

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**JEOPOLİMER BETON MALZEMENİN YAPI ÜRÜNÜ VE MALZEMESİ
OLARAK ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERFORMANSININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aslıhan KAYHAN

Mimarlık Anabilim Dalı

Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Programı

HAZİRAN - 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**JEOPOLİMER BETON MALZEMENİN YAPI ÜRÜNÜ VE MALZEMESİ
OLARAK ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERFORMANSININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Aslıhan KAYHAN
(502191502)**

Mimarlık Anabilim Dalı

Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Seden ACUN ÖZGÜNLER

HAZİRAN - 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 502191502 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Aslıhan KAYHAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “JEOPOLİMER BETON MALZEMENİN YAPI ÜRÜNÜ VE MALZEMESİ OLARAK ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Seden ACUN ÖZGÜNLER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Caner GÖÇER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Saniye Kahraman Öztaş
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **07 Haziran 2022**
Savunma Tarihi : **30 Haziran 2022**





Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans ve tez çalışmam sırasında her daim bilgileri ve deneyimleriyle beni destekleyen ayrıca bana yol gösteren değerli tez danışmanım Prof. Dr. Seden Acun Özgünler'e çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve yüksek lisans eğitimim sürecinde de desteklerini hiç eksik etmeyen sevgili babam Ayhan Kayhan'a, annem Keziban Kayhan'a ve kardeşim Emirhan Kayhan'a desteklerinden dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sürecinde görüşme gerçekleştirmiş olduğum ilgililere ve destekçi olan tüm kişilere teşekkür ederim.

Haziran 2022

Aslıhan Kayhan
(Mimar)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Amacı	1
1.2 Çalışmanın Kapsamı	2
1.3 Çalışmanın Yöntemi.....	3
2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	5
2.1 Yapı Malzemesi Olarak Konvansiyonel Beton.....	12
2.1.1 Konvansiyonel betonun tarihçesi	13
2.1.2 Konvansiyonel betonun bileşenleri ve üretimi.....	14
2.1.3 Konvansiyonel betonun performansı	22
2.1.4 Konvansiyonel betonun sınıflandırılması	22
2.1.5 Sürdürülebilir beton	23
2.2 Sürdürülebilir Beton Bağlamında Jeopolimer.....	26
2.2.1 Jeopolimerin tarihçesi	28
2.2.2 Jeopolimerin yapısı ve sınıflandırılması	30
2.2.3 Jeopolimerin bileşenleri ve üretimi	37
2.2.4 Jeopolimerin performansı ve kullanım alanı.....	45
2.2.5 Jeopolimerin çevresel etkisi	52
2.3. Konvansiyonel Beton ve Jeopolimer Betonun Karşılaştırılması.....	53
2.3.1 Kullanılan malzemeler	53
2.3.2 Beklenen özellikler	54
2.3.3 Konvansiyonel beton ve jeopolimer betonun çevresel etkilerinin karşılaştırılması	57
3. YAPI ÜRÜNÜ VE MALZEMESİ OLARAK JEOPOLİMER.....	61
3.1 Sürdürülebilir Yapı Ürünü ve Malzemeleri.....	61
3.2 Yapı Ürünü ve Malzemelerinin Seçim Kriterleri ve Yöntemleri	65
3.3 Yapı Ürünü ve Malzemesi Olarak Jeopolimer	74
4. JEOPOLİMER BETONUN YAPI ÜRÜNÜ VE MALZEMESİ OLARAK ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ	91
4.1 Çevresel Sürdürülebilirlik	91
4.2 Performans Değerlendirme Yöntemi	98
4.3 Çalışma Parametreleri	101

4.3.1 Sabit Veriler	101
4.3.2 Değişken Veriler	103
4.4 Hesaplama ve Değerlendirme.....	108
4.4.1 Simülasyon sonuçları	108
4.4.2 Yıllık enerji tüketimi karşılaştırılması.....	111
4.4.3 Isıtma enerjisi tüketimi sonucu oluşan çevresel etki değerlendirilmesi..	117
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	133
KAYNAKLAR.....	139
EKLER.....	153
ÖZGEÇMİŞ.....	181



KISALTMALAR

ADP	: Abiotic Kaynakların Tükenme Potansiyeli
AP	: Asitleşme Potansiyeli
ASHRAE	: Amerikan Isıtma, Soğutma ve Havalandırma Mühendisleri Derneği
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BEAT	: Building Environmental Assessment Tool
BEP-TRg	: Binalarda Enerji Performansı Hesaplama Yöntemi
BREEAM	: Appendix Building Research Establishment Environmental Assessment Method
BM	: Birleşmiş Milletler
CASBEE	: Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency
CES	: Cambridge Engineering Selector
CFC	: Kloroflorokarbon
CLR-S	: Contaminated Liquids Recycling System
CML	: Center of Environmental Science of Leiden University
COP	: Coefficient of Performance
C-H-S	: Kalsiyum Silikat Hidrat
DNA	: Deoksiribo Nükleik Asit
ECO₂	: Gömülü Karbondioksit
ELECTRE	: Eleme Et Choix Traduisant la realite
ERMCO	: European Ready Mixed Concrete Organization
EMAS	: Eco Management and Audit Scheme
EP	: Ötrofikasyon Potansiyeli
GCI	: The University of Queensland's Global Change Institute
GWP	: Küresel Isınma Potansiyeli
HCFC	: Hidroklorofluorokarbon
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
IPMS	: Integrated Part Load Value
IPLV	: A New Integrated Product Materials Selection
ISO	: International Organization for Standardization

KBS	: Knowledge-Based System
LEED	: Leadership in Energy and Environmental Design
MILP	: Mixed-Integer Linear Programming
MIPS	: Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages
NASH	: Sodyum Alüminasilikat Hidrat
ODP	: Ozon Tabakasının İncelme Potansiyeli
PÇ	: Design Portland Çimentosu
POCP	: Fotokimyasal Sis Oluşturma Potansiyeli
SETAC	: Society of Environmental Toxixology and Chemistry
UHPC Beton	: Ultra-High Performance Concrete / Ultra Yüksek Performanslı
UK	: Uçucu Kül
UYPB	: Ultra Yüksek Performanslı Beton
YDD	: Yaşam Döngü Değerlendirmesi
YDE	: Yaşam Döngü Envanteri
YDED	: Yaşam Döngü Envanteri Değerlendirilmesi
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

SEMBOLLER

°C	: Santigrat
cm	: Santimetre
GJ	: GigaJoule
J	: Joule
K	: Kelvin
kg	: Kilogram
KWh	: KiloWatt Saat
lt	: Litre.
lux	: Aydınlanma şiddeti birimi.
m	: Metre
m²	: Metrekare
m³	: Metreküp
Mj	: Megajoule
Mpa	: Mega Pascal
U	: Toplam ısı geçirgenlik katsayısı (W/m ² K)
U_D	: Dış duvarın ısı geçirgenlik katsayısı
U_T	: Tavanın ısı geçirgenlik katsayısı
U_t	: Zemine oturan tabanın/döşemenin ısı geçirgenlik katsayısı
U_P	: Pencerenin ısı geçirgenlik katsayısı
W	: Watt
µm	: Mikrometre



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Sürdürülebilirlik kavramının tarihsel gelişimi .	6
Çizelge 2.2 : Sürdürülebilirlik hakkında standartlar.	10
Çizelge 2.3 : Yaşam döngü değerlendirmesi hakkında standartlar.	11
Çizelge 2.4 : Türkiye’de 1996-2012 yılları kullanılan betonların sınıflandırılması.	13
Çizelge 2.5 : Çimento ile ilgili Türk standartlar.	16
Çizelge 2.6 : Agregaya ilgili Türk standartlar.	18
Çizelge 2.7 : Betonda kullanılan karma suyunun özellikleri.	19
Çizelge 2.8 : Katkı maddeleri oranları.	19
Çizelge 2.9 : Katkı maddelerinin faydaları.	19
Çizelge 2.10 : Beton deneyleriyle ilgili standartlar.	21
Çizelge 2.11 : Beton türleri.	23
Çizelge 2.12 : Sürdürülebilir beton yaklaşımları.	24
Çizelge 2.13 : Jeopolimerizasyon aşamaları.	28
Çizelge 2.14 : Alkali aktivasyonunun gelişimi.	28
Çizelge 2.15 : Jeopolimer üzerine başlıca çalışmalar.	30
Çizelge 2.16 : Fırında ve atmosferde kürlenmiş jeopolimerin basınç dayanımları.	45
Çizelge 2.17 : Konvansiyonel beton ve jeopolimer betonun malzeme karşılaştırması.	53
Çizelge 2.18 : Betonla ilgili Türk standartları.	54
Çizelge 2.19 : C28/35 betonunun ECO2 değerinin kullanılan bağlayıcıya göre değişimi.	58
Çizelge 2.20 : Yalıtım malzemeleri için oluşum enerjisi geri ödeme zamanları.	59
Çizelge 3.1 : Yapı malzemesi seçim kriterleri.	66
Çizelge 3.2 : YDD aşamalarının kapsadığı süreçler.	68
Çizelge 3.3 : Beşikten kapağa sürecinde gömülü enerji ve gömülü karbon miktarları.	68
Çizelge 3.4 : Yaşam döngü değerlendirmesi için kullanılan araçlar.	69
Çizelge 3.5 : YDED modellerinin oluşturulduğu ülkeler ve model yaklaşımları.	72
Çizelge 4.1 : CML, etki kategorileri.	92
Çizelge 4.2 : TSE 825’e göre bölgelere önerilen U değerleri.	103
Çizelge 4.3 : Beton karo özellikleri.	104
Çizelge 4.4 : Jeopolimer beton özellikleri.	104
Çizelge 4.5 : Simülasyon alternatifleri listesi.	107
Çizelge 4.6 : Alternatiflerin yıllık ısıtma, soğutma ve toplam enerji tüketimleri.	109
Çizelge 4.7 : 1 kWh ısıtma enerjisi için doğal gaz tüketimi başına düşen emisyon miktarı.	117
Çizelge 4.8 : Doğal gaz tüketimi sonucu ortaya çıkan emisyon miktarı.	118
Çizelge 4.9 : Doğal gaz kullanımını sonucu oluşan emisyonların 1kWh başına düşen çevresel etki katsayıları.	120

Çizelge 4.10 : Alternatiflerin doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu çevresel etkiler.	121
--	-----



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Sürdürülebilirlik.	5
Şekil 2.2 : Sürdürülebilir mimarlık ilkeleri ve kapsamı.	7
Şekil 2.3 : 2009 Yılı yıllık yapı malzemesi kullanımı.	7
Şekil 2.4 : Yapı ve yaşam döngüsü ilişkisi.	10
Şekil 2.5 : Portland çimentosu üretim süreci.	15
Şekil 2.6 : Si/Al molar oranına göre bağlar.	31
Şekil 2.7 : Jeopolimer polimerizasyonu.	32
Şekil 2.8 : Davidovits'in zincir yapı modeli.	33
Şekil 2.9 : Uçucu küllerin küresel yapısı.	39
Şekil 2.10 : Jeopolimerizasyon süreci.	43
Şekil 2.11 : Uçucu kül bazlı jeopolimer üretimi.	43
Şekil 2.12 : Silikat ve alüminantlarla jepolimer üretimi.	44
Şekil 2.13 : Mariupol'da yapılmış 2 katlı alkali aktivasyonu ile üretilen yapı.	47
Şekil 2.14 : Mariupol'da bulunan Hlavacek'in çalıştığı bina.	48
Şekil 2.15 : 6 Katlı ofis ve dükkân binası.	48
Şekil 2.16 : 12,6 metre açıklığa sahip atölye binası.	49
Şekil 2.17 : 24 katlı alkali aktive beton kullanılan yapı.	49
Şekil 2.18 : Brezilya'da kilise cephe kaplaması örneği.	51
Şekil 2.19 : São Paulo'da bir kafenin cephe kaplaması.	51
Şekil 2.20 : 2017 Karbon salınımı.	52
Şekil 3.1 : Yapı sistemlerinin ilişkisi.	61
Şekil 3.2 : Yapı elemanı katmanlaşması.	62
Şekil 3.3 : Yapı malzemelerinin sınıflandırılması.	63
Şekil 3.4 : Malzeme seçim yöntemleri.	67
Şekil 3.5 : YDED'e göre malzeme seçim yöntemleri.	70
Şekil 3.6 : YDE, orta ve son nokta çevresel etki kategorileri.	71
Şekil 3.7 : Uçucu kül ve metakaolin esaslı jeopolimerlerin kütle ve küresel ısınma potansiyeli karşılaştırması.	73
Şekil 4.1 : YDED sınıflandırması ve karakterizasyon örneği.	97
Şekil 4.2 : Tez kapsamında oluşturulan çalışma akış şeması.	100
Şekil 4.3 : Simülasyon modeli.	101
Şekil 4.4 : Alternatiflerin toplam enerji tüketimleri.	108
Şekil 4.5 : Alternatiflerin gaz (ısınma) enerji tüketimleri.	110
Şekil 4.6 : Alternatiflerin elektrik (soğutma+ekipman) enerji tüketimleri.	110
Şekil 4.7 : Jeopolimer katmanlaşması bina alternatiflerin yıllık enerji tüketimleri.	111
Şekil 4.8 : Kontrol katmanlaşması bina alternatiflerin yıllık enerji tüketimleri.	112
Şekil 4.9 : Jeopolimer ve kontrol katmanlaşmasının yıllık enerji tüketimlerinin karşılaştırılması.	112
Şekil 4.10 : Jeopolimer ve kontrol katmanlaşmasının yıllık gaz tüketimlerinin karşılaştırılması.	113

