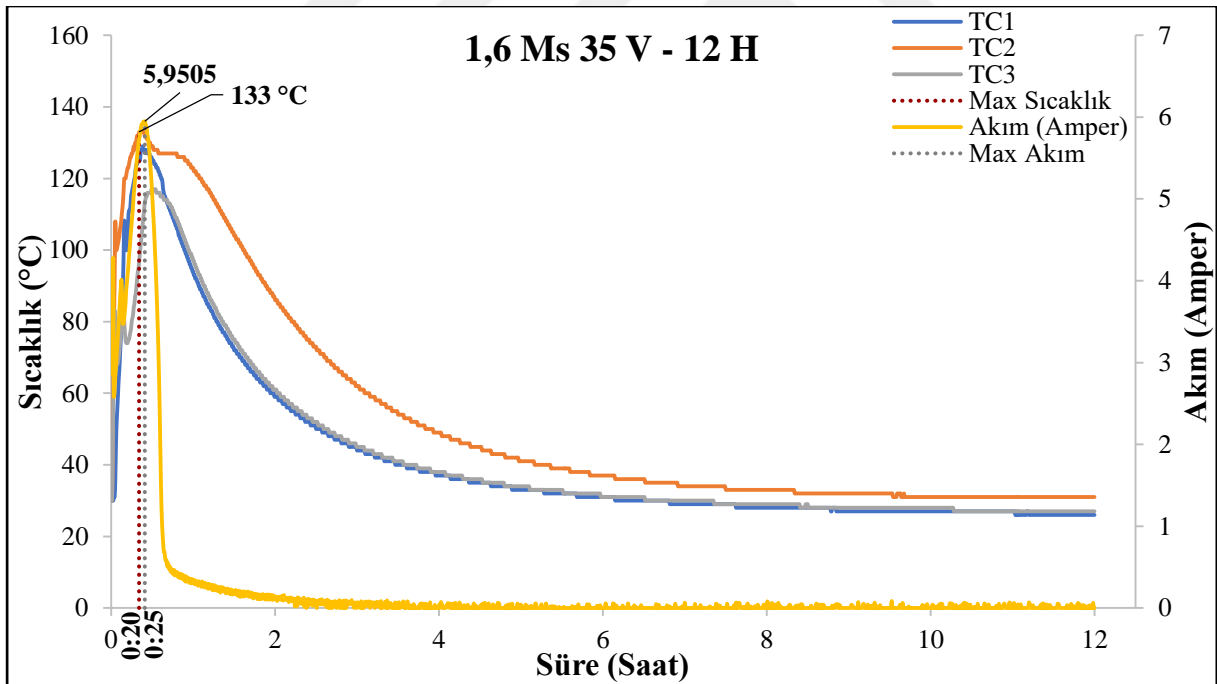
Şekil 4.42. 1,6 Ms %10 Na₂O 30 volt 6 saat elektriksel kür



Şekil 4.43. 1,6 Ms %10 Na₂O 30 volt 12 saat elektriksel kür



Şekil 4.44. 1,6 Ms %10 Na₂O 35 volt 6 saat elektriksel kür



Şekil 4.45. 1,6 Ms %10 Na₂O 35 volt 12 saat elektriksel kür

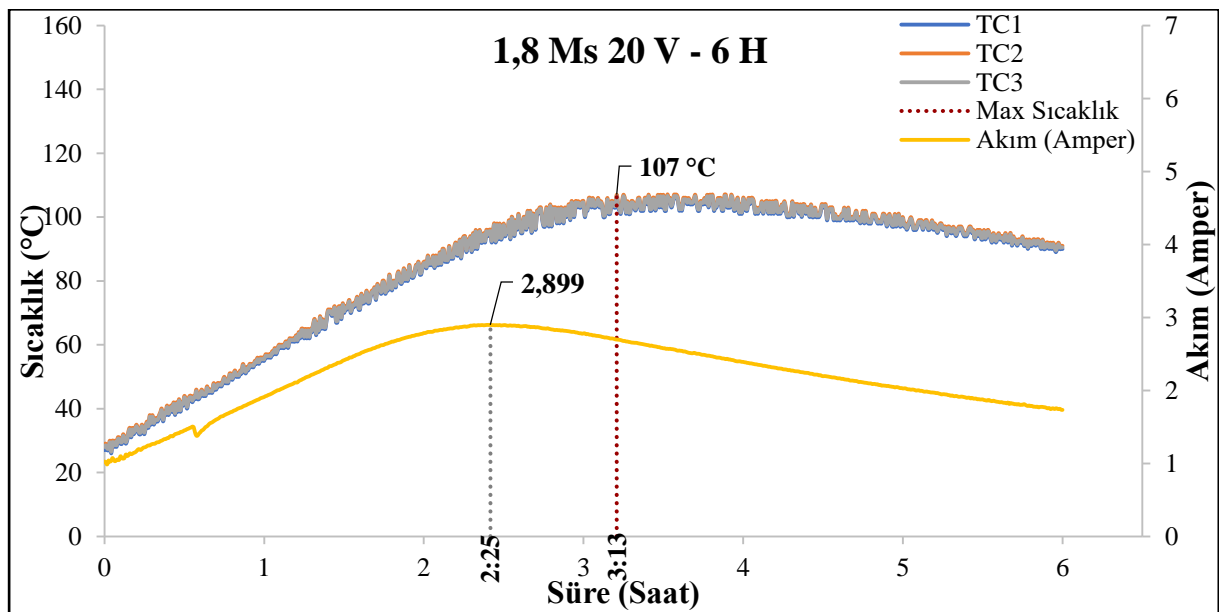
1,6 Ms modülüne sahip 20, 25, 30 ve 35 volt gerilim uygulaması ile üretilen harçlardan elde edilen deneysel veriler özetle Tablo 4.9.'da verilmiştir.

Tablo 4.9. 1,6 Ms %10 Na₂O deneysel veri özetleri

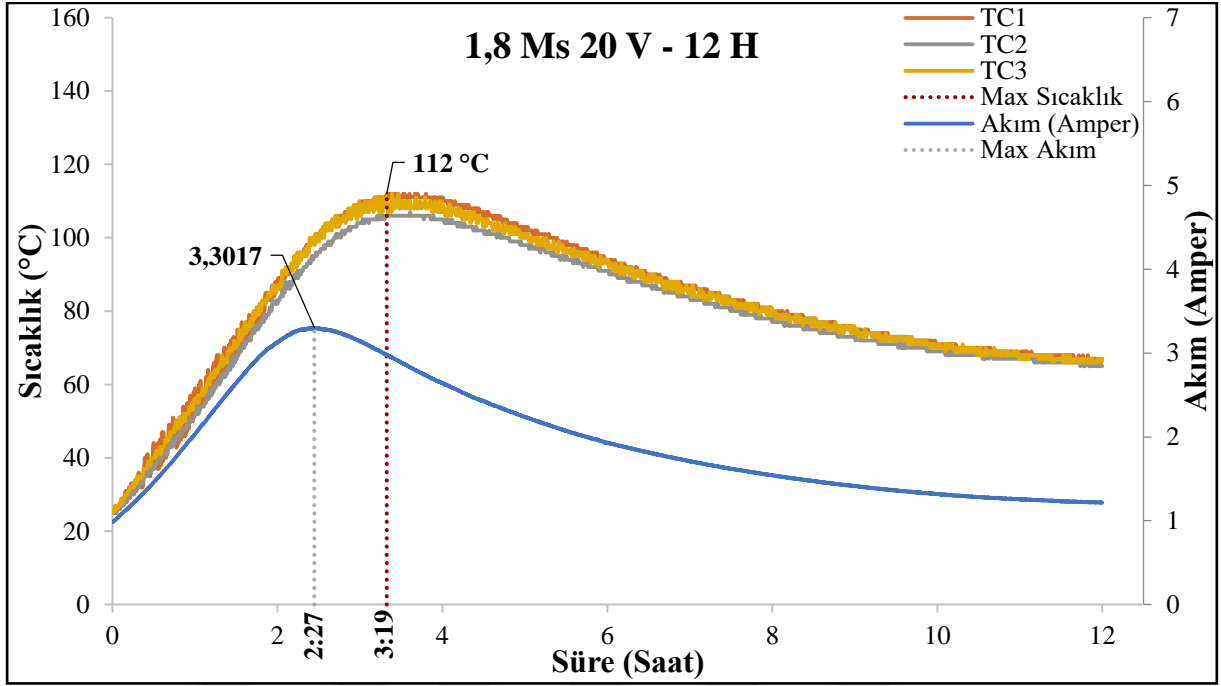
1,6 Ms %10 Na ₂ O Deneysel Veri Özetleri					
Kür Süresi	Ölçülen Değerler	Uygulanan Gerilim Değerleri			
		20V	25V	30V	35V
6 saatlik Kür	Pik Sıcaklık	114	128	130	132
	Ulaşılan Süre	2:51	1:05	0:51	0:33
	Pik Akım	3,0868	4,3018	5,1519	6,0527
	Ulaşılan Süre	1:45	0:49	0:34	0:21
12 saatlik Kür	Pik Sıcaklık	112	128	134	133
	Ulaşılan Süre	2:35	0:34	1:03	0:25
	Pik Akım	3,0868	4,3018	5,5451	5,9505
	Ulaşılan Süre	1:51	0:49	0:53	0:20

• saat: dakika

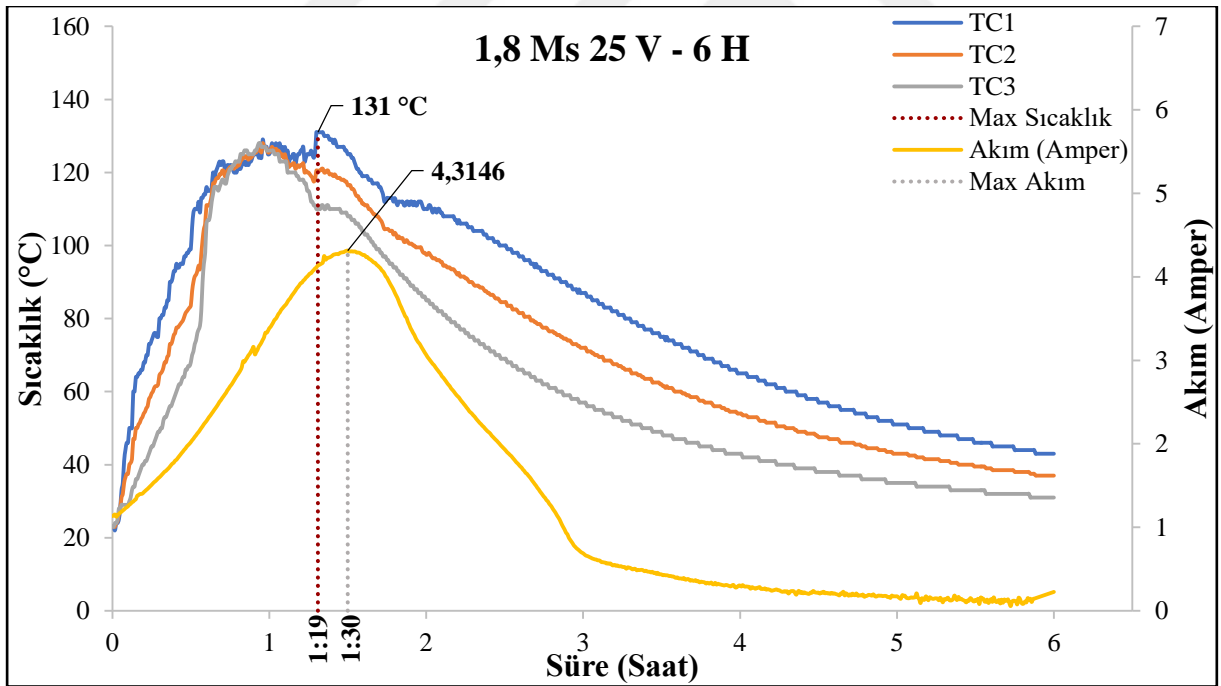
Tablo 4.9.'da görüldüğü gibi en düşük pik sıcaklık değeri 20 volt gerilim 112 °C ve en yüksek pik sıcaklık değeri ise 30 volt gerilimde 134°C olarak elde edilmiştir. 1,6 Ms modülü için grafikler ve deneysel veri özet tablosu birlikte değerlendirildiğinde gerilimdeki artışın sıcaklık artış hızı üzerinde etkin bir rol oynadığı söylenebilir. Ayrıca 1,4 Ms modülünde de belirtildiği gibi sıcaklık artışı belirli bir değere (130 –134 °C) kadar artış göstermiş ve uygulanan gerilim değerleri kapsamında bu sınırın üzerine çıkmamıştır.



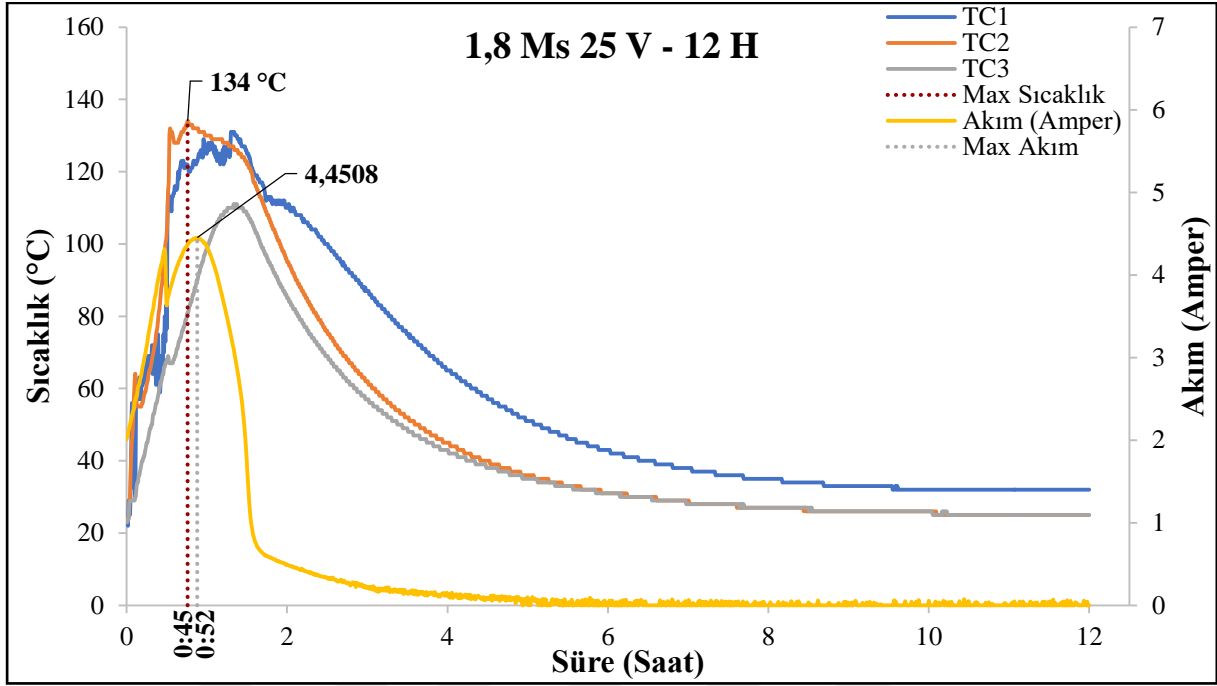
Şekil 4.45. 1,8 Ms %10 Na₂O 20 volt 6 saat elektriksel kür