Şekil 4.11 : Jeopolimer ve kontrol katmanlaşmasının yıllık elektrik tüketimlerinin karşılaştırılması.	113
Şekil 4.12 : İstanbul bina alternatiflerin yıllık enerji tüketimleri.	114
Şekil 4.13 : Diyarbakır bina alternatiflerin yıllık enerji tüketimleri.	114
Şekil 4.14 : Şehre göre toplam enerji tüketiminin karşılaştırılması.	115
Şekil 4.15 : Yalıtımlı bina alternatiflerin yıllık enerji tüketimleri.	116
Şekil 4.16 : Yalıtımsız bina alternatiflerin yıllık enerji tüketimleri.	116
Şekil 4.17 : Yalıtım durumuna göre toplam enerji tüketiminin karşılaştırılması. ...	117
Şekil 4.18 : Alternatiflerin cephe kaplamalarına göre yıllık emisyon kıyaslaması.	119
Şekil 4.19 : Alternatiflerin doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu küresel ısınma potansiyeli.	122
Şekil 4.20 : Alternatiflerin doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu asitleşme potansiyeli.	122
Şekil 4.21 : Alternatiflerin doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu ötrofikasyon potansiyeli.	123
Şekil 4.22 : Kaplama ürününe göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu küresel ısınma potansiyeli.	124
Şekil 4.23 : Kaplama ürününe göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu asitleşme potansiyeli.	124
Şekil 4.24 : Kaplama ürününe göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu ötrofikasyon potansiyeli.	125
Şekil 4.25 : Kaplama ürününe göre çevresel etki değişim yüzdesi.	126
Şekil 4.26 : Şehre göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu küresel ısınma potansiyeli.	127
Şekil 4.27 : Şehre göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu asitleşme potansiyeli.	127
Şekil 4.28 : Şehre göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu ötrofikasyon potansiyeli.	128
Şekil 4.29 : Şehre göre çevresel etki değişim yüzdesi.	128
Şekil 4.30 : Yalıtıma göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu küresel ısınma potansiyeli.	129
Şekil 4.31 : Yalıtıma göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu asitleşme potansiyeli.	130
Şekil 4.32 : Yalıtıma göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu ötrofikasyon potansiyeli.	130
Şekil 4.33 : Yalıtıma göre çevresel etki değişim yüzdesi.	131

JEOPOLİMER BETON MALZEMENİN YAPI ÜRÜNÜ VE MALZEMESİ OLARAK ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

İnsan, ömrünü kendi oluşturduğu yapma çevre içerisinde geçirir. Nüfusun artışı ve yapma çevrenin gelişmesi doğru orantılı olarak gerçekleşmektedir. Bu çevrenin üretiminde teknik özelliklerinin uygun ve yapımının diğer malzemelere göre daha esnek olmasından dolayı beton tercih edilmektedir fakat beton üretiminde kullanılan malzemeler enerji tüketimleri konusunda yüksek tüketimli ürünlerdir. Enerji tüketimi sorununa çözüm olması açısından beton içerisindeki ürünlerin kullanımını azaltmaya yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Sanayileşmiş ülkelerde çimento ve betonun seri üretimi yapıldığı için uygun bir yapı ürünü olarak kabul edilmektedir. Optimize edilmiş bir sistemle rekabet edilebilmesi için pazarın isteklerine uygun teknik performansa sahip, orta maliyetli ve ekolojik bir malzeme olması açısından düşük çevresel etkiye sahip bir ürüne ihtiyaç vardır. Jeopolimer beton; mekanik, fiziksel ve kimyasal pek çok konuda istenilen özellikleri sağlamaktadır. İçerisinde uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) gibi ikincil/atık malzemeler kullanılması sebebiyle oluşum enerjisi düşük uygun bir adaydır. Bu çalışmada, yüksek üretim enerjisine sahip çimento kullanılan konvansiyonel beton yerine geçebilecek sürdürülebilir beton olarak değerlendirilen jeopolimer betonun yapı ürünü ve malzemesi olarak kullanım olanakları, kullanım ömrü boyunca çevresel etkileri yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) yöntemi kapsamında incelenmiştir.

Tez çalışmasının birinci bölümünde; yapı yapımında sürdürülebilir malzemenin öneminden bahsedilerek, çalışmanın amacı, kapsamı ve yönteminden bahsedilmiştir.

İkinci bölümde; Enerji kriziyle birlikte, sürdürülebilirlik kavramının çıkışı ve gelişimine yer verilmiştir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan konvansiyonel beton hakkında literatür çalışmaları anlatılmıştır. Çevresel sürdürülebilirlik açısından yeterli bir malzeme olmayan konvansiyonel beton; tarihi, bileşenleri ve üretimi, performansı, sınıflandırılması hakkında bilgi verilmiştir. Sonrasında sürdürülebilir beton bağlamında jeopolimer betondan bahsedilmiştir. Jeopolimer betonun; tarihinden, yapısı ve sınıflandırılmasından, bileşen ve üretiminden, performansı ve kullanım alanından ayrıca çevresel etkisinden bahsedilmiştir. İki malzeme birbirleriyle içerdikleri bileşen, malzeme özellikleri ve çevresel etki başlıkları altında karşılaştırılmıştır.

Üçüncü bölümde; Bölümün başında sürdürülebilir yapı ürünü ve malzemelerinden bahsedilmiştir. Sonrasında, malzeme seçim kriterleri ve yöntemlerinden bahsedilerek dördüncü bölümde yapılacak benzetim çalışması için kullanılacak seçim yönteminden bahsedilmiştir. Bölüm sonunda, jeopolimer beton hakkında yapılan mekanik, fiziksel, termal ve dayanım gibi özelliklerinin test edildiği çalışmalar derlenmiş ve bir çizelge oluşturulmuştur. Çizelge için 343 kaynak incelenmiştir ve 70 tanesi seçilmiştir. Kaynakların bir kısmı jeopolimer betonun alkali ile aktive

edilmiş betonla karıştırılmasından dolayı elenmiştir. Jeopolimer seramik gibi farklı jeopolimer çeşitleriyle ilgili çalışmalar kapsam dışı bırakılmıştır. Verileri okunamayan deneyler ve çalışmalar tabloya dahil edilmemiştir. Kauçuk ve cam gibi atık malzemelerin kullanıldığı çalışmalar, fiber ve vermikülit gibi farklı katkı malzemelerinin katıldığı çalışmalar elenerek tabloya dahil edilmiştir. Derlenen çizelgenin değerlendirmesi yapılarak jeopolimer beton ürün özellikleri belirlenmiştir. Çizelgedeki veriler; kullanılan aktivatör çeşidi, kullanılan puzolan çeşidi, kullanılan katkı malzemeleri ve kür sıcaklığına göre incelenmiştir. Ayrıca; birim hacim ağırlıkları, su emme oranları, yüksek sıcaklığa karşı davranışları, tuzlara karşı davranışı, asitlere karşı davranışı ve donma-çözünme deneylerindeki davranışı incelenmiştir.

Dördüncü bölümde; Benzetim yöntemi kapsamında çalışılacak modellerin özellikleri belirlenmiştir. Bu özellikler;

- Cephe kaplama malzemelerinin özellikleri ve katmanlaşmasının belirlenmesi.
- Aynı derece-gün bölgesinde farklı iklim koşullarına sahip iki farklı il olan İstanbul ve Diyarbakır'ın belirlenmesi.
- Bina kullanımının belirlenmesi
- Havalandırma sistemi, ısıtma-soğutma değerleri ve kullanıcı yükü gibi verilerin belirlenmesi.

Jeopolimer beton cephe kaplaması ürünü kullanılmış bir ofis binasının yaşam ömrünün 1 yılı boyunca aynı derece-gün bölgesinde farklı iklim koşullarına sahip iki farklı ilde göstermiş olduğu enerji tüketimi, emisyonlar ve çevresel etkilerin sonuçları verilmiş ve değerlendirilmiştir.

Oluşturulan modellerin yıllık gaz, elektrik ve toplam enerji tüketimleri bulunmuş ve cephe tiplerine, şehirlerine ve yalıtım durumlarına göre kıyaslanmıştır. Yıllık gaz tüketimi sonucu oluşan emisyonlar hesaplanmıştır. Doğal gaz kaynaklı emisyonların oluşturduğu küresel ısınma, asitleşme ve ötrofikasyon potansiyelleri bulunmuş ve yorumlanmıştır.

Beşinci bölümde; tez kapsamında derlenen jeopolimer beton özellikleri, yapılan benzetim çalışmaları sonucu ortaya konan enerji tüketimleri, emisyonlar ve çevresel etki verileri parametrelere göre yorumlanmıştır.

EVALUTION OF ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY PERFORMANCE OF GEOPOLYMER CONCRETE MATERIAL AS A BUILDING PRODUCT AND MATERIAL

SUMMARY

A person spends his life in an environment created by himself. The growth of the population and the development of the built environment are directly proportional. Concrete is preferred in the production of this environment due to the fact that its technical characteristics are suitable, and its construction is more flexible than other materials. However, the materials used in the production of concrete are high-consumption products in terms of energy consumption. There are studies to reduce the use of products in concrete in order to solve the problem of energy consumption. In industrialized countries, cement and concrete are considered to be a suitable building product because they are mass-produced. In order to compete with an optimized system, it must be a product that meets the demands of the market. The product must have appropriate technical performance. It should be of medium cost and it should have a low environmental impact in order to be an ecological material. Geopolymer concrete; It provides the desired properties in many mechanical, physical and chemical subjects. It is a suitable candidate with low formation energy because it uses secondary/waste materials such as fly ash and blast furnace slag. In this study, instead of reducing the cement additives of the concrete in order to create sustainable concrete and reduce its environmental effects, geopolymer concrete without any cement additives has been examined. Geopolymer concrete has been examined as a building product and material with the LCA (Life-cycle assessment) method.

In the first part of the thesis; The purpose, scope and method of the study were mentioned by mentioning the importance of sustainable materials in building construction.

In the second part; With the energy crisis, the emergence and development of the concept of sustainability are included. Literature studies about conventional concrete, which is widely used today, are explained. Conventional concrete, which is not a sufficient material in terms of environmental sustainability; information is given about its history, components and production, performance, classification. Then, geopolymer concrete was mentioned in the context of sustainable concrete. geopolymer concrete; Its history, structure and classification, component and production, performance and usage area, as well as its environmental impact are mentioned. The two materials were compared with each other under the titles of the components they contain, material properties and environmental impact.

In the third part; At the beginning of the chapter, sustainable building products and materials were mentioned. Afterwards, material selection criteria and methods are mentioned and the selection method to be used for the simulation study in Chapter 4 is mentioned. At the end of the chapter, studies on geopolymer concrete that tested its mechanical, physical, thermal and strength properties were compiled and a table

was created. For the table, 343 sources were examined and 70 of them were selected. Some of the resources were eliminated due to confusing of geopolymer concrete with alkali-activated concrete. Studies on different types of geopolymers such as geopolymer ceramics are excluded. Experiments and studies whose data cannot be read are not included in the table. Studies using waste materials such as rubber and glass, studies involving different additives such as fiber and vermiculite were eliminated and included in the table. Geopolymer concrete product properties were determined by evaluating the compiled chart. Data in the chart; The type of activator used, the type of pozzolan used, the additives used and the curing temperature were investigated. Moreover, unit weights, water absorption rates, behavior against high temperature, behavior against salts, behavior against acids and behavior in freeze-thaw experiments were investigated.

As can be seen from the results of the study, the most commonly used activators are NaOH and Na₂SiO₃. The most common pozzolan used alone is fly ash. Fly ash is followed by metakaolin and blast furnace slag. Generally, superplasticizer additive is used to increase the amount and speed of the reaction. Curing at 80°C and above did not significantly change the results. Geopolymer concrete is generally lightweight concrete but it is also produced as normal concrete to a large extent. The water absorption rate is generally less than 10%. They are resistant to high temperatures. Their effects from acids and salts could not be determined due to the lack of sufficient resources. In the freeze-thaw tests, it suffered a maximum loss of 34.02% compressive strength.

In the fourth chapter; The features of the models to be studied within the scope of the simulation method were determined. These features are;

- Determination of properties and layering of facade cladding materials
- Determination of Istanbul and Diyarbakır, two different provinces with different climatic conditions and same degree-day regions
- Determination of building use
- Determination of data such as ventilation system, heating-cooling values and user load.

Annual gas, electricity and total energy consumptions of the created models were found and compared according to facade types, cities and insulation conditions. Emissions resulting from annual gas consumption have been calculated. Global warming, acidification and eutrophication potentials created by emissions have been found and interpreted.

Geopolymer concrete façade cladding with a low U value and higher insulating properties than concrete façade cladding has reduced heating consumption in all alternatives. However, the insulation property increased the increased shell cooling loads. However, the total energy consumption of the alternatives remained below the control group, except for the Diyarbakır-insulated geopolymer alternative called G-DIY-Y. It has been concluded that the insulation layer in the building element can be reduced in geopolymer coating applications with insulating properties for Diyarbakır, which represents the Hot-Dry climate region. It has been observed that the geopolymer coating provides better performance in moderate-humid climate.

The G-DIY-Y alternative with the least natural gas consumption was the alternative with the lowest emissions. Alternatives with geopolymer concrete facade cladding have less emission than control groups.

Alternatives with geopolymer concrete facade cladding have less environmental impact than control groups. However, the environmental impact difference between coatings is between 0.627% and 0.822%.

In the fifth section; The geopolymer concrete properties compiled within the scope of the thesis, the energy consumption, emissions and environmental impact data revealed as a result of the simulation studies were interpreted according to the parameters.

Although the percentages of change may seem like very small percentages, since geopolymer concrete is a controllable material, it can make bigger differences. There are studies with geopolymer concrete values far below the values determined for simulation and within the scope of the simulation, only 1 year lifetime is considered. When the building product is examined in the Cradle-Grave approach, it will be understood that it is a more ecological material.



1. GİRİŞ

Louis Kahn yazdığı “Remarks” yazısında mimarlığı “Mimarlık doğanın yapamadığıdır” olarak tanımlamıştır (Kahn, 1965, s.305). Pek çok canlı gibi insanlar da yaşayacakları yerleri yaparlar. İnsan barınma ihtiyacını keşfettiği çağlardan bu zamana pek çok yapı metodu ve malzemesi kullanılarak yapıları çevreler elde edilmiştir. Yapılı çevrelerin insanın uzaklaşabileceği bir kavram değildir. İçinde yaşadığı bir kavramdır. Enerjinin önemli bir kısmının kullanıldığı yapılaşmada ekolojik yaklaşımların benimsenmesi 1973 yılındaki enerji kriziyle birlikte başlamıştır.

1.1 Çalışmanın Amacı

İnşaat sektöründe yaygın olarak portland çimentosu kullanılmaktadır. Artan nüfusla birlikte üretimin azaltılması hakkında bir çalışma yapılması mümkün değildir. Ekolojik yaklaşımların benimsenmeye başlamasıyla birlikte çimento kullanımı azaltılmaya çalışılmaktadır. Bu çalışmalar, yapılan harçlara katkı malzemeleri eklenmesi, puzolanik malzemelerin ikamelerinin değiştirilmesi ve eco-cement adıyla anılan magnezyumoksit içerikli alternatif çimentolar üretilmesi gibi girişimlerdir. Bu araştırmaların temel amacı yapı malzemesinin üretim yaşam ve kullanım ömrünü tamamladığı evreye kadar enerji tüketiminin azaltılması, gaz salınımının sınırlandırılması, atık malzemenin azaltılması, tekrar kullanılabilir veya geri dönüştürülebilir olmasıdır. Tezin amacı, yapı sektöründe yaygın olarak kullanılan konvansiyonel betona alternatif bir ürün ve malzeme önerisi olarak jeopolimerin kullanılmasıdır. Jeopolimer ürün ve malzemeyi YDD yöntemiyle incelenmiştir. Çevresel etki hesaplamalarında ISO standartlarına (14040, 14044, 14047, 14048, 14049 ve 14067) ve EN 15804’e bağlı kalmaktadır. Bu bağlamda aşağıdaki konular göz önünde bulundurulmuştur.

- Jeopolimer betonun özelliklerinin yapı ürünü ve malzemesi olarak uygunluğu.

- Konvansiyonel betonla karşılaştırıldığı zaman kullanım ömrü boyunca hangisinin çevreye daha zarar verdiğini belirlemek.

1.2 Çalışmanın Kapsamı

İnsan ömrü kendi oluşturduğu peyzaj içerisinde geçer bir başka deyişle yapma çevreyle birlikte yaşamaktayız. Nüfusun artışı ve yapma çevrenin gelişmesi doğru orantılı olarak gerçekleşmektedir. Bu çevrenin üretiminde teknik özelliklerinin uygun ve yapımının diğer malzemelere göre daha esnek olmasından dolayı beton tercih edilmektedir. Bu çalışmada, sürdürülebilir beton çevresel etkilerinin düşürülmesi için betonun çimento katkısının azaltılması yerine içerisinde hiç çimento katkısı bulunmayan jeopolimer betonun YDD (Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi) yöntemiyle yapı ürünü ve malzemesi olarak kullanım olanakları irdelenecektir. Bu kapsamda cevaplanacak soru: Jeopolimer beton yapı ürünü kullanımı çevresel etki başlığı altında konvansiyonel beton yapı ürünü yerine geçebilir mi ve avantajlı mıdır?

Araştırma sorusu kapsamında, tez çalışması beş bölüm olarak oluşturulmuştur. Birinci bölümde; çalışmanın amacı, kapsamı ve yönteminden bahsedilmiştir.

İkinci bölümde; sürdürülebilirlik kavramının çıkışı ve gelişimine yer verilmiştir. Konvansiyonel beton hakkında literatür çalışmaları anlatılmıştır. Konvansiyonel beton başlığı altında; tarihi, bileşenleri, üretimi, performansı, sınıflandırılması ve sürdürülebilir betondan bahsedilmiştir. Sonrasında sürdürülebilir beton bağlamında jeopolimer betondan bahsedilmiştir. Jeopolimer betonun; tarihinden, yapısından, sınıflandırılmasından, bileşenlerinden, üretiminden, performansından, kullanım alanından ve ayrıca çevresel etkisinden bahsedilmiştir. İki malzeme birbirleriyle içerdikleri bileşen, malzeme özellikleri ve çevresel etki başlıkları altında karşılaştırılmıştır.

Üçüncü bölümde; yapı ürünü ve malzemesi olarak jeopolimer beton incelenmiştir. Bölümün başında sürdürülebilir yapı ürünü ve malzemelerinden bahsedilmiştir. Sonrasında malzeme seçim kriterleri ve yöntemlerinden bahsedilerek 4. bölümde yapılacak benzetim çalışması için kullanılacak seçim yönteminden bahsedilmiştir. Bölüm sonunda jeopolimer beton hakkında yapılan çalışmaların derlendiği tablonun değerlendirmesi yapılarak ürün özellikleri belirlenmiştir.

Dördüncü bölümde; Jeopolimer beton cephe kaplaması ürünü kullanılmış bir ofis binasının yaşam ömrünün 1 yılı boyunca aynı derece-gün bölgesinde farklı iklim koşullarına sahip iki farklı ilde göstermiş olduğu enerji tüketimi, emisyonlar ve çevresel etkilerin sonuçları verilmiş ve değerlendirilmiştir. Doğal gaz kaynaklı oluşan gazlar küresel ısınma, asitleşme ve ötrofikasyon çevresel etkilerine neden olduğu için 3 başlıkta değerlendirme yapılmıştır.

Beşinci bölümde; tez kapsamında derlenen jeopolimer beton özellikleri, yapılan simülasyon çalışmaları sonucu ortaya konan veriler yorumlanmıştır.

1.3 Çalışmanın Yöntemi

Tez çalışması kapsamında sürdürülebilir beton kapsamında jeopolimer beton ile ilgili bir soru belirlenmiş ve soruya cevap bulunmaya çalışılmıştır. Çalışmanın yöntemi literatür taraması ve benzetim çalışması olmak üzere iki aşamalı olarak yürütülmüştür.

Literatür Taraması: Sürdürülebilir beton malzeme olarak görülebilecek jeopolimer betonu incelemek için öncelikle literatür taraması aşamasında konvansiyonel beton incelenmiştir. Sonrasında alternatifi olarak görülen jeopolimer beton araştırılmış ve toplanan özellikler konvansiyonel betonla karşılaştırılmıştır. Araştırmalar; ulusal ve uluslararası makaleler, bildiriler, standartlar, lisansüstü tezler ve konferans sunumları gibi kaynaklardan yararlanılarak yapılmıştır. Seri üretimi bulunmayan ve laboratuvar çalışmaları devam eden jeopolimer beton için yapılan çalışmalarının sonuçları derlenmiştir. Derlenen sonuçların yapı ürünü ve malzemesi olarak kullanılabilirliği tartışılmıştır. Sürdürülebilirlik kapsamında jeopolimer betonun kullanılması irdelendiği için sürdürülebilir yapı ürünü ve malzemeleri araştırılmış ve malzeme seçim kriterleri ile yöntemleri incelenmiştir. En son seçim yöntemlerinden biri seçilerek benzetim yönteminde yararlanılmıştır.

Benzetim Çalışması: Çalışma kapsamında jeopolimer beton cephe kaplama ürününün, beton cephe kaplama ürünü alternatifi olup olmadığı ve aynı derece gün bölgesinde yer alan; ılımlı-nemli iklim tipinin temsil ili İstanbul ve sıcak-kuru iklim tipinin temsil ili Diyarbakır'da farklı iklim koşullarında gözlenmesi hedeflenmiştir. İki ürünün kıyaslanması çevresel etkileri göz önüne alınarak yapılmıştır. Binaya ait veriler, iç ve dış ortam koşulları belirlendikten sonra farklı cephe kaplamalarından türetilen alternatifler oluşturulmuştur. Oluşturulan alternatiflerin yıllık ısıtma,

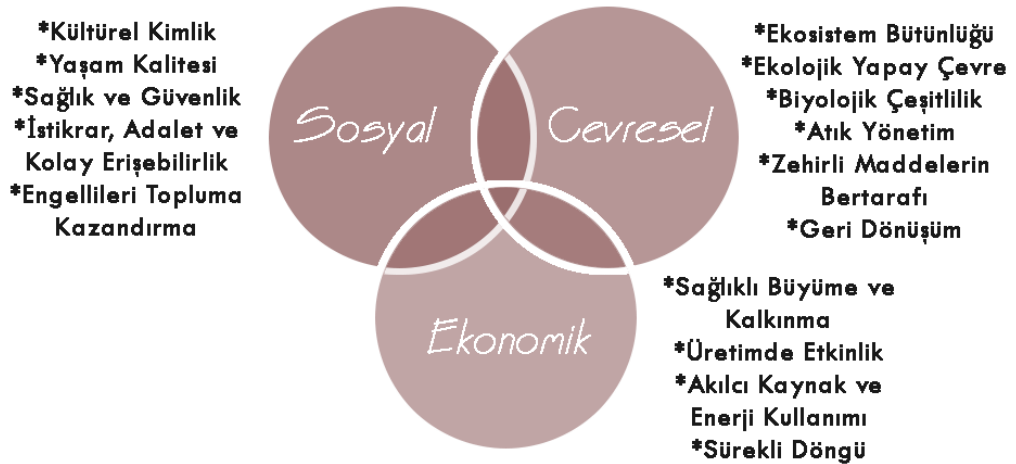
soğutma ve toplam enerji yükleri DesignBuilder 7.1.006'da hesaplanmıştır. Yıllık ısıtma verileri IEA tarafından belirlenmiş değerlerle çarpılarak emisyon miktarı bulunmuştur. Emisyon miktarlar CML 3.4'e göre verilen kat sayılarla çarpılarak çevresel etki değerleri hesaplanmıştır. Çevresel etki değerlerinden olan küresel ısınma, asitleşme potansiyeli ve ötrofikasyon hesapları yapılarak karşılaştırılmıştır.