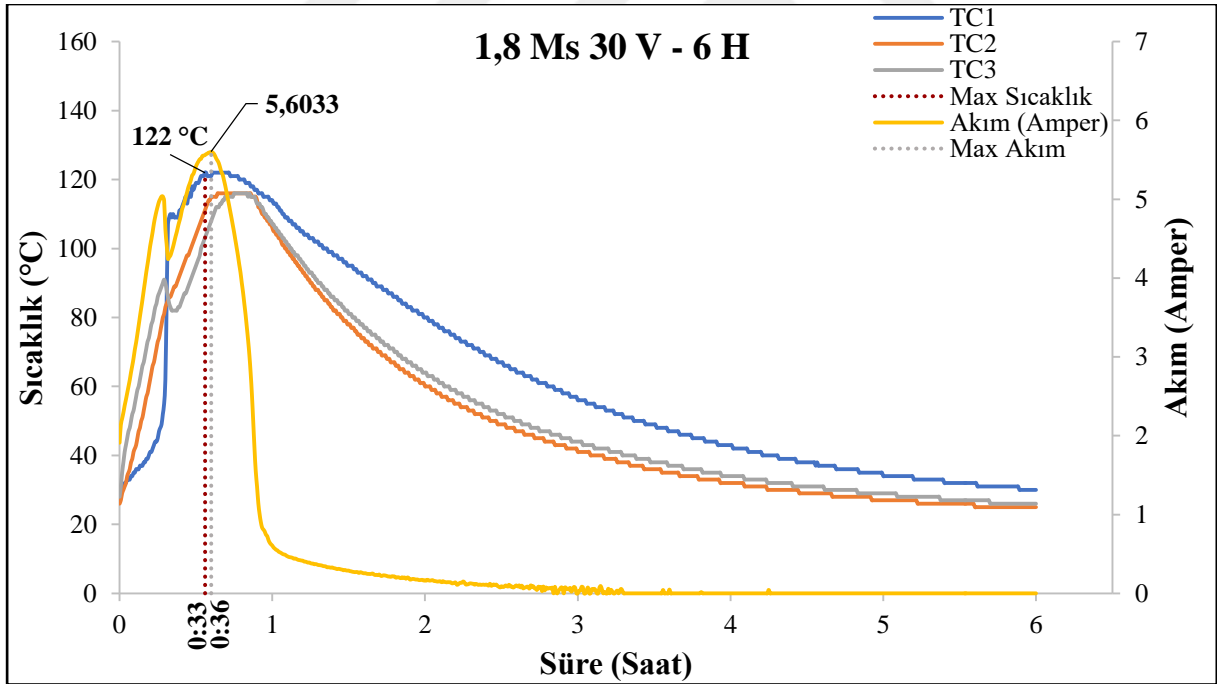
Şekil 4.46. 1,8 Ms %10 Na₂O 20 volt 12 saat elektriksel kür



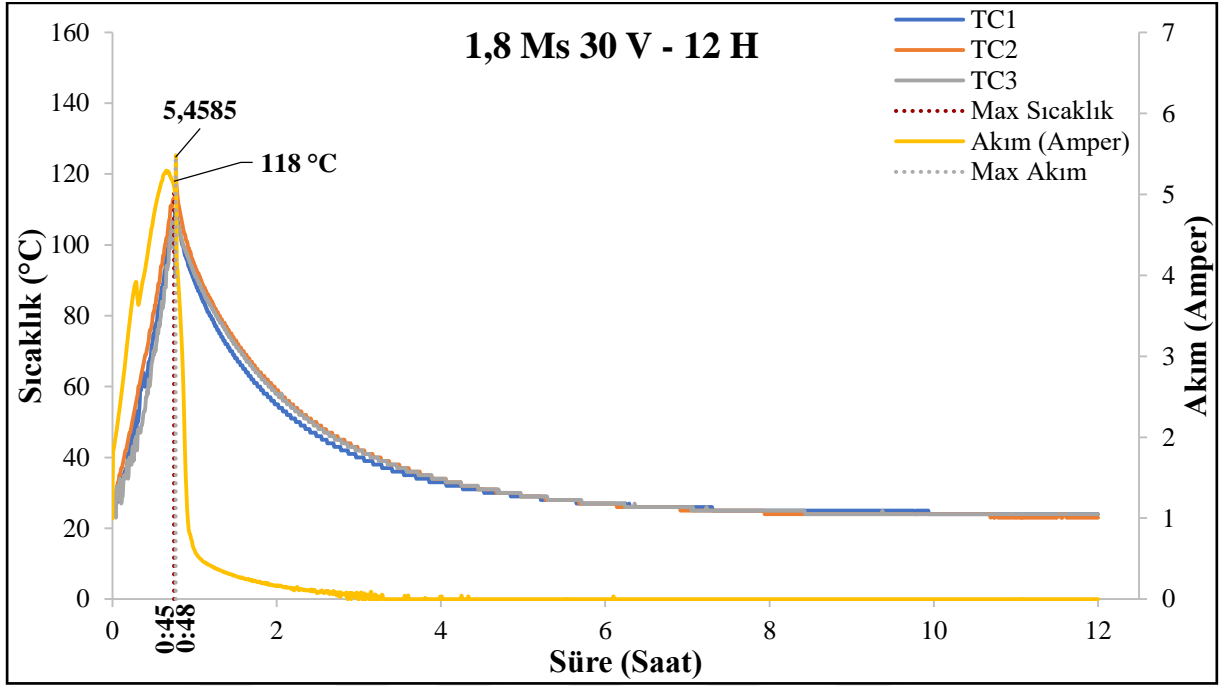
Şekil 4.47. 1,8 Ms %10 Na₂O 25 volt 6 saat elektriksel kür



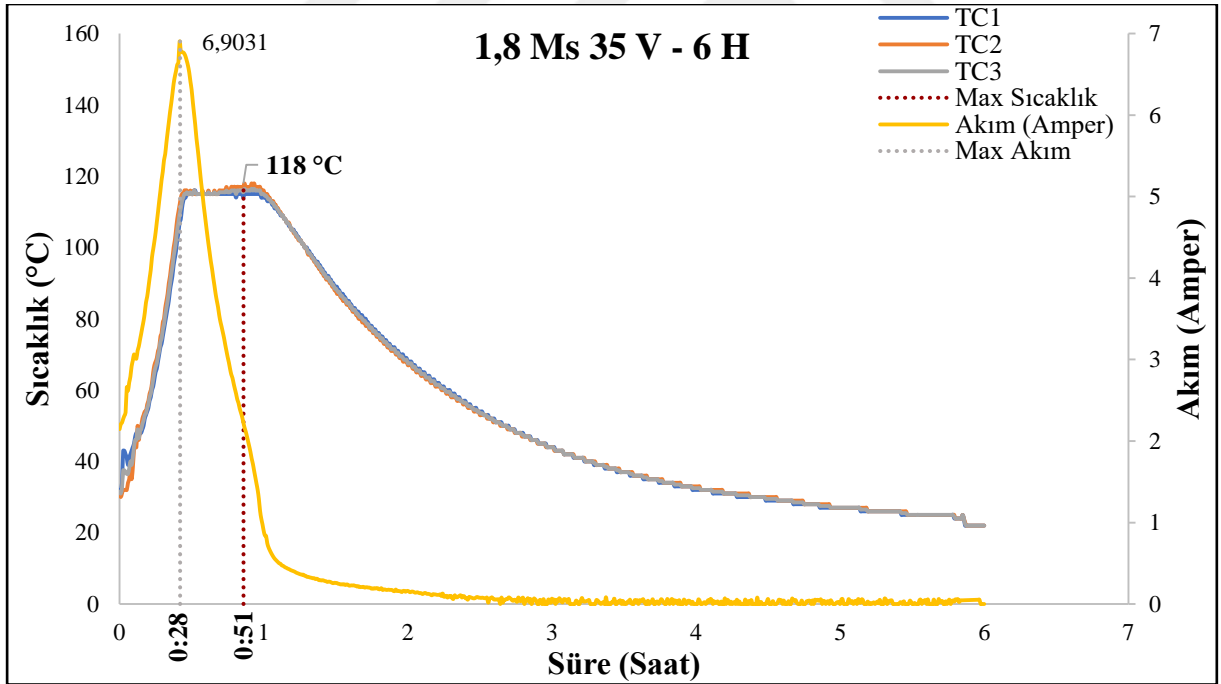
Şekil 4.48. 1,8 Ms %10 Na₂O 25 volt 12 saat elektriksel kür



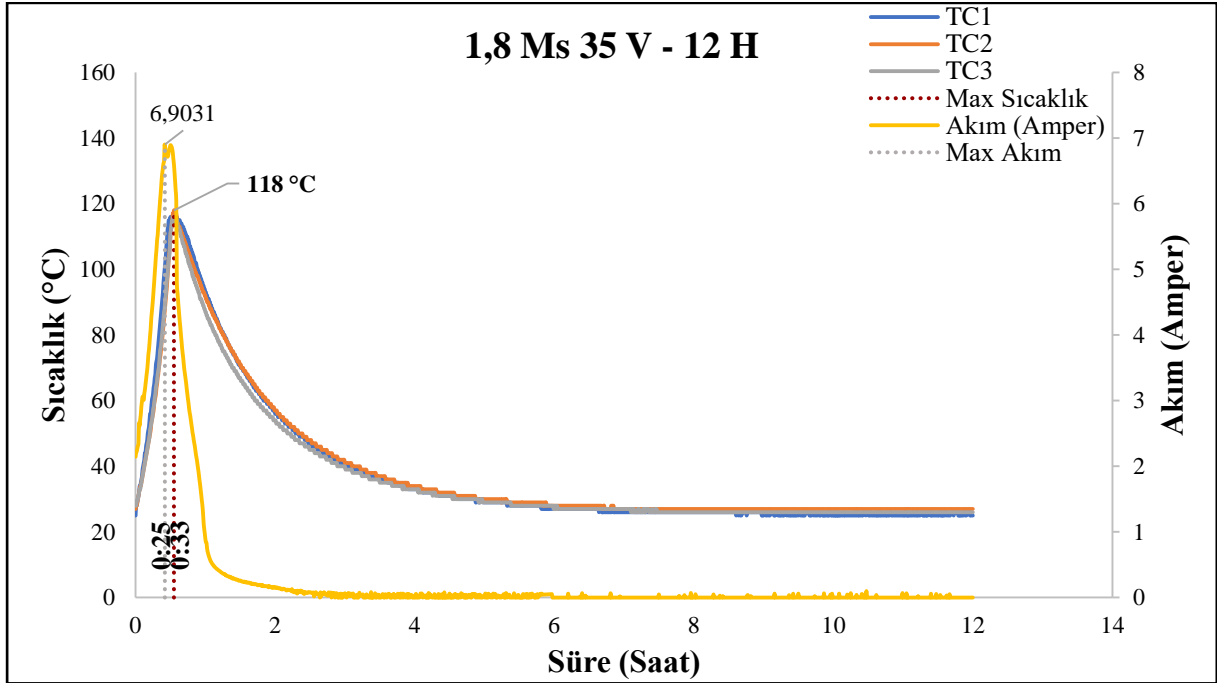
Şekil 4.49. 1,8 Ms %10 Na₂O 30 volt 6 saat elektriksel kür



Şekil 4.50. 1,8 Ms %10 Na₂O 30 volt 12 saat elektriksel kür



Şekil 4.51. 1,8 Ms %10 Na₂O 35 volt 6 saat elektriksel kür



Şekil 4.52. 1,8 Ms %10 Na₂O 35 volt 6 saat elektriksel kür

1,8 Ms modülüne sahip 20, 25, 30 ve 35 volt gerilim uygulaması ile üretilen harçlardan elde edilen deneysel veriler özetle Tablo 4.10.'da verilmiştir.

Tablo 4.10. 1,8 Ms %10 Na₂O deneysel veri özetleri

1,8 Ms %10 Na₂O Deneysel Veri Özetleri					
Kür Süresi	Ölçülen Değerler	Uygulanan Gerilim Değerleri			
		20V	25V	30V	35V
6 saatlik Kür	Pik Sıcaklık	107	131	122	118
	Ulaşılan Süre	3:13	1:19	0:33	0:51
	Pik Akım	2,899	4,3146	5,6033	6,9031
	Ulaşılan Süre	2:25	1:30	0:36	0:28
12 saatlik Kür	Pik Sıcaklık	112	134	118	118
	Ulaşılan Süre	3:19	0:45	0:45	0:33
	Pik Akım	3,3017	4,4508	5,4585	6,9031
	Ulaşılan Süre	2:27	0:52	0:48	0:25

• saat: dakika

Tablo 4.10’da görüldüğü gibi en düşük pik sıcaklık değeri 20 volt gerilim 107 °C ve en yüksek pik sıcaklık değeri ise 25 volt gerilimde 134 °C olarak elde edilmiştir. 1,8 Ms modülü için grafikler ve deneysel veri özet tablosu birlikte değerlendirildiğinde gerilimdeki artışın sıcaklık artış hızı üzerinde çok etkin bir rol oynadığı söylenebilir.

Yukarıda bahsedilen tüm bulgulara ek olarak Ms modülünün de gerilim – sıcaklık ilişkisi üzerinde bir etkisinin olduğundan bahsedilebilir. Normalde Ms modülünün bu çalışmada değişken parametre olarak seçilmesinin ana nedeni işlenebilirliktir. Fakat elde edilen Ms, gerilim, sıcaklık değişimi grafikleri dikkatli bir şekilde analiz edildiğinde Ms 1,2 ve gerilim 35 volt iken pik sıcaklık 127 °C değerini almış fakat aynı gerilim değerinde Ms oranı yükseldikçe; 1,4’de pik sıcaklık 128 °C, 1,6’da 133 °C ve 1,8 de ise 118 °C değerini almıştır. Bu durum Ms modülünün kür etkinliğinde ne derece önemli bir rol oynayabileceğini ortaya koymaktadır.

4.2.1.1. Elektriksel kür yöntemi ile üretilen harç numunelerin basınç dayanımları

Tez çalışması kapsamında elektriksel kür yöntemi ile 1,2, 1,4, 1,6 ve 1,8 Ms modülündeki 100x100x100 mm kalıplara yerleştirilen harç numunelere 20, 25, 30 ve 35 volt gerilim değerleri 6 ve 12 saat boyunca ayrı ayrı uygulanmıştır.

Bu yöntem ile üretilen küp harç numunelerin tek eksenli basınç dayanımları 3 tekrarlı olacak şekilde incelenmiş ve elde edilen dayanım sonuçları Tablo 4.1.’de verilmiştir.