2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Louis Kahn yazdığı “Remarks” yazısında mimarlığı “Mimarlık doğanın yapamadığıdır” olarak tanımlamıştır (Kahn, 1965, s.305). Pek çok canlı gibi insanlar da yaşayacakları yerleri yaparlar. İnsanın barınma ihtiyacını keşfettiği çağlardan bu zamana pek çok yapı metodu ve malzemesi kullanılarak yapı çevreler elde edilmiştir. Yapılı çevre insanın uzaklaşabileceği bir kavram değildir. İçinde yaşadığı bir kavramdır. Enerjinin önemli bir kısmının kullanıldığı yapılaşmada ekolojik yaklaşımların benimsenmesi 1973 yılındaki enerji kriziyle birlikte başlamıştır.

Sürdürülebilirlik kavramı dünya tarihi açısından yeni bir konudur. Norman Foster 2007 yılında yayınlanan yazısında konu ile ilgili olarak “Son 10 yıldır sürdürülebilirlik kavramı moda haline geldi. Ancak sürdürülebilirlik moda değil, hayatta kalma meselesi olmalıdır” demiştir (Foster, 2007, s.24-28). Sürdürülebilirlik kavramının uygulanabilirliği üç farklı başlıkta değerlendirilmektedir. Bunlar: Çevresel, sosyal ve ekonomiktir (Şekil 2.1) (Yorgancıoğlu, 2004). Konunun temellerinin atıldığı ve kavramın oluşturulduğu pek çok konferans ve rapor bulunmaktadır. Tarihsel olarak sürdürülebilirliğin gelişimi Çizelge 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1 : Sürdürülebilirlik (Yorgancıoğlu, 2004).

Çizelge 2.1 : Sürdürülebilirlik kavramının tarihsel gelişimi (Tufan ve Özel, 2018).

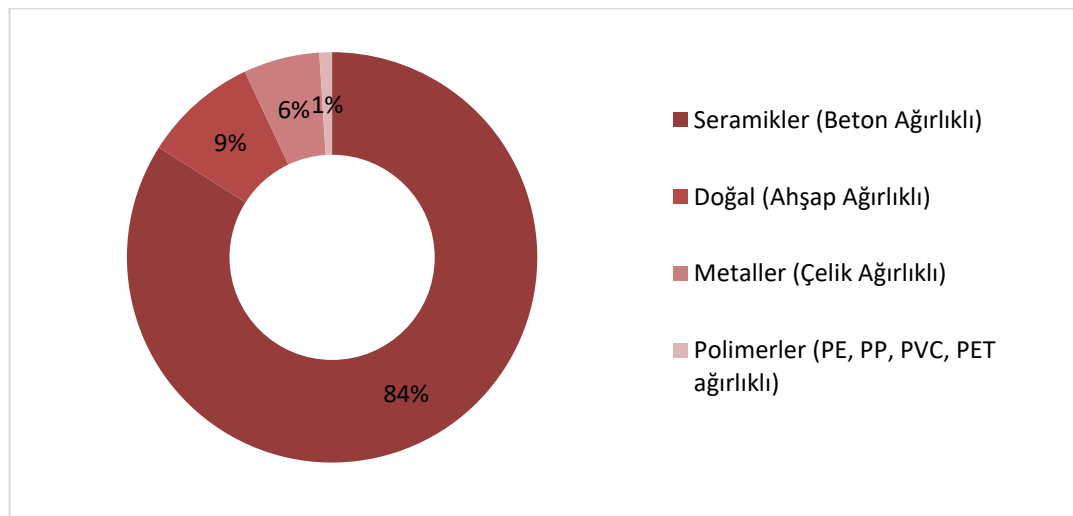
Yıl	Konferans ve Protokol
1972	İnsan ve Çevre Konferansı
1987	Dünya Çevre ve Kalkınma Konferansı
1992	Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı
1993	İnsan Hakları Konferansı
1994	Dünya Nüfus Konferansı
1995	Sosyal Kalkınma Konferansı
1996	Habitat II
1997	Kyoto Protokolü
2002	Sürdürülebilir Gelişme Dünya Zirvesi
2005	Kyoto Protokolünün Yürürlüğe Girmesi
2012	BM Sürdürülebilir Kalkınma Konferansı
2014-2021	BM İklim Değişikliği Müzakereleri (COP- Convention on Climate Change)

Birleşmiş Milletler'in 1983 yılında yayınladığı "*Ortak Geleceğimiz Raporunda*" belirtildiği üzere: "Sürdürülebilirlik, doğanın ve gelecek kuşakların kendi gereksinimlerine cevap verme yeteneklerini tehlikeye atmadan, günlük ihtiyaçlarımızı temin etmek ve kalkınmaktır" (WCED, 1987, s.15). Sürdürülebilirlik tanımının benimsenmesi durumunda; %24 - %50 oranında enerji, %33 - %39 oranında CO₂ emisyonu, %30 - %50 su tüketimi, %70 katı atık, %10 - %15 bakım maliyeti azalmaktadır (Bilgici, 2014). Enerji tasarrufu üzerine kabul ettiğimiz başlıca yönetmeliklerden biri 1 Ocak 2011 yılında yürürlüğe girmiş olan "Bina Enerji Performansı Yönetmeliği"dir. Şekil 2.2'de sürdürülebilir mimarlık ilkeleri ve kapsamaları gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Sürdürülebilir mimarlık ilkeleri ve kapsamı (Url-1).

Eskiden yapılarda ahşap, saman, saz gibi organik malzeme kullanım oranı %30 - %40 kerpiç, kiremit, taş ve kireç gibi inorganik malzeme kullanımı %60 - %70 civarındaydı. Günümüzde ise %90 - %100 oranında canlılara yabancı olan ve yapay yapı malzemeleri kullanılmaktadır (Akman, 1999). 2009 yılında İngiltere’de yapılan bir çalışmada yapı yapımı sürecinde kullanılan malzemelerin yıllık kullanım miktarları incelenmiştir. Beton ağırlıklı seramik sınıfı %84, metaller %6, Polimerler %1 ve doğal kaynaklar ahşap ağırlıklı olmak üzere %9 kullanıldığı gözükmemektedir (Şekil 2.3) (Ashby, 2009).



Şekil 2.3 : 2009 Yılı yıllık yapı malzemesi kullanımı (Ashby, 2009).

Endüstri devrimiyle birlikte gelişen teknoloji yapı malzemesi sektörün pazar payını genişletmiştir. Artan pazar payıyla birlikte çevre kirliliği de artmaktadır. Ekolojik yapı malzemeleri, malzemenin yapı öncesi evresi, yapım evresi, kullanım ve yapı sonrası evresinde en az enerji harcayan ve yapıya en az enerji tükettiren, doğal kaynakları koruyan, az miktarda atık oluşturan, kullanıcı ve çevresinin sağlığı açısından zararı bulunmayan malzemelerdir. Bir başka deyişle, yaşam döngüsü boyunca en az düzeyde enerji harcayan, üretiminde, işlenmesinde, kullanımında, bakımında ve atık oluşumu sırasında çevreye ve insanlara zarar vermeyen malzemelerdir. Tanaçan'ın çalışmalarından birinde bahsedildiği gibi:

Dünyada bir yılda tüketilen hammaddenin %40'ı, yani 3 milyar tonu inşaat sektörüne aittir. Bu durum dünya nüfusunun artmasına paralel olarak artan bina sayısı ile daha da artacaktır. Dolayısıyla ekolojik malzeme kullanılmasının teşvik edilmesi, gün geçtikçe azalan yenilenemeyen kaynakların korunmasında, kaynakların ya da atık maddelerin akıllıca kullanılmasında ve böylelikle doğal ekosistemin korunmasında yardımcı olacaktır (Tanaçan,2002,s.720).

Ekolojik yapı malzemeleri doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Berber, 2012).

1. Doğal Ekolojik Yapı Malzemeleri

- Taş
- Ahşap
- Bambu
- Saz
- Saman ve Saman Balyaları
- Kerpiç

2. Yapay Ekolojik Yapı Malzemeleri

- Metal Malzemeler
- Kâğıt Karton Malzemeler
- Cam Malzemeler
- Plastik Malzemeler
- Akıllı ve Teknolojik Malzemeler

Sürdürülebilir malzeme özelliklerine sahip malzemelerin belirlenmesi 3 ana başlıkta incelenmektedir. 3 ana başlıkta incelenen bu başlıklar: (Eriç ve Ersoy, 1995)

1. Sosyal ve ekolojik özellikler

- Sağlıkla ilgili etkiler
- Çevresel etkiler (ekoloji)
- Sosyal yön
- Ekonomik yön

2. Uygulamaya ilişkin özellikler

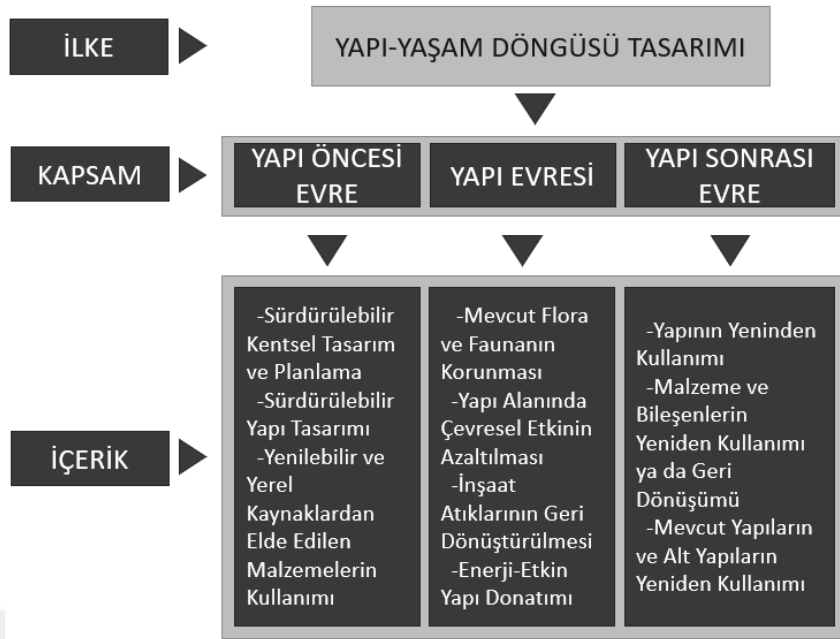
- Dayanıklılık
- Uygulama tekniğiyle ilgili özellikler

3. Madde özellikleri

- Kimyasal özellikler
- Fiziksel özellikler

Birinci grubunun içinde, malzemenin ham maddesinin elde edilmesi, saflaştırılması, işlenmesi, nakliyesi, uygulanması, kullanılması ve yeniden kullanılması gibi konular yer almaktadır. İkinci grup olan uygulamaya ilişkin özellikler bölümünde malzemenin kullanım şartları karşısındaki davranışı ve bu yükler karşı zaman içindeki dayanıklılığı, uygulama tekniği, kullanılan teknoloji gibi konular incelenmektedir. Üçüncü grupta ise malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmektedir. Üretim, uygulama ve kullanımın çeşitli aşamalarındaki işlemlerle çevreyi etkilemesi, ekolojik dengeyi bozması, mali yönü gibi dolaylı ayrıca orta veya uzun vadede etkisini gösteren yönler dışında, maddeye özel, kullanıcıyı direkt etkileyen kimyasal ve fiziksel yönleri değerlendirilmektedir (Eriç ve Ersoy, 1995).

Ekolojik yapı malzemeleri “Yaşam Döngü Değerlendirmesi” kapsamında incelenmektedir. Türk standartlarında “Hayat Boyu Değerlendirme” olarak bahsedilmektedir. 2006 yılı yürürlüğe giren ISO 14040 Çevre Yönetimi – Hayat Boyu Değerlendirme – İlkeler ve Çerçeve standardına göre YDD “Bir ürünün, üretimi için kullanılan ham maddelerin tedarikinden, kullanımı, kullanım ömrü sonunda işlenmesi, geri dönüşümü ve nihai bertarafına kadar hayatı boyunca (beşikten mezara gibi), çevresel boyutlarını ve muhtemel çevresel etkilerini (kaynakların kullanımı ve salınımların çevresel sonuçları gibi) incelemektedir” (ISO 14040, 2006, s.v) (Şekil 2.4) Sürdürülebilirliğin yapı sektöründe uygulanabilirliğiyle ilişkili pek çok standart mevcuttur. (Çizelge 2.2- Çizelge 2.3)



Şekil 2.4 : Yapı ve yaşam döngüsü ilişkisi (Url-1).

Çizelge 2.2 : Sürdürülebilirlik hakkında standartlar.