Tablo 4.11. Elektriksel kür yöntemi ile üretilen harç numunelerin tek eksenli basınç dayanımları

Numune		6 saat kür dayanımı (MPa)				12 saat kür dayanımı (MPa)			
		Gerilim değeri (volt)				Gerilim değeri (volt)			
		20	25	30	35	20	25	30	35
1,2 Ms %10 Na₂O	1. numune	8,77	35,16	25,80	9,94	21,71	47,53	33,48	14,78
	2. numune	9,00	35,15	25,88	11,27	21,02	41,62	37,77	15,31
	3. numune	8,28	41,54	28,20	10,96	19,48	41,94	33,48	12,37
1,4 Ms %10 Na₂O	1. numune	10,12	25,22	9,86	7,03	29,60	36,01	15,24	9,97
	2. numune	7,95	30,23	10,63	8,31	27,98	45,18	17,91	11,28
	3. numune	24,71	30,13	13,37	6,60	30,02	40,05	18,95	12,61
1,6 Ms %10 Na₂O	1. numune	19,31	10,35	7,06	3,78	20,75	18,35	12,06	4,34
	2. numune	14,06	10,50	7,60	3,16	31,26	13,27	12,34	4,24
	3. numune	27,45	10,05	9,17	3,58	30,62	16,08	12,95	6,46
1,8 Ms %10 Na₂O	1. numune	11,86	8,71	2,40	0	19,27	5,22	4,72	0
	2. numune	13,15	7,77	1,89	0	19,34	8,22	3,36	0
	3. numune	11,83	7,58	2,86	0	18,14	6,80	2,98	0

4.2.1.2. Isıl kür yöntemi ile üretilen harç numunelerin basınç dayanımları

Isıl kür uygulaması için 1,2, 1,4, 1,6 ve 1,8 Ms modülünde %10 Na₂O konsantrasyonuna sahip harçlar, 60 °C, 80 °C, 100 °C ve 120 °C sıcaklıklarda ayrı ayrı olarak 6 saat ve 12 saat boyunca etüvde kürlenmiştir. 6 saat ve 12 saatlik ısı kürünün ardından 3'er tekrarlı dökülen numuneler kalıplardan çıkarılmış ve 1 gün boyunca laboratuvarında bekletildikten sonra basınç dayanımlarına bakılmıştır. Isıl kür uygulanan harçların basınç dayanımları Tablo 4.12.'de verilmiştir.

Tablo 4.12. Isıl kür yöntemi ile üretilen harç numunelerin tek eksenli basınç dayanımları

Numune		6 saat kür dayanımı (MPa)				12 saat kür dayanımı (MPa)			
		Isıl kür (°C)				Isıl kür (°C)			
		60	80	100	120	60	80	100	120
1,2 Ms %10 Na ₂ O	1. numune	11,89	40,02	47,04	41,59	35,26	43,56	52,12	46,04
	2. numune	11,73	38,76	46,54	41,44	38,40	42,35	51,29	48,34
	3. numune	12,41	32,25	43,91	40,83	36,61	45,56	52,94	48,86
1,4 Ms %10 Na ₂ O	1. numune	7,22	25,43	35,79	36,48	33,59	40,53	47,98	42,28
	2. numune	6,68	24,90	30,90	35,62	27,05	39,73	48,25	44,69
	3. numune	6,54	20,03	39,18	37,09	27,82	40,15	49,01	44,71
1,6 Ms %10 Na ₂ O	1. numune	5,29	18,94	29,35	27,42	18,14	31,70	39,09	41,76
	2. numune	5,78	17,48	24,76	31,17	17,43	27,56	41,79	42,57
	3. numune	6,65	19,58	26,90	29,57	17,08	30,12	37,38	38,27
1,8 Ms %10 Na ₂ O	1. numune	3,41	21,08	23,44	20,36	15,04	26,65	29,91	22,99
	2. numune	3,56	22,80	23,53	19,25	16,93	20,50	28,88	25,17
	3. numune	3,57	16,21	22,57	20,20	14,25	26,69	26,5	22,36

4.3. Betonlara Uygulanan Deneylerden Elde Edilen Bulgular

Tez çalışmasında geopolimer harçlar elektriksel kür ve ısı kür yöntemleri ile üretilmiştir. Bu iki kür uygulaması içerisinde benzer dayanımları verebilecek belirli bir sınıf seçilerek beton üretimi aşamasına geçilmiştir. Elektriksel kür yönteminde 1,4 Ms modülüne sahip ve 6 saat boyunca 25 V gerilim uygulanan harç numune, ısı kür yönteminde de 1,6 Ms modülüne sahip 6 saat boyunca 100 °C kür uygulanan harç numune beton üretimi için seçilmiştir.

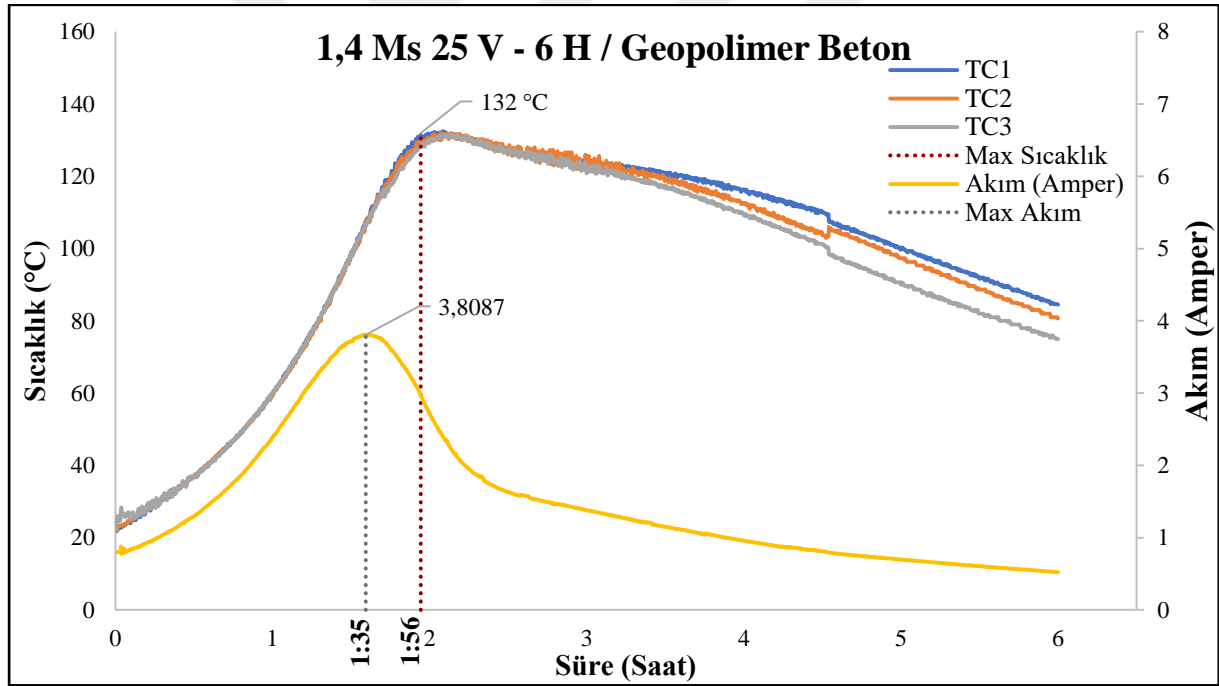
Harçlar seçildikten sonra beton üretim aşamasına geçilmiş ve benzer dayanım sınıfında ve Tablo 4.13.'de verilen özellikteki geleneksel portland çimentolu betonlar ile çeşitli kıyaslamalar yapılmıştır.

Tablo 4.13. Tez kapsamında geopolimer betonla kıyaslanan geleneksel PÇ beton reçetesi

Malzeme Miktarları (kg/m ³)				
0-5	5-12	Çimento	Su	Akışkanlaştırıcı
1087	896	300	165	5,4

4.3.1. Elektriksel kür ile üretilen geopolimer betonların üretimine ait bulgular

Elektriksel kür yönteminde 1,4 Ms modülüne sahip ve 6 saat boyunca 25 volt gerilim uygulanan harç numune beton üretimi için seçilmiş ve bu harç karışımının bağlayıcı hamuru kullanılarak 0-5 mm ince agrega ve 5-12 mm iri agrega ile geopolimer beton üretilmiştir. Elektriksel kür yöntemi ile üretilen betona 25 volt gerilim uygulanmasında ortaya çıkan sıcaklık-akım ve süre ilişkisi Şekil 4.53.'te verilmiştir.



Şekil 4.53. 1,4 Ms %10 Na₂O 35 volt 6 saat elektriksel kür ile üretilmiş geopolimer beton

Şekil 4.53.'te verilen deney bulgularına göre geopolimer beton karışımı 1 saat 56 dakika sonunda 132 °C sıcaklık değerine ve 1 saat 35 dakika sonunda da 3,8087 maksimum akım değerine ulaşmıştır. Aynı reçete ve uygulama tipine bağlı olan harç karışımı 1 saat 30 dakika sonunda 125 °C iç sıcaklık değerine ve 1 saat 21 dakika sonunda 3,5743 maksimum akım değerine ulaşmıştır. Geopolimer beton dökümünün de harç dökümüne benzer sürelerde ve

benzer maksimum değerlerde sonuç göstermiştir. Harç ve beton deneylerinde elde edilen sonuçlar detaylı olarak Tablo 4.14.'te verilmiştir.

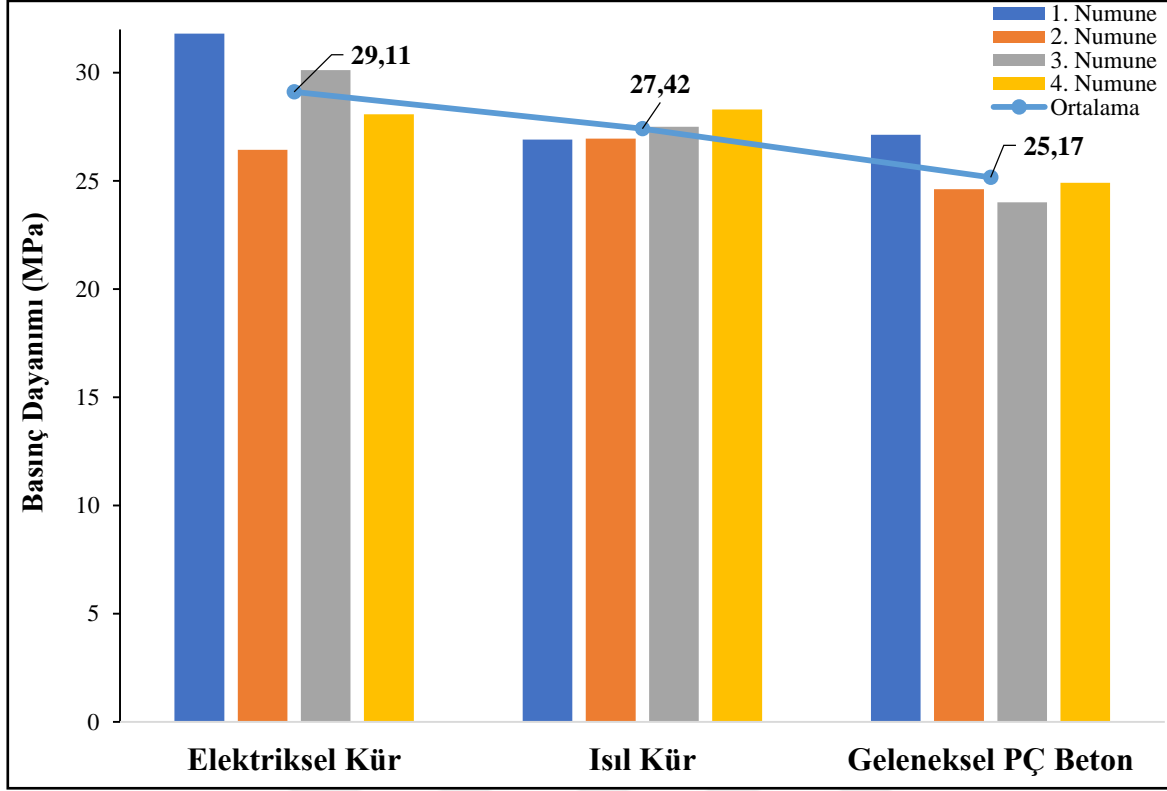
Tablo 4.14. 1,4 Ms %10 Na₂O 25 volt harç ve beton üretimi veri özetleri

1,4 Ms %10 Na₂O 25 volt Harç ve Beton Üretimi Veri Özetleri		
Numune	Ölçülen Değerler	Uygulanan Gerilim Değeri 25V
Harç Numune	Pik Sıcaklık	125 °C
	Ulaşılan Süre	01:36
	Pik Akım	3,5743
	Ulaşılan Süre	01:21
Beton Numune	Pik Sıcaklık	132 °C
	Ulaşılan Süre	01:56
	Pik Akım	3,8087
	Ulaşılan Süre	01:35
saat: dakika		

Tablo 4.12.'de verilen bulgular incelendiğinde, harç ve beton numunelerin elektriksel kür uygulamasında ortaya çıkan pik sıcaklık – pik akım ve bu değerlere ulaşma sürelerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Beton deneyindeki bulgular, harç deneylerindeki bulguları da doğrulamıştır.

4.3.2. Basınç dayanımı bulguları

Tez çalışmasında üretilen geopolimer betonların basınç dayanımları geleneksel Portland çimentolu betonlar ile kıyaslanmış ve elde edilen bulgular Şekil 4.54.'te verilmiştir.



Şekil 4.54. Beton basınç dayanımları

Elde edilen bulgulara göre 6 saat boyunca 25 volt gerilim ile üretilen 1,4 Ms modülündeki geopolimer betonların ortalama basınç dayanımları 29,11 MPa, 6 saat boyunca 100 °C etüvde kürlenerek üretilen 1,6 Ms modülündeki geopolimer betonların ortalama basınç dayanımları 27,42 MPa olarak bulunmuştur.