Standartlar	Kabul Tarihi
ISO 15392 Sustainability in Building Construction – General Principles	01.05.2008
ISO 21931-1 Sustainability in Building Construction – Framework For Methods of Assessment of The Environmental Performance of Construction Works – Part 1: Buildings	15.06.2010
ISO/TS 21929-1 Sustainability in Building Construction – Sustainability Indicators – Part 1: Framework for The Development of Indicators for Buildings	01.03.2006
ISO 16813 Building Environment Design – Indoor Environment – General Principles	15.05.2006
ASTM E 2432-05 Standard Guide for General Principles of Sustainability Relative to Buildings	15.08.2005
ASTM E 2114-08 Standard Terminology for Sustainability Relative to The Performance of Buildings	01.11.2008

Çizelge 2.3 : Yaşam döngü değerlendirmesi hakkında standartlar.

Standartlar	Kabul /Kalkış Tarihi
Yürürlükte Olan Standartlar	
TS EN ISO 14040 Çevre Yönetimi – Hayat Boyu Değerlendirme – İlkeler ve Çerçeve	19.06.2007
TS EN ISO 14044 Çevre Yönetimi – Hayat Boyu Değerlendirme – Gereklere ve Kılavuz	19.06.2007
ISO 14040 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework	01.07.2006
ISO 14044 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines	01.07.2006
ISO/TR 14047 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Examples of Application of ISO 14042	01.10.2003
ISO/TR 14048 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Data Documentation Format	01.04.2002
ISO/TR 14049 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Examples of Application of ISO 14041 to Goal and Scope Definition and Inventory Analysis	15.03.2000
Yürürlükten Kalkan Standartlar	
TS EN ISO 14041 Çevre Yönetimi – Hayat Boyu Değerlendirme – Amaç ve Kapsam Tarihi ile Envanter Analizi	19.06.2007
TS EN ISO 14042 Çevre Yönetimi – Hayat Boyu Değerlendirme – Hayat Boyu Etki Değerlendirmesi	19.06.2007
TS EN ISO 14043 Çevre Yönetimi – Hayat Boyu Değerlendirme – Hayat Boyu Yorumu	19.06.2007
ISO 14041 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Goal and Scope Definition and Inventory	30.06.2006
ISO 14042 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Life Cycle Impact Assessment	30.06.2006
ISO 14043 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Life Cycle Interpretation	30.06.2006
ISO 14041, ISO 14042, ISO 14043, TS EN ISO 14041, TS EN ISO 14042, TS EN ISO 14043 standartları ISO 14040, ISO 14044, TS EN ISO 14040 ve TS EN ISO 14044 standartlarının yürürlüğe girmesiyle kalkmıştır.	

Sürdürülebilirlik kavramını benimseyerek yapılaşmanın sağlıklı bir şekilde gelişmesi için sertifika sistemleri ve YDD hesaplama araçları oluşturulmuştur. Leed, Bream, Yeşil Yıldız, Sbttool, Casbee ve Greenstar gibi farklı ülkelerin oluşturduğu sertifika programları ve Athena, BEAT, BEES, Ecoinvent, GaBi, SimaPro, TEAM, MIPS gibi YDD hesaplama araçları ASTM, ISO gibi belli başlı standartları kabul ederek yapıları enerji, malzeme, su kullanımı, ulaşım, arazi kullanımı, hava kalitesi ve iç mekân kalitesi gibi konuları değerlendirmektedir. Ülkemizde 2017 yılının 23 Aralık da “Binalar ile Yerleşmeler için Yeşil Sertifika Yönetmeliği” ismiyle Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiş sertifika sistemi bulunmaktadır. Bazı ülkeler yapı yapımında bu sertifikaların alınmasını zorunlu hale getirmiştir. Sertifika sistemleri yapı malzemesi başlığı altında çeşitli kriterlere sahiptirler.

2.1 Yapı Malzemesi Olarak Konvansiyonel Beton

TS 802’ye göre, beton; çimento, agrega, su ve ihtiyaca göre mineral ve kimyasal olmak üzere katkıların uygun oranlarla karıştırılmasıyla elde edilen homojen yapılı bir yapı malzemesidir. Beton karıştırıldıktan sonra plastik yapılıdır, kalıp ile şekil verilebilir ve katı halde mukavemet sağlar (TS 802). Beton, üç fazlı kompozit yapı malzemesidir. Bu fazlar, çimento, agrega ve sudur. Çimento ve suyun karıştırılmasıyla çimento hamuru oluşturulur. Oluşan çimento hamuruna agrega eklenerek beton oluşturulur (Bedirhanoğlu, 2011). Betonun içerisindeki bileşenlerin işlevleri şu şekildedir; çimento-bağlayıcı görevine, iri agrega-üklerin taşınması görevine, ince agrega-boşlukların doldurulması görevine, su-işlenebilirlik ve hidrasyon görevine, katkıların betonun özelliklerini geliştirme görevine sahiptir. Betonun %70’i agrega, %18 - %20’si su ve %10 - %12’si çimento ve az miktarda havadan oluşur (Yazıcı, 2016). Betonun özelliklerinin iyileştirilmesi ve çimento miktarının azaltılması için puzolan takviyesi yapılmaktadır. Bu durumda puzolan takviyesi çimentonun yarısı kadar takviye edilebilir. Çizelge 2.4’te Türkiye’de 1996-2012 yılları arasında kullanılan betonların sınıflandırılması görülmektedir. Yıllar ilerledikçe kullanılan beton özelliklerinin iyileştirildiği görülmektedir. Tüketilen betonların kullanım oranları dayanımı yüksek beton tercih edilmeye başlanmıştır.

Çizelge 2.4 : Türkiye’de 1996-2012 yılları kullanılan betonların sınıflandırılması
(Arslan, 2016).

Kullanılan Beton Sınıfları	C14 (%)	C16-18 (%)	C20 (%)	C25 (%)	C30+ (%)
1996	37,5	52,3	6,4	3,4	0,6
1997	27	51,1	12	7,6	2,3
1998	24,4	45,4	18	8,1	4,1
1999	22,7	35,9	227,6	10,3	3,3
2000	11,5	25,1	41,3	13,2	4,9
2001	7	21,3	47,9	18	5,8
2002	5,9	21,1	46,9	19,2	6,9
2003	4,6	14,7	39,6	25,4	15,7
2004	3,3	10,3	40,6	30,7	15,1
2005	3,2	8,4	31,2	42,1	15,1
2006	2,92	7,66	35,9	36,56	17,77
2007	2,85	5,58	26,95	35,25	29,37
2008	2,76	5,51	22,13	38,76	30,84
2009	2,44	3,44	23,9	36,1	34,12
2010	1,99	2,39	14,62	38,45	39,33
2011	2,2	2	14,6	43,7	37,1
2012	1,6	2,2	14,2	43,1	38,4

2.1.1 Konvansiyonel betonun tarihçesi

Hidrolik bağlayıcıların Roma döneminde kullanılmaya başlandığı düşünülmektedir (Url-2). Vitruvius’un “Mimarlık Üstüne” isimli eserinde kireç taşının küçük taşlarla olan birleşiminde sert ve monolitik bir kütlenin oluştuğu anlatılmaktadır (Croft, 2004). Bağlayıcının geliştirilmesi üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. 1796 yılı itibariyle J. Parker ve J. Frost tarafından killi kalkerli malzemelerin pişirilmeleri sonucu doğal çimento üretilmiştir. Sonrasında duvar ustası olan J. Aspdin tarafından günümüzde kullanılan portland çimentosu bulunmuştur. Aspdin, kalker tozu ve kili karıştırıp pişirmiş ve öğütmüştür. Öğütme işlemi sonrasında ortaya çıkan toza su ekleyerek hamurlaşmasını sağlamıştır. Sonrasında hamura taş parçaları katmıştır. Oluşan karışımın rengi ve özellikleri o yıllarda Portland adasından çıkartılan yapı taşına benzediği için 1824 yılında “Portland Çimentosu” adı ile patent almıştır (Url-2).

1850’li yıllar itibariyle beton içerisinde demir çubuk kullanımı denemeleri başlamıştır. Böylelikle “betonarmenin” temelleri atılmıştır. Betonarme ilk bina W.E.Ward tarafından 1873’te New York’ta inşa edilmiştir (Url-3). Beton kullanımı takip eden yıllarda artmıştır. Betonarme Le Corbusier gibi mimarlar tarafından kullanılmaya başlamıştır. Bu hızlı yaygınlaşmayla birlikte “Brütalizm” akımı ortaya çıkmıştır. Akım yapısal sorunların ortaya çıkmasıyla birlikte popülerliğini kaybetmiştir.

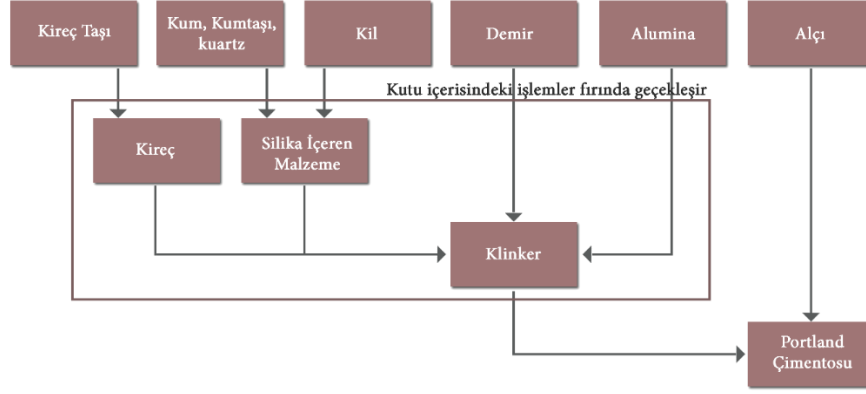
Teknolojinin gelişmesiyle birlikte gelişen betonun yapısına katılabilen ürünler üretilmiştir. Bahsi geçen ürünler mineral ve kimyasal olarak iki gruba ayrılan katkılardır. Bu katkıları; uygulamayı kolaylaştırır aynı zamanda dış ortam şartlarının beton üretimindeki olumsuz etkisini azaltmaktadır. Uçucu kül gibi katkıları beton üretimindeki çevresel etkiyi azaltmaktadır.

2.1.2 Konvansiyonel betonun bileşenleri ve üretimi

Konvansiyonel betonu oluşturan başlıca bileşenler: çimento, su ve agregadır. Renk, akışkanlık ve kir tutmama gibi istenilen farklı özelliklerin karşılanması için katkı malzemeleri ilave edilmektedir. Her bir bileşenin kendi içerisinde sağlaması gereken fiziksel ve mekanik özellikler vardır. Beklenen özellikler standartlar ve yönetmeliklere uygun olmalıdır.

Çimento

TS EN 197-1, 2009’da bahsedildiği üzere çimento, su ile karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonları geçirerek priz alan bir hidrolik bağlayıcıdır. Sırasıyla hamurlaşır (pasta) ve sertleşir. Sertleşme sonrası suya dahi dayanım ve kararlılığını koruyan bir yapıya sahip olur (TS EN 197-1). Yaklaşık %75 Kalker (CaO) ve %25 Kil’in (SiO_2 ve Al_2O_3) karıştırılarak $1.400\text{ }^\circ\text{C}$ civarında sıcaklığı bulunan döner fırında kademeli olarak pişirilmesinin ardından oluşan ürüne “klinker” denilmektedir. Bağlayıcılık özelliğine sahip olması için Klinker’in öğütülmesi gerekmektedir. Böylelikle su ile temas ettiği zaman bağlayıcılık özelliği kazanan bir malzemeye dönüşmektedir (Dinçer, 2013, Alkan 2018, Memişoğulları, 2019). Çimentonun priz süresini arttırmak için klinker oluşturulurken %3 - %6 oranında alçı taşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) eklenmektedir (Ersoy ve Özcebe, 2004). Portland çimentosu üretim süreci Şekil 2.5’te verilmiştir.



Şekil 2.5 : Portland çimentosu üretim süreci (Demkin, 1996).

Çimento su ile birleştiği zaman kimyasal tepkimeler meydana gelmekte ve çimento hamuru (pastası) oluşmaktadır. Akışkan yapı beton karışımındaki boşlukları doldurur ve kompozit bir malzeme olan betonun tek bir malzeme gibi davranmasını sağlar. Su altında bile katılaşabilen, su da erimeyen çimento harcı katılaştığı zaman da suya dayanıklı bir malzeme olmaktadır.

TS EN 197-1'e göre genel çimentolar 27 farklı tipe ayrılmış ve sınıflandırılmıştır. Çimentonun türü, kalitesi, hidratasyon hızı, hidratasyon sırasında ortama salınan ısı miktarı ve ısıнын yayılım hızı çimentoyla oluşturulmuş betonun dayanıklılığı, genişleme ve büzülme gibi hacim değişiklikleri kullanılacak çimentonun seçiminde önemli rol oynamaktadır. Bahsedilen özellikler çimento içerisinde bulunan ana maddelerin ve katkı malzemelerinin karışım miktarları ile değişmektedir. Eklerde bulunan Çizelge A.1.1'deki sınıflandırma buna göre yapılmıştır (TS EN 197-1).

Genel çimento tipleri dışında özel kullanım amacıyla üretilen çimento tipleri de bulunmaktadır. En çok kullanılan çimento tipleri ve sınıfları sırasıyla: portland kompoze çimento, sülfata dayanıklı çimento ve katkılı çimento ve beyaz portland çimentodur (TS EN 197-1).

Betonu oluşturan malzemeler içerisinde üretiminde yüksek sıcaklıklar kullanıldığı için maliyeti en yüksek bileşen çimentodur. Çimento miktarını azaltmak için puzolan kullanılmaktadır. Beton üretiminde puzolanik özelliği olan malzemelerin kullanılması betonun performansı üzerine olumlu etkileri mevcuttur (Hamalı, 2007). Bu özelliklere örnek olarak, betonun tazeyken kolay yerleşmesi ve aderansın artması verilebilir. Türkiye'de çimento üretimi kapasitesi 2018 verilerinin üzerine 3 milyon tonluk bir artışla 143,7 milyon ton, klinker kapasitesi ise 2018 verilerine göre 2 milyon tonluk artışla 91,6 milyon ton olmuştur (Url-4). İlgili standartlar Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.5 : Çimento ile ilgili Türk standartlar.

Standartlar	Kabul Tarihi
TS EN 197-1 Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri	12.04.2012
TS EN 197-2 Çimento - Bölüm 2 : Performans sürekliliğinin değerlendirilmesi ve doğrulanması	02.07.2020
TS EN 413-1 Harç çimentosu- Bölüm 1: Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri	22.11.2011
TS EN 196-1 Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini	11.07.2016
TS EN 196-2 Çimento deney yöntemleri - Bölüm 2: Çimentonun kimyasal analizi	18.12.2013
TS EN 196-3 Çimento deney yöntemleri - Bölüm 3: Priz süreleri ve genleşme tayini	09.01.2017
TS EN 196-5 Çimento deney yöntemleri - Bölüm 5: Pozolanik çimentolarda pozolanik özellik deneyi	08.03.2012
TS EN 196-6 Çimento deney yöntemleri - Bölüm 6: İncelik tayini	03.02.2020
TS EN 196-7 Çimento deney yöntemleri - Bölüm 7: Çimentodan numune alma ve hazırlama yöntemleri	09.04.2009
TS EN 196-8 Çimento deney metotları - Bölüm 8: Hidratasyon ısısı - Çözelti metodu	13.07.2010
TS EN 196-9 Çimento deney yöntemleri - Bölüm 9: Hidratasyon ısısı - Yarı adyabatik yöntem	14.07.2011
TS EN 196-10 Çimento deney yöntemleri - Bölüm 10: Çimentonun suda çözünebilir krom (vı) muhtevasının tayini	11.07.2016
TS EN 196-11 Çimento deney yöntemleri - Bölüm 11: Hidratasyon ısısı - İzotermal kondüksiyon kolorimetre yöntemi	16.12.2019
TS 25 Doğal pozolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan-Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri	25.12.2008
TS 25/T1 Doğal pozolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan-Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri	14.07.2011
TS EN 14647 Çimento- Kalsiyum aluminatlı- Birleşim, özellikler ve uygunluk kriterleri	04.12.2008

Çizelge 2.5 (Devam) Çimento ile ilgili Türk standartlar.

Standartlar	Kabul Tarihi
TS EN 14216 Çimento - Özel çimentolar - Çok düşük ısı - bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri	23.10.2015
TS EN 14227-1 Hidrolik bağlayıcı karışımlar - Özellikler - Bölüm 1: Çimento bağlayıcı taneli karışımlar	18.12.2013
TS 537 Çimentolu kerpiç bloklar - Duvarlar için	30.10.1985
TSE CEN/TR 196-4 Çimento deney metotları - Bölüm 4:Bileşen miktarının tayini	22.05.2008
TSE CEN/TR 16632 Çimento - Hidratasyon ısısının tayini için sabit sıcaklıkta kondiksyon kalorimetresi (ICC) - Yeni gelişmeler raporu ve Öneriler	30.10.2014
TSE CEN/TR 14245 Çimento - EN 197-2'nin uygulanması için kılavuz : Performans sürekliliğinin değerlendirilmesi ve doğrulanması	02.07.2020
TS 21 Çimento - Beyaz portland çimentosu - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri	27.08.2015
TS 2518 Sertleşmiş betonda Portland çimentosu dozajının tayini için deney yöntemi	25.04.2013
TS 11052 Çimento deney yöntemleri- Genleşme tayini- Otoklav yöntemi	23.10.2015

Agrega

Kırma taş, çakıl, kum gibi beton harcına katılan malzemelere agreg a ismi verilmektedir. Beton içerisinde %70 - %80 civarında bir hacim kaplamaktadır. Agregalar danelerine göre kaba ve ince olmak üzere ikiye ayrılırlar (Url-5). Agregalar doğal, yapay ve geri kazanılmış olmak üzere 3 tipe sahiptirler. Doğal agregalar, mekanik işlem dışında işlem görmeyen agregalardır. Yapay agregalar, endüstriyel işlem sonucu elde edilmiş agregalardır. Geri dönüştürülmüş agregalar, önceden yapılarda kullanılmış işlemlerden geçirilmesi sonucu elde edilirler. Agreganın kirli olması (kil, silt, mil, toz vb.) aderansı azaltmakta ve su emme ihtiyacını arttırmaktadır. (Çizelge 2.6)

Agregaların, granülometresi, maksimum tane boyutu, tane şekli ve dokusu, zararlı maddelerin türü ve miktarı, aşınma direnci, dona dayanıklılığı, bünyesindeki su

miktarı, su emme kapasitesi, birim ağırlığı ve özgül ağırlığı gibi özellikleri betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini direkt etkilemektedir. TS 706 EN 12620'ye göre betonda kullanılacak agregalar seçilmelidir. Agregalar için aranan özellikler şunlardır:

- Basınca ve aşınmaya karşı mukavemetli olmalarıdır.
- Çimentoyla zararlı reaksiyona girmemeleridir.
- Sert ve dayanıklı olmalarıdır.
- Toz, toprak ve betona zarar verebilecek maddeler içermemeleridir.
- Yassı ve uzun taneler içermemeleridir.
- Zayıf taneler içermemeleridir. (deniz kabuğu, odun, kömür, vs.)

Çizelge 2.6 : Agregalar ilgili Türk standartlar.

Standartlar	Kabul Tarihi
TS 699 Doğal yapı taşları - İnceleme ve laboratuvar deney yöntemleri	26.03.2009
TS EN 1467 Doğal taşlar - Ham bloklar - Özellikler	05.06.2012
TS EN 1342 Dış zemin döşemeleri için tabii parke taşları - Özellikler ve deney metotları	10.04.2013
TS 5695 Yapı ve kaplama taşları - Tabii - Sınıflandırma	05.04.1988
TS 11137 Kireçtaşı (kalker)- Yapı ve kaplama taşı olarak kullanılan	16.11.1993
TS 706 EN 12620 Beton Agregaları	28.04.2009
Agrega Numunelerinde Uygulanması Gereken Standartlar	
TS 706 EN 12620 Beton Agregaları	28.04.2009
TS EN 932-1 Agregaların Genel Özellikleri için Deneyler – Kısım 1 Numune Alma Metotları	25.02.1997
ASTM C 33/C33M-18 Standard Specification for Concrete Aggregates	2018

Karışım Suyu

Su, kuru haldeki çimentonun hidrasyonu ve agregalar ile aderans yapmasıyla plastik işlenebilir bir kütle sağlamakta ve sonrasında çimento ve agreganın reaksiyonuyla plastik kütlenin sertleşmesini sağlamaktadır. Kaynaklarda beton üretiminde içilebilir su kullanılması gerektiğinden bahsedilmiştir. Çizelge 2.7'de beton suyunun

özellikleri verilmiştir. Dayanımda önemli rol oynayan su TS EN 206 ve TS EN 1008'e uygun olmalıdır (Özkul ve diğ, 1999).

Çizelge 2.7 : Betonda kullanılan karma suyunun özellikleri (Arslan, 2016).

Özellik	Kabul Şartı
Deterjanlar	Herhangi bir köpük iki dakika içerisinde kaybolmalı.
Renk	Geri kazanılan suların dışında rengi açık sarıdan daha açık olmalı
Askıda katı madde miktarı	Geri kazanılan suların dışında 4ml'den az olmalı
Koku	Geri kazanılan sularda içinde çimento veya yüksek fırın cürufu çimento olması halinde az bir miktar sülfür dışında koku bulunmamalıdır. Diğer sularda içilebilir sularda bulunan dışında herhangi bir koku bulunmamalı, hidroklorik asit eklendiğinde hidrojen sülfür kokusu alınmamalıdır.
Asitler	pH $\geq$ 4 olmalıdır
Organik Madde	NaOH eklendiğinde renk, sarıya dönük kahverengi veya daha açık olmalıdır.

Katkı Maddeleri

Betona, hızlı priz, akışkanlık, kir tutmama gibi istenilen farklı özelliklerin karşılanması için katkı malzemeleri ilave edilmektedir. Az miktarda ilave edilen bu katkıları iki gruba ayırırlar; kimyasal ve mineral katkıları (Url-6). Katkı maddeleri ağırlıkça ikame edilir. Bu oranlar genel olarak Çizelge 2.8 gibidir (Eriç, 2010). Taze ve sertleşmiş olarak 2 farklı döneme sahip beton için katkı maddelerinin faydaları farklıdır (Çizelge 2.9).

Çizelge 2.8 : Katkı maddeleri oranları (Eriç, 2010).

Katkı	Yüzdesi Alınan Malzeme	%
Puzolan	Çimento	10-30
Su İtici	Çimento	0,1-0,2
Sertleşmeyi Hızlandıran Mal.	Çimento	2
Hava Sürükleyici	Çimento	0,005-0,05

Çizelge 2.9 : Katkı maddelerinin faydaları (Memişoğulları, 2019).

Taze Beton	Sertleşmiş Beton
*Betonun sertleşme sürecinin uzamasını veya kışalmasını sağlamak	*Hidratasyon sırasında ortama salınan ısıyı azaltmak ya da geciktirmek
*Beton içerisinde serbest kalan suyun yüzeye çıkmasından dolayı oluşacak dayanım kaybını (kusma) önlemek	*Çevresel etkilerin zararlarına karşı oluşacak sorunları (hacimsel stabilite) önlemek
*Segregasyonu (ayırışma) önlemek veya kontrol altına almak	*Possion oranı, elastisite ve kayma modülü, ısıl genleşme gibi mekanik öz. iyileştirmek

Çizelge 2.9 (Devam) : Katkı maddelerinin faydaları (Memişoğulları, 2019).

Taze Beton	Sertleşmiş Beton
*Akışkanlık kaybını yavaşlatmak	*Aderansı artırmak
*Pompalanabilirliği artırmak	*Boşluk oranını (geçirimsizlik) azaltmak
*Su oranı sabit tutularak ya da azaltılarak işlenebilirliği arttırmak.	*Alkali-silika reaksiyonunu kontrol altına almak
	*Dayanım kazanma hızını artırmak
	*Nihai dayanımı ve dayanıklılığı arttırmak
	*Donatı korozyonunu azaltmak
	*Katkısız betona göre daha ekonomik beton elde etmek

Mineral katkıları, çoğunlukla toz olan mineral katkıları başlıca cüruf, uçucu kül, silis dumanı gibi maddelerin genel ismidir. Kendi başlarına bağlayıcılığı olmayan bu katkıları ikame edildikleri beton harçlarında çimento kullanımını azaltır, işlemeyi kolaylaştırır, geçirimsizliği azaltır bu sayede hidrasyon ürünlerinin oluşumuna katkı sağlar ve basınç gibi pek çok özelliği iyileştirir. Doğal ve yapay olarak iki çeşidi vardır.

Kimyasal katkıları çoğunlukla sıvı halde bulunan katkı maddeleridir. Betonda kimyasal ya da fiziksel değişiklik yapmak istenildiği zaman tercih edilir. Doğal ve yapay olarak iki çeşidi vardır. TS EN 934-2+A1'e (*Kimyasal katkıları- Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme*) göre kimyasal katkıların tipleri aşağıdaki gibidir.

- Su azaltıcı/akışkanlaştırıcı
- Yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı
- Hava sürükleyici
- Su geçirimsizlik katkıları
- Su tutucu katkıları
- Sertleşme hızlandırıcı
- Priz hızlandırıcı/priz geciktiricidir.