4.3.3. Kılcallık bulguları

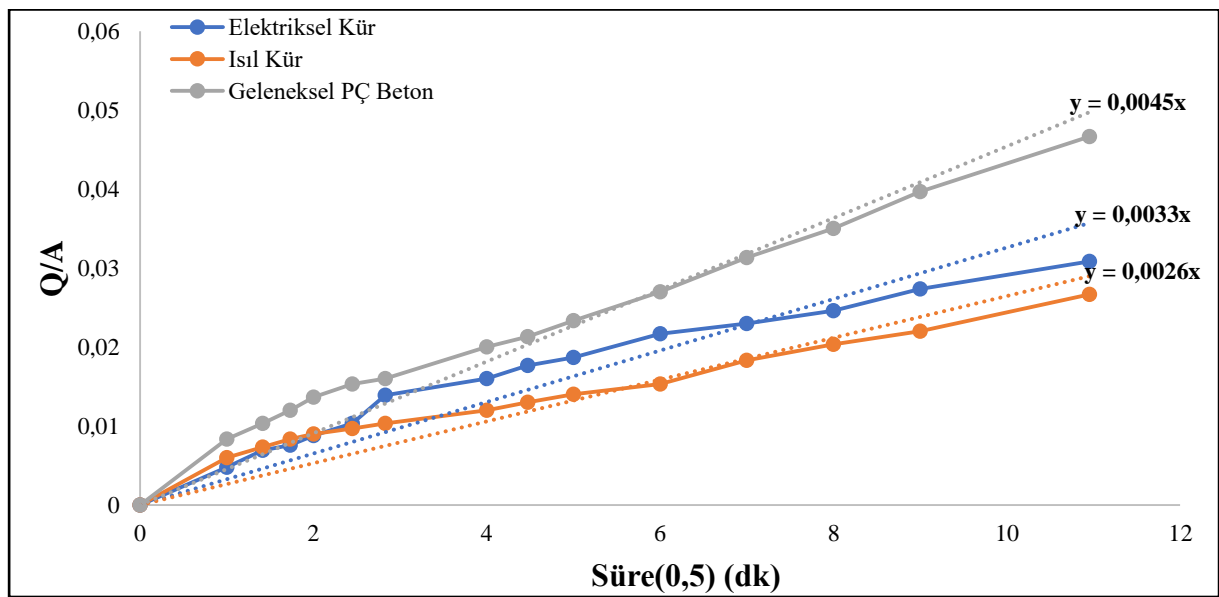
Üretilen geopolimer betonların hem kendi arasında hem de geleneksel betonla kıyaslanması amacıyla ortalama basınç dayanımı 27 MPa olan geleneksel beton karşımı da ayrıca hazırlanarak kılcallık deney numuneleri üretilmiştir.

Üretilen geopolimer betonlar ve geleneksel portland çimentolu betonlar üzerinde 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 20, 25, 36, 49, 64, 81, ve 120. dakikalarda kılcallık deneyi uygulanmıştır. Deney kapsamında elektriksel kür, ısıl kür ile üretilen geopolimerlerden ve 28 günlük su kürü uygulaması ile üretilen geleneksel Portland çimentolu betonlardan 3'er numune kullanılmış, elde edilen bulgular ortalama değer olarak Tablo 4.15.'te verilmiştir.

Tablo 4.15. Kılcallık deneyi bulguları

Süre (Dakika)	Elektriksel Kür (g)	Isıl Kür (g)	Geleneksel PÇ Beton (g)
0	2312,15	2200,27	2344,53
1	2312,62	2200,87	2345,36
2	2312,83	2201,02	2345,57
3	2312,893	2201,14	2345,73
4	2313,01	2201,17	2345,92
6	2313,163	2201,23	2346,07
8	2313,513	2201,32	2346,13
16	2313,72	2201,47	2346,53
20	2313,883	2201,57	2346,67
25	2313,98	2201,67	2346,87
36	2314,273	2201,81	2347,23
49	2314,4	2202,12	2347,67
64	2314,56	2202,35	2348,03
81	2314,83	2202,47	2348,55
120	2315,173	2202,93	2349,21
Kapilarite (mm/dakika^{1/2})	0,33	0,26	0,45

Tablo 4.15.'te elde edilen bulgulara göre kılcallık katsayılarının ölçüm yapılan zaman aralıklarına göre analizi yapılmış ve bu ilişki Şekil 4.55.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.55. Betonların süre ve yüzey alanına bağlı kılcallık eğrileri

Bulgular incelendiğinde, ısı küt ile üretilen geopolimer betonun kılcallık katsayısının 0,26 mm/dakika^{1/2} ile en düşük değeri verdiği ardından da elektriksel küt yöntemi ile üretilen geopolimer betonun 0,33 mm/dakika^{1/2} değeri olduğu görülmektedir. Geleneksel Portland çimentolu beton ise 0,45 mm/dakika^{1/2} ile en yüksek değeri vermiştir. Bu değerler, uçucu kül bazlı geopolimerlerin geleneksel betonlara göre geçirimsizlik konusunda daha iyi olduğunu göstermektedir.

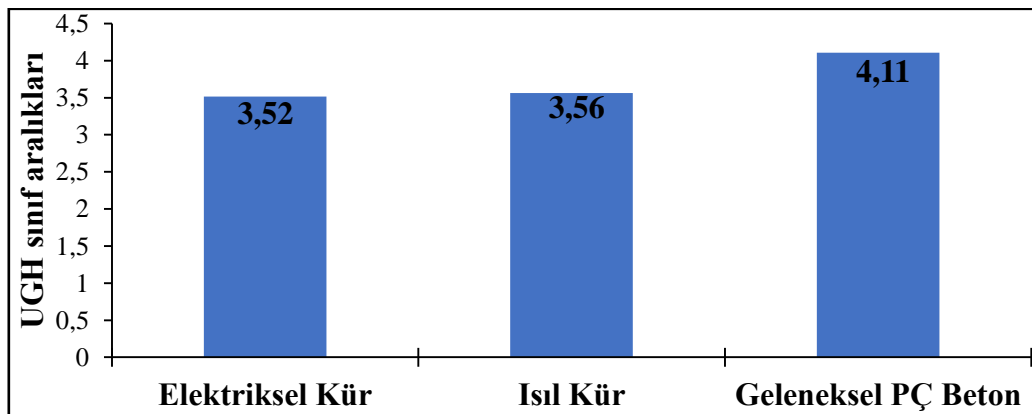
4.3.4. Ultrases geçiş hızı bulguları

Ultrases geçiş hızı deneyinden elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri 4.16'da verilmiştir. Bu deneyden elde edilen değerler beton hakkında fikir edinebilmek amaçlı önermeye göre (Tablo 3.8.) değerlendirilir. Bu önerme belirli sınırlar belirtmektedir. Bu sınırlara göre betonlar; çok kötü, şüpheli, iyi ve mükemmel olarak fikir yürütülebilmektedir.

Tablo 4.16. Ultrases geçiş hızı deney verileri

Numune	10 cm'lik uzunlukta okunan ultrases geçiş hızı süreleri (µs)		
	Elektriksel Küt	Isıl Küt	Geleneksel PÇ Beton
1. numune	26,7	27,6	24
	29,2	26,6	24,2
2. numune	29,6	27,9	24,3
	27,2	27,9	24,4
3. numune	28	29,1	24
	28,7	28,27	25,3

Deney bulgular incelendiğinde betonların tamamı yukarıda verilen sınıflandırmaya göre iyi özelliklere sahiptir denilebilir. Bu durum üretilen tüm betonların içyapısında az boşluk bulunduğuna işaret etmektedir.



Şekil 4.56. Beton numunelerin ultrases geçiş hızına göre sınıfları

Şekil 4.56.'da verilen bulgulara göre elektriksel kür yöntemi ile üretilen numunelerin UGH sonuçları 3,52 km/sn, ısıll kür ile üretilen numunelerin UGH sonuçları 3,56 km/sn ve geleneksel portland çimentolu betonlarda beton numunelerin UGH sonuçları 4,11 km/sn bulunmuştur. Hem elektriksel kür yöntemi ile üretilen numunelerde hem ısıll kür ile üretilen numunelerde hem de geleneksel portland çimentolu betonlarda sonuçlar 3,5 – 4,5 arasında kalmış ve yukarıda (Tablo 3.18.) belirtilen sınıflandırmaya göre bu betonların tamamı iyi özelliklere sahiptir denilebilir.

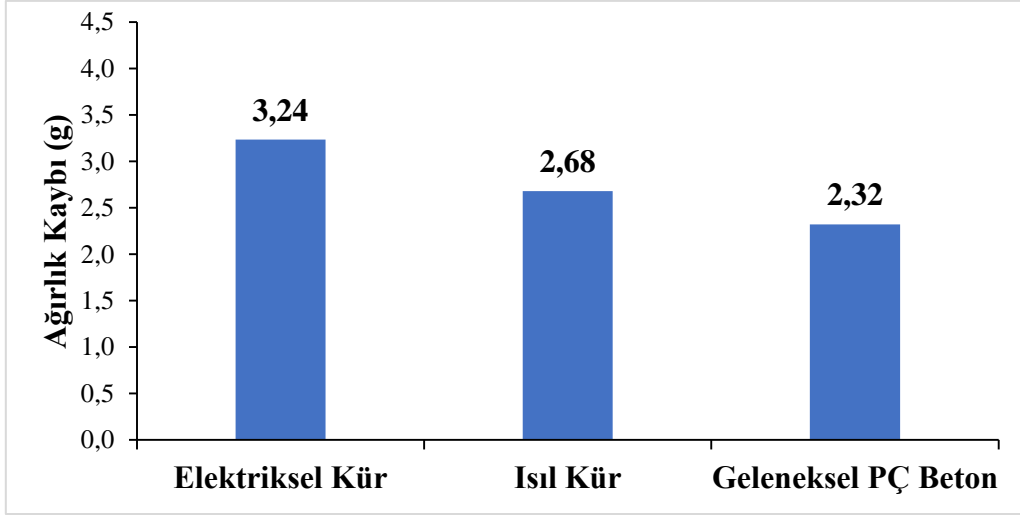
4.3.5. Böhme aşınma deneyi bulguları

Tez çalışmasında 100x100x100 mm'lik kalıplarda ısıll kür / elektriksel kür yöntemi ile üretilen geopolimer betonlar ve 28 gün su kürü ile üretilen geleneksel portland çimentolu beton numuneleri 71 mm ayrıtlı küpler halinde kesilmiş ve Böhme aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Deney 3 tekrarlı gerçekleştirilmiş ve numuneler üzerinde hassas terazi yardımı ile aşınma öncesi ve aşınma sonrası ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 4.17.'de verilmiştir.

Tablo 4.17. Aşınma deneyi öncesi ve sonrası ağırlık değişimleri

Numune	Elektriksel Kür		Isıl Kür		Geleneksel PÇ Beton	
	İlk (g)	Son (g)	İlk (g)	Son (g)	İlk (g)	Son (g)
1. Numune	751,99	748,81	745,26	742,06	805,86	803,09
2. Numune	733,96	730,45	730,85	729,57	762,53	761,33
3. Numune	736,88	733,86	742,46	738,9	754,29	751,29
Ağırlık kaybı (g)	3,24		2,68		2,32	

Deney sonuçları analiz edilerek ve her bir numunenin ağırlık kaybı not edilmiş ve her kür tipi için ortalama ağırlık kaybı verileri bulunmuş bu veriler Şekil 4.57.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.57. Betonların Böhme aşınma deneyi sonucu ağırlık kayıpları

Şekil 4.57.'de verilen bu verilere göre, geleneksel portland çimentolu betonların döküm yüzeyinin aşınmaya maruz kaldığında daha az küte kaybettiği, geopolimer betonların da ısı kütür yöntemi ile üretiminde elektriksel kütür yöntemine göre üretilen geopolimer betonlara kıyasla ortalama 0,56 g daha az aşınma kaybı yaşadığı belirlenmiştir.

4.3.6. Betonların birim hacim ağırlık, görünür porozite ve su emme özellikleri

Üretilen geopolimer ve geleneksel beton numunelerin birim hacim ağırlıkları, görünür poroziteleri ve su emme özellikleri belirlenmiş ve Tablo 4.18.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.18. Beton numunelerin doymun yüzey kuru, etüv kuru ve sudaki ağırlıkları

Malzeme	Doymun Kuru Yüzey Ağırlık (m ₁)	Arşimet Terazı Ağırlığı (m ₂)	Etüv Kuru Ağırlık (m ₃)
Geleneksel PÇ Beton	2413,6	1400,3	2307,8
	2433	1405,3	2315,2
	2408,9	1389,3	2308,8
Elektriksel Kür	2339,2	1309,7	2321,5
	2290,2	1280,2	2262,3
	2319,6	1297,9	2301,2
	2357,8	1316,2	2333,1
Isıl Kür	2344,4	1305,8	2320,1
	2329,6	1294,9	2305,9

Tablo 4.16.'da verilen ağırlık verileri değerlendirildiğinde elektriksel kür yöntemi ve ısıl kür yöntemi ile üretilen geopolimer betonlar ile geleneksel PÇ betonun birim hacim ağırlıkları, su emmeleri (%) ve görünür poroziteleri (%) hesaplanmış ve Tablo 4.19.'da sunulmuştur.

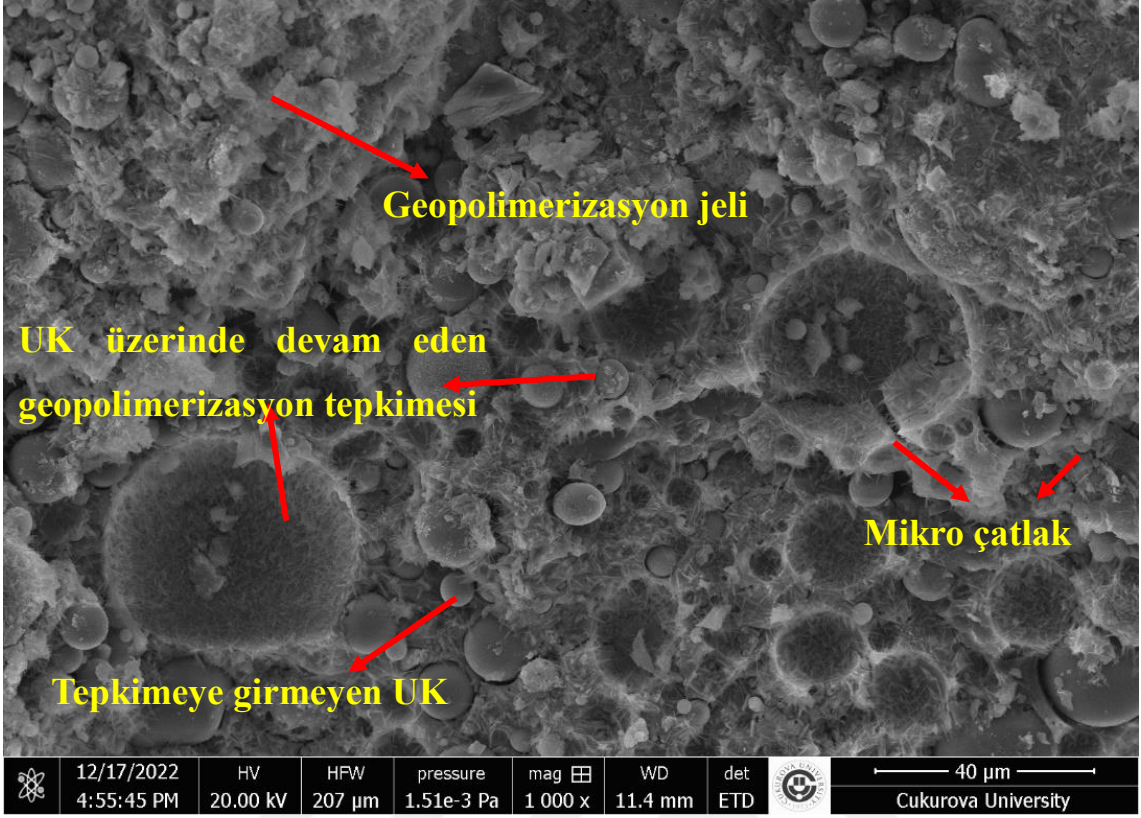
Tablo 4.19. Betonların birim hacim ağırlık, su emme (%) ve görünür porozite (%) sonuçları