Beton üretimi, şantiye veya fabrikadan hazırlanarak gerçekleştirilmektedir. Günümüzde hazır beton kullanılmaktadır. Beton üretimi başlıca "Betonun Bileşenleri" başlığında bahsedilen malzemelerin birleşmesiyle gerçekleşir. Üretim esnasında harca katılacak malzeme oranı mühendisler tarafından basınç mukavemeti, sıkıştırma oranı ve geçirimsizlik gibi pek çok konuya bağlı olarak hesaplanır. 24.03.2016 Tarihli TS 802'ye uygun olarak hesaplanmalıdır.

Beton üretimi; öncelikle kullanılacak malzemelerin hazırlanması sonra ölçülmesi ve karıştırılması ardından dökülecek yere taşınması ve dökülmesidir. Dökülen beton yerleşir ve bakım yapılır (Eriç, 2010).

Çimento, rutubetsiz ve üstü kapalı bir hacimde depolanması gerekmekte ve agregaların iyi ayrıştırılmış olması gerekmektedir. Agregalar genellikle hacimce ölçülür fakat rutubetli oluşu hacmini etkilediğinden dolayı hesapları değiştirebilir. Bundan dolayı, agregayı ağırlıkça ölçmek daha iyi sonuç verir. Çimento da karışıma ağırlıkça, su ise litre şeklinde katılmaktadır (Eriç, 2010). Taze ve sertleşmiş betondan beklenen özellikler farklıdır. Bu özelliklerin tayini Çizelge 2.10'deki standartlara göre yapılır.

Çizelge 2.10 : Beton deneyleriyle ilgili standartlar.

Standartlar	Kabul Tarihi
Taze Beton	
TS EN 12350-2 Beton ve Taze Beton Deneyleri Bölüm 2: Çökme (slump) Deneyi	30.09.2019
TS EN 12350-3 Beton ve Taze Beton Deneyleri Bölüm 3: Vebe Deneyi	30.09.2019
TS EN 12350-4 Beton ve Taze Beton Deneyleri Bölüm 4: Sıkıştırılabilirlik Derecesi	30.09.2019
TS EN 12350-5 Beton ve Taze Beton Deneyleri Bölüm 5: Yayılma Tablası Deneyi	30.09.2019
Sertleşmiş Beton	
TS EN 12390-3 Beton ve Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini	30.09.2019
TS EN 12390-5 Beton ve Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini	30.09.2019
TS EN 12390-6 Beton ve Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini	30.09.2019
ASTM C 496/C496M-17 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens	2017
ASTM C293/C293M-16 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)	2016

2.1.3 Konvansiyonel betonun performansı

Rönesans'tan beri kullanılan betonun yaygın olarak tercih edilmesinin birçok nedeni vardır. Kullanım miktarının çokluğu ve kullanılan zaman dilimi düşünüldüğünde beton hayatımızda önemli bir yere sahiptir. Her malzemede olduğu gibi betonun da avantajları ve dezavantajları vardır.

Konvansiyonel Betonun Avantajları: (Erdoğan, 2010)

- Ekonomiktir.
- Katkı maddeleriyle estetik amaçlarla kullanılabilir.
- Çelik donatılarla kullanılabilir.
- Dış ortam koşullarına dayanıklıdır.
- Bakım masrafı azdır.
- Yüksek basınç dayanımına sahip tasarımı yapılabilir.
- Prekast olarak üretilir.
- Plastik özelliğini belli bir süre koruyabildiği için istenilen form verilebilir ve forma müdahale edilebilir.

Konvansiyonel Betonun Dezavantajları: (Erdoğan, 2010).

- Çekme ve eğilmeye karşı direnci düşüktür.
- Gevrek yapıya sahip olmasından dolayı darbeye karşı dayanıksızdır.
- Çevre ısısı kaynaklı hacim değişikliği gösterebilir.
- Dayanım/ağırlık oranı diğer yapı malzemelerine göre az olmalıdır.
- Sabit yükler tarafından deformasyona uğrar.
- Su veya zararlı kimyasallar geçirebilir.

2.1.4 Konvansiyonel betonun sınıflandırılması

Rönesans'tan bu yana çalışılan beton, teknolojinin gelişmesiyle çeşitlenmiştir. Yapılan çalışmaların artması ve sanayinin gelişmesi beton teknolojisini doğrudan etkilemektedir. Genel olarak betonlar, yoğunluklarına, üretim yerlerine, basınç dayanımlarına göre sınıflandırılmaktadır. Diğer türlerine “Özel Beton” denilmektedir. Böylelikle 4 başlık olarak incelenmektedir. Çizelge 2.11’de beton türlerine yer verilmiştir.

Çizelge 2.11 : Beton türleri (Kayhan ve Özgünler Acun, 2021).

Beton Türleri	Basınç Dayanımına Göre	Düşük Dayanımlı Betonlar
		Normal Dayanımlı Betonlar
		Yüksek Dayanımlı Betonlar
	Birim Ağırlıklarına Göre	Hafif Beton
		Normal Beton
		Ağır Beton
	Üretildikleri Yere Göre	Şantiye betonu
		Hazır Beton
		Lifli beton
	Özel Betonlar	Kütle beton
		Vakumlu beton
		Püskürtme beton
		Ferrocement beton
		Silindirle sıkıştırılmış beton
		Kendiliğinden Yerleşen Beton
		Hava Sürükleyici Katkılı Beton

2.1.5 Sürdürülebilir beton

Betonun bir yapı malzemesi olarak rekabet gücünü sağlamak için beton yapıların sürdürülebilirliğinin geliştirilmesi önemli ve gereklidir. Beton uzun süreli kullanımıyla sürdürülebilir bir malzeme olarak bazı kaynaklarda bahsedilse de içerisindeki malzemelerinin üretimindeki gömülü enerji (ECO_2) ve hammadde kullanımı fazla olduğundan dolayı iyileştirilmesi gereken bir malzemedir. Bünyesinde bulunan kıt kaynakların kullanımının azaltılma potansiyeli vardır. Uygun bileşen ve uygun oran elde edildiği zaman bir diğer deyişle karışım tasarımı optimizasyonu doğrudan kazanım elde edilerek beton endüstrisindeki tüketim ve CO_2 salınımı azaltılabilir. Daha önce de bahsedildiği üzere beton, üç fazlı (bağlayıcı-

agrega-su) kompozit yapı malzemesidir. Yapı üretiminde beton donatıyla birleştirilerek betonarme oluşturulur. Betonarme yapımında kullanılan çelik malzeme ilk somutlaşma enerjisi yüksek bir malzemedir. Sürdürülebilir beton ve sürdürülebilir betonarme arayışında bağlayıcı, agrega ve su olmak üzere üç faz ve donatı oranları değiştirilmeye çalışılmıştır. Fazların değiştirilmesi için kullanılan yöntemler Çizelge 2.12 gösterilmiştir.

Çizelge 2.12 : Sürdürülebilir beton yaklaşımları (Kayhan ve Özgünler Acun, 2021).

		Değiştirilen Faz	Kullanılan Yöntem
Betonarme	Beton	Bağlayıcı	Puzolan Kullanmak
			Magnezyum Oksit Kullanmak
		Agrega	Geri Dönüştürülmüş Agrega Kullanmak
			Geri Dönüştürülmüş Su Kullanmak
	Donatı	Su	Süper Akışkanlaştırıcı Kullanmak
			Ultra Yüksek Performanslı Beton Kullanmak

Bağlayıcı Değiştirmek:

Beton üretiminde ilk somutlaşma enerjisi (CO_2) en yüksek olan faz bağlayıcı olarak kullanılan çimentodur. Çimentoyu azaltmaya çalışmak ya da çimento üretimindeki enerji gereksinimini azaltmaya çalışmak çok yaygın yaklaşımlardandır. Çimento üretiminde yaklaşık 1.400 °C sıcaklıkta fırın kullanılmaktadır. Bu bağlamda aşağıdaki yaklaşımlar denenmektedir.

Puzolan Kullanmak: Endüstriyel atık olan uçucu kül (UK), silis dumanı, metakaolin (MK750) ve yüksek fırın cürufu (YFC) gibi yan ürünler gereksiz doğrudan kullanım alanları olmamalarının yanı sıra puzolanik özellik gösteren malzemelerdir. Betonun özelliklerinin iyileştirilmesi ve çimento miktarının azaltılması için puzolan takviyesi yapılmaktadır. Bu durumda puzolan takviyesi çimentonun yarısı kadar ikame edilebilir. Oluşan çimentoya katkılı çimento denilmektedir. The Concrete Center'ın yayınlamış olduğu belgelerde, (MPA 2008a, MPA 2008b) kullanılan bağlayıcıya göre C28/35 betonun CO_2 değerinin değişimi incelenmiştir. Normal portland Çimentosuyla oluşturulan beton 120 kg CO_2 /ton iken %70 Normal PÇ + %30 Uçucu

Kül 85 kg CO₂/ton ve %50 Normal PÇ + %50 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu 65 kg CO₂/ton bulunmuştur.

Magnezyum Oksit Ekleme: 1.400 °C sıcaklık ihtiyaç duyan çimento bünyesine reaktif magnezyum oksit katılması fırın ısısının 750 °C'a kadar düşürebilmektedir. Böylelikle yakıt tasarrufu ve CO₂ salınımı azalmaktadır (Smith, 2006). Daha az alkali özelliğe sahip olmaları nedeniyle endüstriyel atıkların ve yan ürünlerin (UK, YFC vb.) agregası olarak kullanılmasına olanak vermektedir. Betondan beklenen özelliklerden biri zaman içerisinde taşlaşmasını ve dayanımını sağlamasıdır. MgO eklenmiş betonlar hızlı karbonlaşabildiğinden avantajlıdır. Diğer bir yandan MgO'nun yaygın bulunan bir malzeme olmaması bu yaklaşımın sınırlı kalmasına neden olmaktadır (Orhon, 2013).

Agregası Fazını Değiştirmek:

Geri Dönüştürülmüş Agregası Kullanmak: Atık agregaları beton üretiminde kullanılabilir. Geri dönüştürülmüş agregası kullanımı su tüketimini arttırmaktadır. Çalışmalar sonucunda agregası fazının değiştirilmesi konusunda kesinlik ve standart daha oluşturulmamıştır.

Su Fazını Değiştirmek:

Geri Dönüştürülmüş Su Kullanmak: Türkiye Hazır Beton Birliğinin yayınlamış olduğu Türkiye Hazır Beton Sektörü istatistik raporuna göre ERMCO (European Ready Mixed Concrete Organization) üyesi olan 20 ülkenin 2019 yılı beton üretimi 370,8 milyon m³'tür. Bunun 77 milyon m³ Türkiye'de üretilmiştir. Avrupa ülkelerinin yanı sıra Rusya'da 38, ABD'de 280, Güney Amerika'da 134,5, Japonya'da 84,8 milyon m³ beton üretilmiştir. Raporda bahsi geçen 24 ülkenin toplam beton üretimi 908,1'dir (Url-7). Yıkama, temizleme, bertaraf gibi çeşitli sebeplerden 1 m³ beton üretimi için 50 lt su kullanılmaktadır (Coşkun ve diğ, 2017). 908.100.000 m³/yıl x 50 m³/lt = 45.405.000.000 lt/yıl su kullanılmaktadır. Yapılan bir çalışmada (Coşkun ve diğ, 2017) görüldüğü üzere içerisindeki katı atıkların tamamen giderilememesinden dolayı geri dönüştürülmüş su kullanımı temiz su kullanımının %100 yerine geçememektedir. Fakat içerisinde çimento ve taş tozu gibi faydalı malzemeleri barındıran gri su kullanımı üzerinde durulmuştur. Gri su bünyesinden, Kademeli Çökertme Havuzları, CLR-S (Contaminated Liquids Recycling System) Sistemi gibi sistemler atık bertarafı sağlanabilir. Yapılan

çalışmada gri su içerisinde kalan atık malzemelerin ince agrega olarak kabulü söz konusudur bu durumda su ve kum kazanımı elde edilmiştir. Yapılan; sıcaklık, birim ağırlık, slump, hava miktarı, 2-7-28 günlük basınç dayanımı ve sülfat direnci deneylerinde önemli bir farklılık görülmemiştir.