Numune	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Su Emme (%)	Görünür Porozite (%)
Geleneksel PÇ Beton	2,371	4,669	10,574
Elektriksel Kür	2,266	1,131	2,530
Isıl Kür	2,257	1,045	2,334

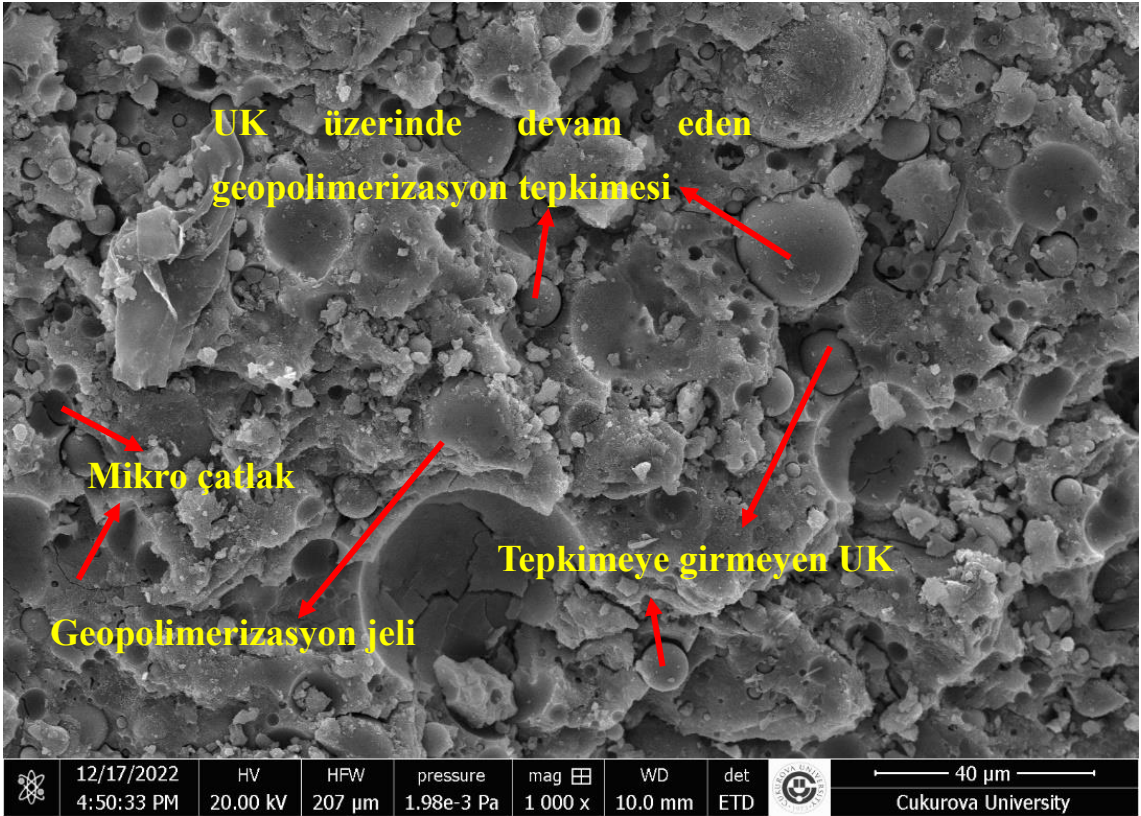
Tablo 4.19.'da verilen bulgular incelendiğinde, elektriksel kür ve ısıl kür yöntemi ile üretilen geopolimer betonların geleneksel PÇ betonlarına göre daha düşük birim hacim, daha az su emme %'sine ve daha düşük görünür poroziteye sahip olduğu söylenebilir.

4.3.7. Mikroyapı incelemesi

Tez kapsamında ısıl kür ve elektriksel kür yöntemi ile harçlar üretilmiş ve bu harçlardan elektriksel kür ve ısıl kür yönteminin kıyaslanması amacı ile benzer dayanımları verecek birer harç numunesi seçilmiştir. Seçilen harç numuneleri ile aynı özellikte ve aynı koşullarda betonlar üretilmiştir. Elektriksel kür yöntemiyle üretilen 1,4 Ms modülüne ve %10 Na₂O konsantrasyonuna sahip geopolimer ile 1,6 Ms modülüne ve %10 Na₂O konsantrasyonuna sahip geopolimer betonların SEM analizleri Çukurova Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında incelenmiş ve elde edilen 1000x görüntüler Şekil 4.58. ve Şekil 4.59.'da sunulmuştur.



Şekil 4.58. 1,4 Ms 25V-6H numunesinin 1000x SEM görüntüsü



Şekil 4.59. 1,6 Ms 100°C-6H numunesinin 1000x SEM görüntüsü

Yukarıda verilen SEM görüntüleri incelendiğinde; Elektriksel kür ile üretilen geopolimer harçta aktive olan taneciklerin daha yoğun bir bağlayıcı matris oluşturduğu ve henüz aktive olmamış küresel tanecikli yapısını koruyan uçucu kül parçacıklarında ise yüzeyden itibaren geopolimerizasyonun başladığı görülmektedir. Bu durum elektriksel kür uygulamasının alkali aktivasyon ve buna bağlı olarak yoğun bağlayıcı jel oluşturma potansiyelinin ısı kür uygulamasına göre daha etkin olduğunu göstermektedir.

4.4. Maliyet Analizi Bulguları

Tez çalışması kapsamında elektriksel kür yöntemi ile üretilen harç numunelerin maliyet analizleri yapılmış ve uygulanan gerilim, kür esnasında geopolimerden geçen akım ve bunlara bağlı tüketilen güç miktarları Ms modülüne bağlı olarak Tablo 4.20. ve Tablo 4.21.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.20. Tez çalışması kapsamında elektriksel kür yöntemi ile üretilen harçların akım – süre – güç ilişkisi

Gerilim Değeri (volt)	Numune	1,2 Ms Modülü		1,4 Ms Modülü		1,6 Ms Modülü		1,8 Ms Modülü	
		Akım	Güç	Akım	Güç	Akım	Güç	Akım	Güç
	Harç								
20	20V – 6H	0,980	19,603	1,681	33,625	1,994	39,872	2,222	44,445
	20V – 12H	0,933	18,666	1,140	22,799	1,239	24,772	1,961	39,217
25	25V – 6H	1,420	35,511	1,695	42,377	1,336	33,412	1,453	36,330
	25V – 12H	0,937	23,422	1,125	28,115	0,484	12,103	0,536	13,391
30	30V – 6H	1,314	39,429	1,270	38,087	1,780	53,391	0,735	22,036
	30V – 12H	0,633	18,977	0,399	11,979	0,538	16,134	0,226	6,789
35	35V – 6H	0,780	27,310	0,589	20,605	0,584	20,423	0,733	25,651
	35V – 12H	0,345	12,090	0,268	9,390	0,273	9,554	0,377	13,186
Gerilim Değeri (volt)	Beton	1,4 Ms Modülü							
		Akım				Güç			
25	25V – 6H	1,5066				37,665			

Tablo 4.21. Tez çalışması kapsamında elektriksel kür yöntemi ile üretilen harçların enerji sarfiyatları

Elektrik Tüketimi (6 saat ve 12 saatlik sürelerle göre kW)				
NUMUNE	1,2 Ms	1,4 Ms	1,6 Ms	1,8 Ms
20V-6H	0,1176	0,2018	0,2392	0,2667
20V-12H	0,2240	0,2736	0,2973	0,4706
25V-6H	0,2131	0,2543	0,2005	0,2180
25V-12H	0,2811	0,3374	0,1452	0,1607
30V-6H	0,2366	0,2285	0,3203	0,1322
30V-12H	0,2277	0,1437	0,1936	0,0815
35V-6H	0,1639	0,1236	0,1225	0,1539
35V-12H	0,1451	0,1127	0,1146	0,1582
Beton		1,4 Ms		
25V – 6H		0,2260		

Tablo 4.20. ve Tablo 4.21.'deki bulgular incelendiğinde tüm Ms modüllerinde ilk 6 saatlik kür uygulamasında akım değerleri hızlı bir artış göstermiş ve 6 saatten sonra genel olarak düşüşe geçmiş fakat yalnızca 6 saat elektriksel kür uygulanan bazı numunelerde de pik değere ulaşamadığı gözlenmiştir. Bu durum özellikle ilk 6 saatlik sürede geopolimerde önemli düzeyde ısınma meydana geldiğini ve yoğun bir enerji tüketiminin oluştuğunu göstermiştir. 12 saat kür uygulanan numunelerde ise genel olarak 6 saatten sonra akım eğrisi azalan bir eğri durumuna geçmiş ve enerji tüketimi daha düşük bir düzeyde devam etmiştir.

Enerji sarfiyatı konusunda ise sürenin 2 katına çıkması sebebi ile harcanan güç değerinde düşüş yaşansa da harcanan enerji miktarı artış göstermiştir. Ortalama çekilen akımın tek başına güç ile ilişkilendirilmesi doğru değildir. Örneğin; 1,2 Ms modülünde 25 volt gerilim değerinde 1,420 amper ile en fazla ortalama akım çekilmiş ve bu değer pik nokta yapmıştır. Bu noktada 35,511 Watt güç harcanırken 30 volt gerilim değerinde 1,314 gibi daha düşük akım değerinde 39,429 Watt ile daha fazla güç harcanmıştır.

Aynı doğrultuda 20 volt gerilim değerinin 6 saat uygulandığı ve 35,511 watt güç harcanarak üretilen 1,2 Ms harç numunesinin 1 saatlik enerji sarfiyatı 0,2131 kW.h iken 6 saat boyunca 30 volt gerilim uygulanarak üretilen 1,2 Ms harç numunesinin 1 saatlik enerji sarfiyatı da 0,2366 kW.h olarak hesaplanmıştır. Gerilim değerleri ve süreler sabitlendiğinde; numune içerisinden geçen akımın artması güç ve enerji sarfiyatını artırmaktadır.

Tez çalışmasının beton üretimi aşamasında da seçilen 1,4 Ms 25V – 6H numunesinin üretilmesi sırasında da beton numune içerisinden 1,5066 ortalama akım geçmiş ve 37,665 Watt'lık bir güç harcanmıştır. 6 saat boyunca toplamda 0,22599 kW.h enerji sarfiyatı oluşturmuştur.

Ayrıca Şekil 3.29. ve Tablo 4.21. birlikte değerlendirilerek; tez çalışmasında üretilen harç numunelerden üretim esnasında en fazla enerji harcayan numune, en az enerji harcayan numune, en iyi dayanımı veren numune ve beton üretimi için seçilen harç dayanımını veren numune için enerji maliyetleri sanayi tipi elektrik birim fiyatları dikkate alınarak Asya, Avrupa, Amerika'da bulunan farklı ülkelere göre hesaplanmış ve hesaplanan maliyetler Tablo 4.22.'de sunulmuştur.

Tablo 4.22. Belirli harçların seçilen ülkeler bazında maliyetleri (\$)

Elektrik Birim Maliyetler (\$)								
Seçilen Numuneler	Enerji Tüketimi (kW)	Kanada	Amerika	Fransa	Almanya	Türkiye	Rusya	Çin
		0,094	0,128	0,183	0,339	0,115	0,109	0,091
Birim Maliyetlere Göre Hesaplanan Elektrik Kullanım Bedelleri								
En fazla enerji harcayan (1,8 Ms 20V-12H)	0,4706	0,044236	0,060237	0,08612	0,159533	0,054119	0,051295	0,042825
En az enerji harcayan (1,8 Ms 30V-12H)	0,0815	0,007661	0,010432	0,014915	0,027629	0,009373	0,008884	0,007417
En iyi dayanımı veren (1,2 Ms 25V-12H)	0,2811	0,026423	0,035981	0,051441	0,095293	0,032327	0,03064	0,02558
Beton üretimi için seçilen harç dayanımını veren (1,4 Ms 25V-6H)	0,2543	0,023904	0,03255	0,046537	0,086208	0,029245	0,027719	0,023141
Beton (1,4 Ms 25V-6H)	0,2260	0,021244	0,028928	0,041358	0,076614	0,02599	0,024634	0,020566

Tablo 4.22.'de görüldüğü gibi harç – beton üretiminde elektriksel kür enerji tüketiminin 0,339 kw/h ile en yüksek olduğu Almanya'da en fazla enerji harcanan harç numunesinin üretim maliyeti 0,1595 \$ olarak bulunmuştur. En iyi basınç dayanımını veren harç numunesinin ise yine Almanya'da 0,0953\$ elektrik maliyetine denk geldiği belirlenmiştir.

Isıl kür yöntemi ile üretilen geopolimer betonlarda da etüvün harcadığı ortalama güç değeri Şekil 4.60.'da gösterilen wattmetre ile bulunmuş ve ısıl kür sarfiyatı bu değer üzerinden hesaplanmıştır.



Şekil 4.60. Etüvün harcadığı elektrik maliyeti hesabında kullanılan wattmetre

Şekil 4.60.'daki wattmetre yardımı ile okunan değer dikkate alınarak ısıl kür ile üretilen geopolimer beton için hesaplanan enerji sarfiyatı Tablo 4.23.'teki verilmiştir.

Tablo 4.23. Isıl kür ile üretilen geopolimerin gerektirdiği güç (kW)

Beton	Güç (kW.h)	6 saatte harcanan güç (ortalama kW)
100°C – 6H	0,255315	1,53189

Üretilen geopolimer betonlarda ısıl kür ve elektriksel kür sonucunda harcanan enerji maliyetleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve sonuçlar Tablo 4.24.'te verilmiştir.

Tablo 4.24. Isıl kür ve elektriksel kür enerji kıyaslama tablosu (kW)

Üretilen beton ve elde edilen dayanım değeri (MPa)	Kür Tipi	Üretim boyunca (6 saatte) harcanan güç (kW.h)
1,6 Ms 100°C – 6H (27,42)	Isıl kür	1,53189
1,4 Ms 25V – 6H (29,11)	Elektriksel kür	0,2260

Tablo 4.24.’teki sonuçlar değerlendirildiğinde elektriksel kür yöntemi ile 6 saatte üretilen geopolimer beton toplamda 0,2260 kW elektrik tüketirken, ısıl kür yöntemi ile üretilen beton 6 saatlik ısıtma sonucunda toplamda 1,53189 kW elektrik tüketmiştir. Bu bulgulara göre ısıl kür uygulaması, elektriksel kür uygulamasının yaklaşık olarak 6,778 katı daha fazla enerji sarfiyatına sebep olmuştur. Elde edilen bu sonuç, bu çalışma özelinde elektriksel kürün daha az maliyetli olduğunu gösterse de ısıl kür için etüve yalnızca bir set numune konulduğu ve etüvün tamamen dolu olması/etüv büyüklüğüne göre etüvün ısınma süresi vb. verimlilik parametrelerinin de hesaplama girmesi ile değişebilecek ve kapsamlı bir şekilde tartışılması gereken bir durumdur. Çalışmada gerçekleştirilen maliyet analizi yalnızca başlangıç düzeyde bir analiz olup, geopolimer betonlarda enerji sarfiyatının çok parametreliliği bir konu olduğunu ve kapsamlı bir şekilde araştırılması gerektiğini göstermiştir.

5. SONUÇLAR

Ön deneyler ile belirlenen deney parametrelerine ait sonuçlar;

- Geopolimer harç ve beton dökümü için hazırlanan çözeltilerde, Na₂O oranı sabit tutulup Ms modülü artırıldığında aktivatör çözeltisinin sıcaklık değeri düşmekte, Ms modülü sabit tutulup Na₂O oranı artırıldığında ise aktivatör çözeltisinin sıcaklık değeri artmaktadır. Buna göre sodyum silikat içerisinde çözünen sodyum hidroksit miktarındaki artışın aktivatör tepkime sıcaklığında artışa neden olduğu söylenebilir.
- Isıl kürede sıcaklık artışı geopolimer harçlarda basınç dayanımını arttırmaktadır. 100 dereceden sonra ise basınç dayanımında düşüş meydana gelmektedir. Bu durumu hem bu çalışmadaki SEM görüntüleri hem de literatür bilgileri desteklemektedir.
- Karışım dizaynında Ms modülü arttıkça toplam hacimde kullanılan kuru karışım miktarı azalmakta ve aktivatör miktarı da artmaktadır. Aynı durum sabit Ms Modülünde artan Na₂O konsantrasyonu için de geçerlidir. Bu bulgular, agrega – UK kuru karışımındaki azalma ve karışıma giren sıvı çözelti miktarındaki artış nedeniyle işlenebilirliğin belirgin bir şekilde arttığını ortaya koymaktadır. Geopolimer harçlarda yayılma çapını etkileyen en temel etkenin aktivatör çözeltisindeki Na₂O konsantrasyonu olduğu tespit edilmiş ve %6 Na₂O konsantrasyonuna sahip harçlarla, bu çalışmada kullanılan sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılması durumunda, sahada uygulanabilir ve kalıplara dökülebilir nitelikte plastik kıvamda geopolimer betonun üretilmesinin mümkün olmadığı belirlenmiştir. Genel olarak işlenebilirlik üzerinde aktivatör çözeltisindeki Na₂O konsantrasyonunun çok etken olduğu belirlenmiş olsa da Ms modülünün 1.1'den düşük alındığında da, bu çalışmada kullanılan sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılması durumunda, sahada uygulanabilir ve kalıplara dökülebilir nitelikte plastik kıvamda geopolimer betonun üretilmesinin çok zorlayıcı olacağı sonucuna varılmıştır.

- Bu çalışmada başlangıç gerilim değeri olarak seçilen 10 volt gerilim uygulaması numune iç sıcaklığında belirgin bir artışa neden olmamış ve gerilim uygulanma süresinden bağımsız olarak harçların ölçülen iç sıcaklığı basınç dayanımını etkileyecek düzeyde bir değişim göstermemiştir. Sonuç olarak, çalışmada 100x100x100 mm boyutlarında kalıp kullanılarak deneylerin gerçekleştirildiği dikkate alınacak olursa, boyutları bu ölçülerden daha büyük numunelerle çalışılması durumunda 10 volt gerilim uygulamasının harç içerisinde sıcaklık artışına neden olacak düzeyde iyon hareketliliği oluşturamayacağı ve geopolimerde basınç dayanımını elde edilmesinin zor olduğu söylenebilir. 20 volt gerilim uygulaması, 10 volt gerilimden farklı olarak geopolimer yapıda efektif akım iletimine ve buna bağlı olarak numune iç sıcaklık artışına katkıda bulunmuştur. Aynı durum 25, 30, 35 ve 40 volt gerilim değerleri için de benzerlik göstermiştir.

Geopolimer harç deneylerine ait sonuçlar

- Ön deneyler sonrasında daraltılmış parametrelere göre, 20 V ve üzerinde bir gerilim uygulandığında, numune içerisinden geçen akım – numune iç sıcaklığı – uygulanan gerilim değeri ve süre ilişkisi dikkate alınacak olursa; artan gerilim değerleri ile birlikte numuneler içerisinden geçen maksimum akım değerlerinin ve numune iç sıcaklık değerlerinin artış gösterdiği fakat maksimum akım ve maksimum iç sıcaklık değerlerine ulaşılan sürelerin de kısaldığı yani artan gerilim ile numunelerin daha erken maksimum akım çektiği ve daha çabuk ısındığı sonucuna varılmıştır.
- Uygulanan gerilim – beton sıcaklığı ilişkisine göre, çalışma kapsamında kullanılan kalıp ve malzemeler ile üretilen geopolimer harçlarda, 20, 25, 30 ve 35 volt gerilimin uygulanabilir olduğu ve en iyi basınç dayanım değerlerinin 25 volt ile üretilen numunelerde elde edildiği ve bu gerilimde 6 saat uygulamanın yeterli olduğu belirlenmiştir.
- Elektriksel kür uygulamasında, numune içerisinden geçen maksimum akım ve numune iç sıcaklık değerlerinin Ms modülüne ve uygulanan gerilim değerine bağlı olarak ulaştığı süre geopolimer harç numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilemektedir. Yüksek gerilim ve yüksek Ms modülünde pik değerlere hızlı bir şekilde

ulaşılması fakat hem mekanik hem de fiziksel anlamda tatmin edici bir sonuçla karşılaşılmamıştır. Sonuç olarak, uygulanan gerilim değerinin, numunenin etkili bir şekilde ısınmasını sağlayabilmesinin yanı sıra numune içerisinde ani katı hale geçişe sebep olmayacak şekilde seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

- Isıl kür uygulanarak üretilen harçlar ile ilgili sonuçlar özetlenecek olursa; Ms modülünden bağımsız olarak tüm numunelerin basınç dayanımları 100°C'ye kadar artış göstermiş ve bu noktadan sonra düşüşe geçmiştir. Ayrıca artan Ms modüllerinde de sıcaklıktan bağımsız olarak sürekli bir düşüş gözlemlenmiştir.

Geopolimer beton ve geleneksel beton deneylerine ait sonuçlar;

- Elektriksel kür uygulamasında 6 saat boyunca 25 volt gerilim ile üretilen 1,4 Ms modülündeki geopolimer betonlardan ortalama 29,11 MPa, 6 saat boyunca 100 °C etüvde kürlenerek üretilen 1,6 Ms modülündeki geopolimer betonlarda ise ortalama 27,42 MPa basınç dayanımı değerlerine ulaşılabilirdiği belirlenmiştir. Referans olarak seçilen beton karışımlarının harç dayanımları ile arasında ortalama 1.5 MPa dayanım farkı olduğu dikkate alınacak olursa, harç sonuçlarına göre elektriksel kürde 12 saat boyunca 25 V gerilim ve 1.2 Ms modülü kullanılarak ortalama en yüksek 44 ± 2 MPa dayanıma sahip beton üretilmesinin mümkün olabileceği söylenebilir.
- Kılcallık sonuçlarına göre benzer dayanıma sahip betonlarda ısıl kür ile üretilen geopolimer betonun en düşük ve geleneksel portland çimentolu betonun ise en yüksek kılcallık katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Elektriksel kür ile üretilen geopolimer betonlarda ise ısıl kür ile üretilen geopolimer betonlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ultrases geçiş hızı deney sonuçlarına göre, üretilen tüm betonlarda iyi özelliklere sahip bir iç yapı elde edilebildiği söylenebilir. Aşınma deney sonuçlarına göre, aşınma direnci en yüksek geleneksel beton ve en düşük elektriksel kür ile üretilen beton olduğu belirlenmiştir.
- Ultrases geçiş hızı ve aşınma dayanımı ile kılcallık deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, kılcallık deney sonuçlarının diğer deney sonuçlarını tam olarak

desteklemediği görülmüştür. Bu durum, geopolimerizasyon ile oluşan matris ile çimentolu matrisin arasında sertlik bakımından bir fiziksel farklılık olabileceğini işaret etmektedir ve bu konunun araştırılması gerektiği görülmüştür.

- Mikro yapı incelemesi için gerçekleştirilen SEM görüntüsü analizine göre, elektriksel kür ile üretilen geopolimer harçta aktive olan taneciklerin daha yoğun bir bağlayıcı matris oluşturduğu ve henüz aktive olmamış küresel tanecikli yapısını koruyan uçucu kül parçacıklarında ise yüzeyden itibaren geopolimerizasyonun başladığı görülmüştür. Bu durum elektriksel kür uygulamasının alkali aktivasyon ve buna bağlı olarak yoğun bağlayıcı jel oluşturma potansiyeli açısından ısı kür uygulamasına göre daha etkin olduğunu ortaya koymuştur.

Maliyet Analizi Sonuçları

- Isıl kür yöntemi ile üretilen geopolimer betonun, elektriksel kür yöntemi ile üretilen ve benzer dayanımdaki geopolimer betondan 6,778 kat daha fazla enerji sarfiyatı oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Sanayi için güncel elektrik birim maliyetleri dikkate alınarak yapılan enerji tüketim analizine göre, elektriksel kür uygulanarak Kanada, Amerika, Fransa, Almanya, Türkiye, Rusya ve Çin gibi ülkelerin tamamında ısı kürüne göre daha az maliyetle istenen dayanımda geopolimer betonların üretiminin mümkün olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuç, gerçekleştirilen bu tez çalışması özelinde elektriksel kürün daha az maliyetli olduğunu gösterse de verimlilik açısından bu konuyu daha net bir şekilde ortaya koymak için daha detaylı araştırmalar gerekmektedir çünkü bu çalışmada ısı kür için etüve yalnızca bir set numune konulmuş ve etüvün tamamen dolu olması durumu ya da etüv büyüklüğüne göre etüvün ısınma süresi gibi verimlilik parametreleri çalışmada dikkate alınmamıştır. Gerçekleştirilen bu maliyet analizi yalnızca başlangıç düzeyde bir analiz olarak değerlendirilerek ısı kür ve elektriksel kür için harcanan enerji miktarları ve ortaya çıkacak maliyetler çok parametrelilik olarak araştırılması gereken bir konudur. Gerçekleştirilecek çok parametrelilik araştırmaları, sürdürülebilirlik açısından önemli bir malzeme olarak kabul edilen geopolimer betonların bu çalışmadaki elektriksel kür yaklaşımı ile daha düşük enerji sarfiyatıyla üretilebilme potansiyelini ortaya koyacak ve bu malzemelerin Avrupa Birliği Yeşil Mutabakat Kapsamı ile TÜBİTAK öncelikli AR-GE konuları arasında yer alan Enerji

Verimliliği Sağlayan Y¼ksek Performanslı Yenilikçi Malzemeler sınıfına giren bir malzeme olarak tanımlanıp tanımlanamayacağını daha net bir şekilde literat¼re sunacaktır.



6. ÖNERİLER

Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilek bulgular, tez süresinde gerçekleştirilen gözlemler ve maliyet analizi çalışması sonucunda bundan sonra gerçekleştirilecek çalışmalar için şu öneriler yapılabilir;

- Her iki kür yöntemi ile üretilen harçlarda ısı artışına bağlı olarak harç numune yüzeylerinde belirginleşen hacimsel şişme meydana gelmektedir. Bu konunun kimyasal ve fiziksel bağlantısının araştırılması faydalı olacaktır.
- Geopolimer üretiminde ısı k r ve elektriksel k r enerji t kretim maliyetlerinin ısı k rdeki verimlilik parametreleri de dahil edilerek kapsamlı bir deneysel çalışma ile ortaya konulması ve karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi literatüre önemli katkılar sunabilecektir.
- Geopolimer karışım dizaynına giren malzemelerin harç/beton içerisindeki iletkenlik davranışına etkisi elektriksel k r uygulaması için çok önemli görünmektedir ve bu konuda disiplinlerarası bir deneysel çalışmanın çok faydalı olabileceği söylenebilir.

KAYNAKÇA

- [1] K. Humphreys and M. Mahasanen, "Toward a Sustainable Cement Industry. Substudy 8: Climate Change," World Business Council for Sustainable Development , 2002, 92pp.
- [2] Murmu, Anant Lal; Jain, Anamika; Patel, A. (2019). Mechanical Properties of Alkali Activated Fly Ash Geopolymer Stabilized Expansive Clay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, doi:10.1007/s12205-019-2251-z
- [3] Charkhtab Moghaddam, S., Madandoust, R., Jamshidi, M., & Nikbin, I. M. (2021). Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions. *Construction and Building Materials*, 281, 122571. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122571
- [4] Choate, W. T. (2003). Energy and emission reduction opportunities for the cement industry. Report: Industrial Technological Program, Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy, USA.
- [5] Davidovits, J. (1994). High-alkali cements for 21st century concretes. *ACI Special Publication*, 144, 383–398.
- [6] Malhotra, V. M. (1999). Making concrete "Greener" with fly ash. *Concrete International*, 21 (5), 61–66.
- [7] Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. In *Annual Review of Energy and Environment* (pp. 303–329), 26 Nov.
- [8] Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1489–1498. doi:10.1016/j.cemconres.2004.01.021
- [9] Berner, R. A., & Lasaga, A. C. (1989). Modeling the Geochemical Carbon Cycle. *Scientific American*, 260(3), 74–81.
- [10] İnternet Kaynağı, <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/laying-the-foundation-for-zero-carbon-cement>, Erişim Tarihi: 27.10.2022, 11:26
- [11] İnternet Kaynağı, PBL, Netherlands Environmental Assessment Agency, <https://cmte.ieee.org/futuredirections/2021/07/23/concrete-action-for-climate/> Erişim tarihi: 12.12.2022, 23:58

- [12] Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011)., "Sustainable cement production—present and future". *Cement and Concrete Research*, 41(7), 642–650. doi:10.1016/j.cemconres.2011.03.019
- [13] Pavithra, P. E., Reddy, M. S., Dinakar, P., Rao, B. H., Satpathy, B. K., & Mohanty, A. N. (2016). A mix design procedure for geopolymer concrete with fly ash. *Journal of cleaner production*, 133, 117-125
- [14] Kapkaç, F.,2012. Çimento Çeşitleri, Özellikleri, Hammaddeleri ve Üretim Aşamaları, Maden Teknik Arama Genel Müdürlüğü, Maden Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı, 223-232, Ankara
- [15] Koçak, Y., 2011. Termik Santral Atığı Uçucu Külün Portland Çimentosu Özelliklerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 2:135-140.
- [16] Roy, D., 1999. Sulfoaluminate-Belite Cement From Low-Calcium Fly Ash and Sulfur-Rich and Other Industrial by-Products, *Cement and Concrete Research*, 29(8):1305-1311
- [17] Görür, E., B., “Alkali ile Aktifleştirilmiş Uçucu Kül Geopolimer Betonun Dayanım ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2015
- [18] Aruntaş, H.Y., 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Betonda Kullanım Potansiyeli. Gazi Üniversitesi, Ankara, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21 (1).
- [19] Shi, C., Krivenko, P. V., Roy, D. (2006), *Alkali-Activated Cements and Concretes*.CRC Press, London, UK, 392 p. <https://doi.org/10.1201/9781482266900>
- [20] Thokchom, S., Ghosh, P., Ghosh, S. (2009), Effect of Na₂O Content on Durability of Geopolymer Mortars in Sulphuric Acid, *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 3, (3), 193-198.
- [21] Fu, Y., Cai, L., Wu, Y. (2011), Freeze-thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete, *Construction and Building Materials*, 25, 3144-3148.
- [22] McLellan B.C., Williams R.P., Lay J., Riessen A.V., Corder G.D. (2011). Costs and Carbon Emissions For Geopolymer Pastes in Comparison to Ordinary Portland Cement. *Journal of Cleaner Production*, 19, 1080-1090.
- [23] Baradan, B., Yazıcı, H., ve Aydın, S. (2012), Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No. 334, İzmir, 428.

- [24] Aydın, S., 2010. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcı Lifli Kompozit Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir
- [25] Chithambar Ganesh, N. Deepak, V. Deepak, Sidhu Ajay, Arun Pandian, Karthik, "Utilization of PET bottles and plastic granules in geopolymer concrete", *Materials Today: Proceedings*, Volume 42, Part 2, 2021, Pages 444-449, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.170>.
- [26] Komnitsas, K., & Zaharaki, D. (2007). Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. *Minerals Engineering*, 20(14), 1261–1277. doi:10.1016/j.mineng.2007.07.011
- [27] Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, F. Pachecho-Torgal, L.A. Labrincha, C. Leonelli, "An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders", *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars, And Concretes* (2015), pp. 19-47
- [28] J. Davidovits June. Chemistry of geopolymeric systems, terminology *Geopolymer* (Vol., 99 (292) (1999), pp. 9-39
- [29] S.K. Das, S. Shrivastava A study on the viability of fly ash and construction and demolition waste as geopolymerized masonry mortar and their comparative analysis *Mater. Today Proc.*, 32 (2020), pp. 574583, 10.1016/j.matpr.2020.02.402
- [30] Davidovits J (2011) *Geopolymer Chemistry and Applications*, 3rd edn. Institute Geopolymer, Saint-Quentin, p 612
- [31] P. Duxon , A. Fernández-Jiménez , JL Provis , GC Lukey , A. Palomo ve JSJ Deventer, " Geopolymer Technology : The Current State of the Art ", *J. Mater. Sci.*, 42 [9] 2917-33 (2007).
- [32] Davidovits, J. (1988, June). Soft mineralogy and geopolymers. In *Proceedings of the geopolymer 88 international conference. the Universite de Technologie Compiengne, France.*
- [33] J. Davidovits *Geopolymer Chemistry and Applications* (2nd Ed.), Geopolymer Institute (2008)
- [34] Krishna, R. S., Mishra, J., Zribi, M., Adeniyi, F., Saha, S., Baklouti, S., Gökçe, H. S. (2021). A review on developments of environmentally friendly geopolymer technology. *Materialia*, 20, 101212. doi:10.1016/j.mtla.2021.101212

- [35] Luan, C., Shi, X., Zhang, K., Utashev, N., Yang, F., Dai, J., & Wang, Q. (2020). A mix design method of fly ash geopolymer concrete based on factors analysis. *Construction and Building Materials*, 121612. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121612
- [36] F. Pacheco-Torgal, J.A. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, P. Chindapasirt, *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, 2014. DOI:10.1016/C2013-0-16511-7.
- [37] Zhang, X., Bai, C., Qiao, Y., Wang, X., Jia, D., Li, H., & Colombo, P. (2021). Porous geopolymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 150, 106629. doi:10.1016/j.compositesa.2021.106629
- [38] İnternet Kaynağı: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/90e79218-778d-4e8b-b4c0-9ae4f62dd60b-65289fb2/relevance/1>, Erişim Tarihi 12.12.2022 23:20
- [39] İnternet Kaynağı: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/analyze-results/90e79218-778d-4e8b-b4c0-9ae4f62dd60b-65289fb2>, Erişim Tarihi 12.12.2022 23:20
- [40] İnternet Kaynağı: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/analyze-results/90e79218-778d-4e8b-b4c0-9ae4f62dd60b-65289fb2> Erişim Tarihi 12.12.2022 23:20
- [41] U. Özcan ve S. Güngör , "Sürdürülebilir Bir Yöntem / Betonda Puzolan Kullanımı", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, sayı. 15, ss. 176-182, Mar. 2019, doi:10.31590/ejosat.517346
- [42] Prinsse, S., (2017), *Alkali-Activated Concrete: Development of Material Properties (Strength and Stiffness) and Flexural Behaviour of Reinforced Beams Over Time*, Yüksek Lisans Tezi
- [43] Palomo, A.; Krivenko, P.; Garcia-Lodeiro, I.; Kavalerova, E.; Maltseva, O.; Fernández-Jiménez, A. (2014) A review on alkaline activation: new analytical perspectives. *Mater. Construcc.* 64 [315], e022 <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.00314>.
- [44] Palomo, M.W. Grutzeck, M.T. Blanco, "Alkali-activated fly ashes - a cement for the future", *Cem. Concr. Res.*, 29 (8) (1999), pp. 1323-1329
- [45] Fernández-Jiménez, A. Palomo. (2009). "Nanostructure/microstructure of fly ash geopolymers". eduardo Torroja institute, Spain.

- [46] Phummiphan, I., Horpibulsuk, S., Sukmak, P., Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A., and Shen, S. (2016). "Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer." *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 629, No. January, pp. 1-15, DOI: 10.1080/14680629.2015.1132632.
- [47] Xu, H. and Van Deventer, J. S. J. (2000). "The geopolymerisation of aluminosilicate minerals." *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 59, No. 3, pp. 247-266, DOI: 10.1016/S0301-7516(99)00074-5.
- [48] Cioffi, R., Maffucci, L., & Santoro, L. (2003). Optimization of geopolymer synthesis by calcination and polycondensation of a kaolinitic residue. *Resources, Conservation and Recycling*, 40(1), 27–38. doi:10.1016/s0921-3449(03)00023-5, doi:10.1016/S0921-3449(03)00023-5
- [49] Fang, Y.; Wang, A.; He, K.; Pan, H.; Liao, J.; Ding, Z.; Xing, F.; Le, H.; Wang, X. Property evolution of geopolymer composites with SiC whiskers loaded with BN coating at elevated temperatures. *Constr. Build. Mater.* 2021, 309, 125130.
- [50] Ş., Osman, (2019), "Geopolimer Betonlarda Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması", (Yüksek Lisans Tezi)
- [51] Zeybek, O. (2009). Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- [52] Davidovits, J. Geopolymer Chemistry and Properties. Paper presented at the Geopolymer '88, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France.
- [53] Wallah, S.E. and Rangan, B.V. 2006. Low-Calcium fly ash-based geopolymer concrete: Long-term properties. Curtin University of Technology.
- [54] A., Evren, (2015), "Geopolimer Elde Edilmesi ve Katyon, Ph ve Isıl İşlemin Geopolimer Üzerine Etkisi" (Doktora Tezi)
- [55] Liew, Y.M.; Heah, C.Y.; Kamarudin, H. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Prog. Mater. Sci.* 2016, 83, 595–629.
- [56] Zhuang, X.Y.; Chen, L.; Komarneni, S.; Zhou, C.H.; Tong, D.S.; Yang, H.M.; Yu, W.H.; Wang, H. Fly ash-based geopolymer: Clean production, properties and applications. *J. Clean. Prod.* 2016, 125, 253–267.
- [57] Yuan, J., He, P., Jia, D., Yang, C., Zhang, Y., Yan, S., Yang, Z., Duan, X., Wang, S., Zhou, Y. (2016). Effect of curing temperature and SiO₂/K₂O molar ratio on the performance of metakaolin-based geopolymers. *Ceramics International*. 42, 16184-16190.

- [58] Davidovits, J., 2008. They Built the Pyramids. Published by Institute Geopolymer, Saint Quentin, France.
- [59] Ekinci, E. & Türkmen, İ., “Farklı aktivatör ve ham madde değişkenlerinin geopolimer hamurun basınç dayanımına etkisinin incelenmesi”. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (24), 169- 175)
- [60] (Kaya, M. (2016). Farklı tür uçucu küller kullanılarak üretilen alkali aktive edilmiş harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi, (Doktora Tezi), Sakarya Üniversitesi,)
- [61] Temuujin, J., Williams, R. P., & van Riessen, A. (2009). Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(12-13), 5276–5280.
- [62] M. Criado, A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, “Alkali activation of fly ashes. Part 1: effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products”, *Fuel*, 84 (16) (2005), pp. 2048-2054
- [63] A.D. Hounsi, G.L. Lecomte-Nana, G. Djétéli, P. Blanchart, “Kaolin-based geopolymers: effect of mechanical activation and curing process”, *Constr. Build. Mater.*, 42 (0) (2013), pp. 105-113
- [64] M.T. Muhammad Faheem, A.M. Mustafa Al Bakri, H. Kamarudin, C.M. Ruzaidi, A.M. Izzat, “The relationship of Na₂SiO₃/NaOH ratio, kaolin/alkaline activator ratio and sand/kaolin ratio to the strength of kaolin-based non load bearing geopolymer brick”, *Int. Rev. Mech. Eng.*, 7 (1) (2013), pp. 161-166
- [65] Atış , O. A. A. Ali , U. Durak , S. İlkentapar ve O. Karahan , "Strength Development of Heat Cured and Ambient Cured Sodium Hydroxide Activated Fly Ash Based Geopolymer", *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 9, sayı. 2, ss. 79-88, Ara. 2020
- [66] S. Çelikten ve İ. İ. Atabey, "Su içeriği ve ısıtılma süresinin atık bazalt tozu esaslı geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi", *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 10, sayı. 1, ss. 328-332, Oca. 2021, doi:10.28948/ngumuh.836998
- [67] Dadsetan, S., Siad, H., Lachemi, M., & Sahmaran, M. (2019). Construction and Demolition Waste in Geopolymer Concrete Technology: A review. *Magazine of Concrete Research*, 1–68. doi:10.1680/jmacr.18.00307

- [68] Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., & Duxon, P. (2012). Technical and commercial progress in the adoption of geopolimer cement. *Minerals Engineering*, 29, 89–104.
- [69] Y. Zhu, M.A. Longhi, A. Wang, D. Hou, H. Wang, Z. Zhang, “Alkali leaching features of 3-year-old alkali activated fly ash-slag-silica fume: for a better understanding of stability”, *Compos B Eng*, 230 (2022), Article 109469
- [70] K., Kutluhan, (2022), “Geopolimer Bağlayıcı ve Mikro Fiber Donatı ile Stabilize Edilen Yüksek Plastisiteli Silt Zeminin Mekanik Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Bayburt Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
- [71] İnternet Kaynağı: <https://insapedia.com/geopolimer-nedir-geopolimer-beton-ve-malzeme-cesitleri/#:~:text=Geopolimer%20ismi%20ilk%20olarak%201978,yollar%20ile%20laboratuvarlarda%20C3%BCretilebilece%C4%9Fini%20g%C3%B6stermi%C5%9Ftir> Erişim tarihi: 09.11.2022, 16:50
- [72] H. Ilcan, O. Sahin, A. Kul, G. Yildirim, M. Sahmaran, “Rheological properties and compressive strength of construction and demolition waste-based geopolimer mortars for 3D-Printing”, *Constr. Build. Mater.*, 328 (2022), Article 127114
- [73] Kılınçaslan, H. (2022), “Farklı Tip Agregaların Silis Dumanı Katkılı Uçucu Kül ile Üretilen Geopolimer Harçlarda Yüksek Sıcaklık Direnci Üzerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yozgat
- [74] İnternet Kaynağı: <https://www.renca.org/products> Erişim Tarihi: 23/12/2022,
- [75] İnternet Kaynağı: <http://structpedia.com/ucucu-kul-ve-avantajlari/> Erişim Tarihi: 18/09/2022,
- [76] İnternet Kaynağı: <https://www.thbbakademi.org/ucucu-kul-bazli-jeopolimer-beton/> Erişim Tarihi: 18/09/2022
- [77] Assi, L. N., Carter, K., Deaver, E., & Ziehl, P. (2020). Review of availability of source materials for geopolimer/sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, 121477. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121477
- [78] İnternet Kaynağı: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Termik-Santral-Su,-Atiksu-ve-Atik--Istatistikleri-2018-30674> Erişim Tarihi: 18/09/2021
- [79] Hycnar, J. (1983). Reducing harmful influence of power stations on the natural environmental by the utilization of fly ashes and slags. UNEP/USSR, Donetok.

- [80] G. Güler, E. Güler, Ü. İpekoğlu, H. Mordoğan, “Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları”, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2Q05. İzmir. Türkiye, 09-12 Haziran 2005,
- [81] B., V., Reiner, D., Lübeck, Praxiserfahrungen mit elektrischen Abscheidern für Holzfeuerungen ab 200 kW. 9. Holzenergie-Symposium CH-Zürich, 20. Oktober 2006
- [82] ASTM C618: Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standarts, No.4, 1998.
- [83] TS EN 197-1: Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Mart 2002.
- [84] TS 639: Uçucu Küller, Türk Standartları Enstitüsü, Nisan 1998.
- [85] Türker. P., Erdoğan. B., Katnaş. F., Yeğinoğlu. A., “Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri” TÇMB / AR-GE / Y03.03., Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Temmuz 2009, Ankara
- [86] Aruntaş, H. (2013). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21 (1) , 193-204.
- [87] Gültekin, A. B., (2010). The Investigation of Fly Ash Usage in Terms of Environmental and Social Effects In Construction Sector . International Sustainable Buildings Symposium – ISBS (pp.59-64). Ankara, Turkey
- [88] Baradan, S.A., Yazıcı, H., 2012. Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları. İzmir.
- [89] Y.H.M. Amran, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, M. El-Zeadani, "Temiz üretim ve geopolimer betonun özellikleri; Bir inceleme", J Clean Prod, 251 (2020), Madde 119679
- [90] S.A. Bernal, J.L. Provis, R.J. Myers, R. San Nicolas, van Deventer Jsj, “Role of carbonates in the chemical evolution of sodium carbonate-activated slag binders”, Mater Struct, 48 (3) (2014), pp. 517-529
- [91] Jimenez, A. F., Palomo, J.G., Puertas, F. (1999) Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour. Cement and Concrete Research. 29, 1313- 1321.
- [92] Y., Aslan. (2010). Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürüflu Harçların Özellikleri (Yüksek Lisans Tezi)
- [93] İnternet Kaynağı: <https://www.ozkimsan.com.tr/sodyum-silikat-nedir/>, Erişim Tarihi: 14.11.2022, 14:22

- [94] İnternet Kaynağı: <http://www.sodyumsilikat.com/>, Erişim Tarihi: 14.11.2022, 15:02
- [95] İnternet Kaynağı: <http://www.askimya.com/urunler/sodyum-hidroksit-177.html>, Erişim Tarihi: 14.11.2022, 15:18
- [96] İnternet Kaynağı: <https://www.kimyaborsasi.com.tr/tr/s/sodyum-hidroksit-payet-iran-137.html>, Erişim Tarihi: 14.11.2022, 15:32
- [97] Özkul H., Uyan, M., Akakın, T., Yıldız, N., Uçar, S., (2006), Beton Üretiminde Temel Bilgiler, Agregalar (11-14), THBB Yayınları, İstanbul
- [98] Gültekin, A., (2022), "Farklı Mineral Malzemelerle Geopolimer Kompozit Yapı Malzemesi Geliştirilmesi" Doktora Tezi
- [99] Uygunoğlu, T. and O. Ünal (2007). "Buhar Kürü Uygulanmış Pomzalı Hafif Betonun Özellikleri." Politeknik Dergisi 10(1).
- [100] A.M. Zeyad, B.A. Tayeh, A. Adesina, A.R. de Azevedo, M. Amin, M. Hadzima-Nyarko, I.S. Agwa, Review on effect of steam curing on behavior of concrete, Clean.Mater. 3 (2022), 100042.
- [101] İnternet Kaynağı: <https://volkanatabey.com.tr/kurleme-yontemleri-ve-beton-uzerinde-uygulanabilirliigi/> Erişim tarihi: 10.11.2022, 11:56
- [102] İnternet Kaynağı: <https://cimsa.com.tr/formulhane/gri-cimento/prefabrik-imalati-prefabrik-yapi-elemanlari-imalatinda-buhar-kuru-nasil-uygulanir/> Erişim tarihi: 10.11.2022, 12:25
- [103] Beglarigalea, A., Yalçınkaya, Ç., Yazıcı H., "Otoklav Kürlü Reaktif Pudra Betonu: Mikro Çelik Lif Hacmi ve Silika Dumanı Dozajının Mekanik Özelliklere Etkisi", II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, 07-09 KASIM 2013, İzmir
- [104] TS EN 13369 "Öndökümlü beton mamuller – Genel kurallar", 2018, Ankara
- [105] T.Y. Erdoğan, T.K. Erdem, "Buhar Kürü Uygulamasında Beton Özelliklerini Etkileyen Faktörlerden "Bekleme Süresi"nin Önemi", ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, 14 Ekim 2002, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye
- [106] M. Mohabbı Yadollahı ve S. Varolğüneş , "Farklı Kür Koşullarının Reaktif Pudra Betonların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi", Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, c. 11, sayı. 1, ss. 353-361, Mar. 2020, doi:10.24012/dumf.537454

- [107] Güçlüer, K. , Günaydın, O. & Arın, A. (2018). Mineral Katkılı Betonlarda Basınçlı Buhar Kürü Etkisinin Araştırılması . Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi , 21 (1) , 92-99 . DOI: 10.17780/ksujes.378011
- [108] Yaprak H, Alnkaa A, Memis S, Kaplan G (2018) The effects of steam curing time on the geopolymer mortar. In: International Congress on Engineering and Life Science, ICELIS. pp 13–16
- [109] Z. Jiao, X. Li, Q. Yu. Effect of curing conditions on freeze-thaw resistance of geopolymer mortars containing various calcium resources. *Constr. Build. Mater.*, 313 (2021), Article 125507
- [110] Mayhoub, O. A., Mohsen, A., Alharbi, Y. R., Abadel, A. A., Habib, A. O., & Kohail, M. (2021). Effect of curing regimes on chloride binding capacity of geopolymer. *Ain Shams Engineering Journal*. doi:10.1016/j.asej.2021.04.032
- [111] W. Hu, Q. Nie, B. Huang, X. Shu, “Investigation of the strength development of cast-in-place geopolymer piles with heating systems”, *J. Clean. Prod.*, 215 (2019), pp. 1481-1489
- [112] Khale D. ve Chaudhary R. (2007), “Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A Review”, *Journal of Materials Science*, 42, 729-746.
- [113] Okoye, F.N.; Durgaprasad, J.; Singh, N.B. Mechanical properties of alkali activated flyash/Kaolin based geopolymer concrete. *Constr. Build. Mater.* 2015, 98, 685–691.
- [114] İnternet kaynağı: <https://www.labomar.net/etuv.html>, Erişim tarihi: 13.12.2022, 11:20
- [115] H. Abdulla, H. Ceylan, S. Kim, K. Gopalakrishnan, P.C. Taylor, Y. Turkan, System requirements for electrically conductive concrete heated pavements, *Transp. Res. Rec.* 2569 (2016) 70–79, <https://doi.org/10.3141/2569-08.>,
- [116] S. Yehia, C.Y. Tuan, D. Ferdon, B. Chen, Conductive concrete overlay for bridge deck deicing: Mixture proportioning, optimization, and properties, *ACI Struct. J.* 97 (2000) 172–181. <https://doi.org/10.14359/821>.
- [117] P. Maleki, B. Iranpour, G. Shafabakhsh, Investigation of de-icing of roads with conductive concrete pavement containing carbon fibre-reinforced polymer (CFRP), *Int. J. Pavement Eng.* 20 (2019) 682–690. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1326235>

- [118] Malakooti, W.S. Theh, S.M.S. Sadati, H. Ceylan, S. Kim, M. Mina, K. Cetin, P. C. Taylor, Design and Full-scale Implementation of the Largest Operational Electrically Conductive Concrete Heated Pavement System, *Constr. Build. Mater.* 255 (2020), 119229, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119229>.
- [119] Uygunoğlu, T. , Topçu, İ. B. , Şimşek, B. & Çınar, E. (2018). Kendiliğinden Yerleşen Harçların Elektriksel Özdirenci Üzerine Mineral Katkıların Etkisi . Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi , 22 (2) , 986-992 . Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sdufenbed/issue/38975/456430>
- [120] Topçu, İ. B., Uygunoğlu, T., & Hocaoğlu, İ. (2018). “Yüksek Fırın Cüruf Katkılı Çimento Pastalarının Elektriksel Özdirençlerinin Araştırılması”, *Journal of Polytechnic.* <https://doi.org/10.2339/politeknik.403970>
- [121] İnternet Kaynağı: <https://mme.deu.edu.tr/wp-content/uploads/2017/07/Ders-Elektrokimya-I-2016-2017.pdf>, Erişim tarihi: 20.09.2022, 15:10
- [122] TOPÇU, İ. B. , UYGUNOĞLU, T., & Hocaoglu, I., (2018). Investigation of Electrical Resistivity of Cement Paste Blended with Blast Furnace Slag. *JOURNAL OF POLYTECHNIC-POLITEKNİK DERGISI* , vol.21, no.2, 257-264
- [123] X. Lian, Z.-H. Peng, L.-T. Shen, T.-G. Qi, Q.-S. Zhou, X.-B. Li, G.-H. Liu,” Properties of low-modulus sodium silicate solution in alkali system” *Trans. Nonferrous Metals Soc. China*, 31 (2021), pp. 3918-3928
- [124] Ukihashi, H. (1957). “A Study on the Electric Conductivity of Sodium Silicate Aqueous Solution”. III. On the Relationship between Conductance and Viscosity. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 30(5), 470–476. doi:10.1246/bcsj.30.470
- [125] P.M. Rameshwaran, T. Ch. Madhavi, Flexural behaviour of fly ash based geopolymer concrete, *Materials Today: Proceedings*, 2021, ISSN 2214-7853
- [126] Subhankar Chowdhury, Subhashree Mohapatra, Ambar Gaur, Gaurav Dwivedi, Archana Soni, Study of various properties of geopolymer concrete – A review, *Materials Today: Proceedings*, 2020, ISSN 2214-7853
- [127] Thong M. Pham, Junli Liu, Phuong Tran, Voon-Loong Pang, Feng Shi, Wensu Chen, Hong Hao, Tung M. Tran, Dynamic compressive properties of lightweight rubberized geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 265, 2020, 120753, ISSN 0950-0618
- [128] Erfanimanesh, M.K. Sharbatdar, Mechanical and microstructural characteristics of geopolymer paste, mortar, and concrete containing local zeolite and slag activated by

sodium carbonate, *Journal of Building Engineering*, Volume 32, 2020, 101781, ISSN 2352-7102

- [129] Hongen Zhang, Lang Li, Cheng Yuan, Qingyuan Wang, Prabir Kumar Sarker, Xiaoshuang Shi, Deterioration of ambient-cured and heat-cured fly ash geopolymer concrete by high temperature exposure and prediction of its residual compressive strength, *Construction and Building Materials*, Volume 262, 2020, 120924, ISSN 0950-0618
- [130] Maochieh Chi, Ran Huang, Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars, *Construction and Building Materials*, Volume 40, 2013, Pages 291-298, ISSN 0950-0618
- [131] Rajini, A.V. Narasimha Rao, C. Sashidhar, Micro-level studies of fly ash and GGBS –based geopolymer concrete using Fourier transform Infra-Red, *Materials Today: Proceedings*, 2020, ISSN 2214-7853
- [132] P. Saranya, Praveen Nagarajan, A.P. Shashikala, Behaviour of GGBS-dolomite geopolymer concrete short column under axial loading, *Journal of Building Engineering*, Volume 30, 2020, 101232, ISSN 2352-7102
- [133] Shaswat Kumar Das, Syed Mohammed Mustakim, Adeyemi Adesina, Jyotirmoy Mishra, Thamer Salman Alomayri, Hasan Suliman Assaedi, Cyriaque Rodrigue Kaze, Fresh, strength and microstructure properties of geopolymer concrete incorporating lime and silica fume as replacement of fly ash, *Journal of Building Engineering*, Volume 32, 2020, 101780, ISSN 2352-7102
- [134] Amin Noushini, Arnaud Castel, James Aldred, Aditya Rawal, Chloride diffusion resistance and chloride binding capacity of fly ash-based geopolymer concrete, *Cement and Concrete Composites*, Volume 105, 2020, 103290, ISSN 0958-9465
- [135] Hai Yan Zhang, Guang Hong Qiu, Venkatesh Kodur, Zhen Sheng Yuan, Spalling behavior of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete under elevated temperature exposure, *Cement and Concrete Composites*, Volume 106, 2020, 103483, ISSN 0958-9465
- [136] Emriye Çınar, Tayfun Uygunoğlu, Barış Şimşek, İlker Bekir Topçu, Effect of carbon black on electrical curing of fresh concrete for cold regions, *Construction and Building Materials*, Volume 247, 2020, 118572, ISSN 0950-0618

- [137] Tayfun Uygunoğlu, İsmail Hocaoğlu, Effect of electrical curing application on setting time of concrete with different stress intensity, *Construction and Building Materials*, Volume 162, 2018, Pages 298-305, ISSN 0950-0618
- [138] Domenico Cecini, Simon A. Austin, Sergio Cavalaro, Alessandro Palmeri, Accelerated electric curing of steel-fibre reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 189, 2018, Pages 192-204, ISSN 0950-0618
- [139] Bredenkamp, S., Kruger, K., & Bredenkamp, G. L. (1993). Direct electric curing of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 45(162), 71–74. doi:10.1680/mac.1993.45.162.71
- [140] Myungjun Jung, Ji-seul Park, Sung-Gul Hong, Juhyuk Moon, Micro- and meso-structural changes on electrically cured ultra-high performance fiber-reinforced concrete with dispersed carbon nanotubes, *Cement and Concrete Research*, Volume 137, 2020, 106214, ISSN 0008-8846
- [141] Canbaz, M, Akçay, M, Ergin, S. (2018). Elektriksel Direnç ile Isıtma Yoluyla Uygulanan Kürün Beton Özelliklerine Etkisi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering* , 23 (1) , 431-440 . DOI: 10.17482/uumfd.419244
- [142] Bai, Y.; Guo, W.; Wang, J.; Xu, Z.; Wang, S.; Zhao, Q.; Zhou, J. Geopolymer bricks prepared by MSWI fly ash and other solid wastes: Moulding pressure and curing method optimisation. *Chemosphere* 2022, 307, 135987.
- [143] J. Fořt, E. Vejmelková, D. Koňáková, N. Alblová, M. Čáchová, M. Keppert, P. Rovnaníková, R. Černý. Application of waste brick powder in alkali activated aluminosilicates: Functional and environmental aspects. *J. Clean. Prod.*, 194 (2018), pp. 714-725
- [144] B.C. McLellan, R.P. Williams, J. Lay, A. van Riessen, G.D. Corder. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement *J. Clean. Prod.*, 19 (2011), pp. 1080-1090, 10.1016/j.jclepro.2011.02.010
- [145] J. Thaarrini, S. Dhivya, “Comparative study on the production cost of geopolymer and conventional concretes”, *Int. J. Civ. Eng., es.*, 7 (2016), p. 8
- [146] Geo-polymer concrete as a new type of sustainable construction materials Coventry University and the University of Wisconsin Milwaukee Centre for By-Products Utilization. Presented at the Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (2019), p. 10 Milwaukee, USA

- [147] B.J. Mathew, M. Sudhakar, C. Natarajan Strength, economic and sustainability characteristics of coal ash -GGBS based geopolymer concrete Int. J. Comput. Eng. Res., 3 (2013), p. 6
- [148] TS EN 196-1 (2016). Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini. TSE, Bakanlıklar, Ankara
- [149] TS EN 1015-3 (2000). Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile). TSE, Bakanlıklar, Ankara
- [150] TS EN 12390-3 (2019). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. TSE, Bakanlıklar, Ankara
- [151] ASTM Standard C1585, (2004). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-cement Concretes. ASTM International, West Conshohocken, PA (2006).
- [152] J.A. Bogas, M.G. Gomes, A. Gomes. Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. Ultrasonics, 53 (5) (2013), pp. 962-972
- [153] TS EN 12504-4 (2021). Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara
- [154] Astm, C. (2009). 597, Standard test method for pulse velocity through concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [155] Uyanık, Osman & FG, Gülay & S., Tezcan. (2012). Beton Dayanımının Tahribatsız Ultrasonik Yöntemle Tayini. Hazır Beton. 82-85.
- [156] ZEBARİ, Z., BEDİRHANOĞLU, İ., & AYDIN, E. (2016). Beton basınç dayanımının ultrasonik ses dalgası yayılma hızı ile tahmin edilmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 8(1), 43-52.
- [157] TS 2824 EN 1338, Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları. TSE. 2005, Bakanlıklar Ankara
- [158] Beycioğlu, A. (2013), Kendiliğinden yerleşen betonlarda beton ile donatı aderansı ilişkisinin araştırılması. Doktora Tezi.
- [159] İnternet kaynağı:
https://www.globalpetrolprices.com/map/electricity_industrial/, Erişim tarihi:
17.12.2022 17:36