Süper Akışkanlaştırıcı Kullanmak: Betonun çevresel etkisi mümkün olduğunca düşük ve aynı zamanda mukavemet performansı yüksek olmalıdır. Bağlayıcı fazının bir başka deyişle çimentonun beton içerisindeki partikül dağılımının homojen olması ve aktivasyonu önemlidir. Su ile karıştırılmasındaki temel amaç budur. Bir diğer yandan su eklenmesi beton içerisindeki çimento miktarını arttırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Süper akışkanlaştırıcılar çimento partiküllerinin dağılımlarının daha optimize olmasını sağlamaktadır. Su ihtiyacını azalmaktadır. Ayrıca geçirgenliği azaltmaktadır. Dolayısıyla beton harcının içerisindeki su ve çimento ikamesi azalarak karbon ayak izi azaltılmaktadır. Yapılan bir çalışmada (Kılıç, 2014) süper akışkanlaştırıcı ve yüksek oranda su azaltıcı kullanılan betonlarda basınç dayanımında %22 - %49 oranında belirgin oranda artış görülmüştür. Çökme deneylerinde %22 ve ultra ses geçiş hızında %2,7 - %6 oranlarında artış görülmüştür.

Donatı Oranını Değiştirmek:

Ultra Yüksek Performanslı Beton Kullanmak: CO₂ salınımını azaltmak için bir diğer yaklaşım da “Ultra Yüksek Performanslı Beton-Ultra-High Performance Concrete (UHPC)” kullanmaktır. İçerisinde bulunan metalik veya organik lifler kullanılan donatı ihtiyacını azaltmaktadır. Konvansiyonel betonarmeyle kıyaslandığı zaman 6-8 kat basınç dayanımı daha fazladır. Aynı şartlarda üretilecek konvansiyonel betonarme yapı ve UYPB yapının yapısal eleman kesitleri kıyaslandığı zaman UYPB kesitleri daha narindir. Kullanılan birim çelik donatı ve beton harcı azalmasından dolayı Ultra Yüksek Performanslı Beton karbon ayak izi (CO₂ salınımı) bakımından daha az salınım yapmaktadır (Orhon, 2013).

2.2 Sürdürülebilir Beton Bağlamında Jeopolimer

1970-1993 yıllarında organik esaslı plastikten kaynaklı çıkan yangınlara çözüm bulma arayışıyla çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda jeopolimer isimlendirilmiş ve üzerine çalışılmaya başlanmıştır.

Çimento, üretimi sırasında çevresel etkisinin fazla olması, dış etkenlere yeterli dayanıklılık gösterememesi ve maliyeti konularında olumsuz özelliklere sahiptir.

Çevresel ve ekonomik sorunlara sahip çimento yerine alternatif bağlayıcılar araştırılmaktadır (Topçu ve Toprak, 2009). Bu araştırmalarda çimento miktarını azaltmak için beton harcındaki malzeme ikameleri değiştirilmekte, puzolan ikamesiyle bağlayıcı miktarı düşürülmekte ve alternatif bağlayıcı arayışı gözlenmektedir. Jeopolimer beton, harçtaki çimento kullanımının tamamen kaldırılmasını sağlar ayrıca harca endüstriyel atıkların katılmasıyla jeopolimer betonu çevreci bir beton olarak görebiliriz. Kaynaklarda “without cement” yani çimentosuz beton olarak da karşımıza çıkan bu beton içerisinde çimento bulunmamasından dolayı yeni ekolojik bir yapı malzemesidir (Topçu ve Toprak, 2009). Kireç ve geleneksel portland çimentosundan sonra jeopolimer çimento üçüncü nesil çimento olarak kabul edilmektedir (Singh ve diğ, 2013, Duxson ve diğ, 2007a). Jeopolimer beton serbest silis ve alümin içeren malzemelerin alkali aktivatörlerle aktive edilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu senteze jeopolimerizasyon denilmektedir. Jeopolimer oluşumunda su, karışım aşamasında işlenebilirliği arttırmak için kullanılır ve kür-kurutma aşamasında yapıdan uzaklaşarak nano boşluklu bir yapı oluşturur. Jeopolimer içerisinde su bulunmamaktadır. Jeopolimere, boşluklu yapı hafiflik, yangın dayanımı ve ısı yalıtımı gibi olumlu etkiler katmaktadır (Topçu ve Toprak, 2009). Hidrotermal polikondenzasyon reaksiyonu ile oluşmaktadır. Yapısından suyu kimyasal ve fiziksel yöntemlerle dışarı atarak tanecik yapısı olarak zeolit kayaçlara benzeyen amorf üç boyutlu hekzagonal molekül bağ yapısından dolayı zeolit kristallerden ayrılan alümina silikat toprak malzemeye jeopolimer denilmektedir (Keyte ve diğ, 2006). Yapılan çalışmalarda genel yargı jeopolimer betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin olumlu yönde oluşudur. Jeopolimerizasyon olarak isimlendirilir. Alümino-silikat bağlayıcı malzeme sınıfıdır (Görhan ve Kürklü, 2014). 1200 °C’ye kadar zarar görmeden dayanan jeopolimer betonun ısı iletkenliği diğer yapı malzemeleri ve ürünlerine göre düşük olup 0,24-0,3 W/mK arasında değişmektedir (Swanepoel ve Strydom, 2002). Jeopolimerizasyon aşamaları Çizelge 2.13’te gösterilmiştir.

Jeopolimer malzemenin çevresel sürdürülebilirliği 3 başlıkta incelenebilir (Paya ve diğ, 2015). Bunlar:

- Atık malzemelerin faydalı kullanımı
- Doğal kaynakların korunması
- Portland çimentosundan az enerji ihtiyacı ve daha az CO₂ emisyonu

Çizelge 2.13 : Jeopolimerizasyon aşamaları.

Si – Al İçeren Malzemeler	+	Alkaliler	=	Jeopolimer Ara Bileşeni
Jeopolimer Ara Bileşeni	+	Alkaliler	=	Jeopolimer

2.2.1 Jeopolimerin tarihçesi

Feret 1939 yılında çimentoya cüruf ikame ederek alkali aktivasyonu ile ilgili ilklerden sayılabilecek bir çalışma yapmıştır. 1940'a gelindiğinde Purdon Alkali-cüruf birleşimi üzerine çalışmıştır (Pacheco-Torgal, 2015). 1950'li yıllara gelindiğinde kullanılan teknolojilerin hava kirliliği ve çevresel etkileri Londra öldüren sisi gibi yaşanan felaketlerle anlaşılmaya başlanmıştır. Çevreye zararının büyük olması nedeniyle Glukhovsky ve diğ. Çimento yerine geçebilecek yüksek fırın cürufu kullanılarak alkali çimentoların oluşumu hakkında teorik esaslar belirlemek ve geliştirmek üzerine çalışmalar yapmıştır. Alkali çimento tanımı ilk kez 1965 yılında kullanılmıştır (Pacheco-Torgal, 2015). Alkali aktivasyonunun gelişimi kronolojik olarak Çizelge 2.14'te görülmektedir.

Çizelge 2.14 : Alkali aktivasyonunun gelişimi (Pacheco-Torgal, 2015).

Tarih	Gelişme	Yazar
1939	Çimentoda cüruf kullanılması	Feret
1940	Alkali-cüruf birleşiminin kullanılması	Purdon
1959	Alkalın çimentoların teorik esasları ve gelişimi	Glukhovsky
1965	Bileşen olarak doğal maddelerin kullanılmasıyla "alkalin çimentolar" adının ilk kez kullanılması	Glukhovsky
1986	Sentetik Melit cüruflarının aktivasyonu	Malolepsy ve Petri
1989	Cürufun alkali aktivasyonu	Talling ve Brandstetr
1990	Cürufli çimentoların aktivasyonu	Wu ve diğ.
1991	Hızlı priz alan alkali-aktif bağlayıcılarının geliştirilmesi	Roy ve diğ.
1993	Cüruf çimentosu	Roy ve Malek
1994	Alkalın bağlayıcılar	Krivenko
1995	Alkaliler ile aktive edilmiş cürufun mikro-yapı incelemeleri	Wang ve Scrivener

Çizelge 2.14 (Devam) Alkali aktivasyonunun gelişimi (Pacheco-Torgal, 2015).

Tarih	Gelişme	Yazar
1996	Alkaliler ile aktive edilmiş cürufların dayanımı, geçirimsizliği ve boşluk yapısı	Shi
1997	Alkaliler ile aktive edilmiş cürufların kinetik çalışmaları	Fernández-Jiménez Puertas
1998	Alkali aktive edilmiş uçucu küllerin mikro yapısı	Katz
1999	Jeopolimer sistemlerin kimyası ve teknolojisi	Davidovits
2000	Alkaliler ile aktive edilmiş uçucu kül-cüruf çimentosu	Puertas
2001- 2002	Alkaliler ile aktive edilmiş cürufllu beton	Bakharev
2003	Atıkların bertaraf edilmesi	Palomo
2004	Zeolit oluşumu	Grutzeck
2008	Jeopolimerlerin tek başına kullanımı	Hajimohammadi ve diğ.
2009	Jeopolimerlerin yapısı, üretimi, özellikleri ve uygulama alanları	Provis ve Van Deventer

Fransa’da 1970-1973 yılları arasında organik plastik kaynaklı büyük çaplı yangınlar çıkmaktadır. Yanmayan plastik üzerine araştırma yapan Prof. Dr. J. Davidovits jeokimya alanında çalışmış zeolitlerin sentezi ve moleküler eleklerin; mineral bağlayıcı ile mineral polimer üretimleri hakkında araştırma yapmıştır. 1978 yılında ilk kez jeopolimerleri tanımlamış ve sınıflandırmıştır. Jeopolimerler, yarı kristalize üç boyutlu siliko-alüminat amorf malzemeler bir araya getirilerek geliştirilmiştir. Jeopolimerler, doğal mineralli malzemelerin kimyasal kompozisyonlarının ve kristal yapılarının çeşitli yöntemlerle değiştirilmesi ile elde edilen malzemelerdir. Laboratuvar ortamında üretilen jeopolimerler, silis ve alümin içerikli malzemelerin alkalilerle aktive edilir. Jeolojik kayalara benzer şekilde bağlayıcılık özelliği gösteren bir maddedir. Jeopolimerler üretim şekillerine göre kristal yapıda ve ya amorf yapıda olabilmektedir (Davidovits, 2002). 70’li yıllar itibariyle konu üzerinde birçok çalışma yapılmaktadır. Bunların ilk örneklerini Çizelge 2.15’te görebiliriz.

Çizelge 2.15 : Jeopolimer üzerine başlıca çalışmalar (Davidovits, 2002).

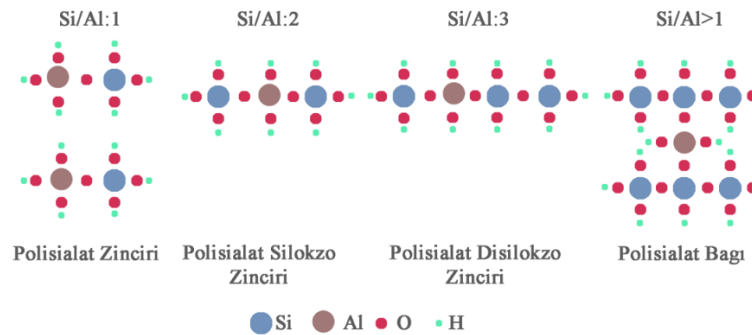
1973-1976	Yapı malzemesi olarak kullanılan, reçine ile yapıştırılmış odun talaşlarının yüzeylerine siliko-alüminat mineralinin yerleştirilmesiyle yanmaya dirençli jeopolimer suntalar elde edilmiştir
1977-1978	Doğal kaolinit ve kuvars birleşimindeki kuvars, 1460°C erime noktasında sentetik kordiyerit, $(\text{Si}_5\text{AlO}_{18})\text{Al}_3\text{Mg}_2$, ile yer değiştirerek seramik jeopolimerler elde edilmiştir ve termal genleşme düşüklüğü nedeniyle elektrik sigortalarında kullanılması için test edilmiştir. Düşük sıcaklıktaki jeopolimerik priz, geleneksel seramik endüstrisini de geliştirebilmektedir.
1977-1982	125-250°C'deki sodyum polisilat veya potasyum polisilat jeopolimerler 1000-1200°C'de çok hızlı fırınlanarak yüksek kalitede seramikler elde edilmiştir.

2.2.2 Jeopolimerin yapısı ve sınıflandırılması

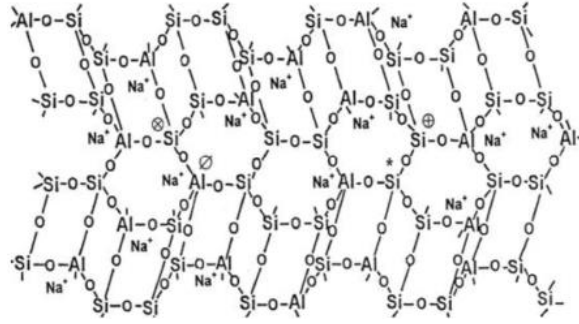
Jeopolimerizasyon, yüksek alkali ortamlarda bulunan moleküllerin çözünme, taşınma, yönelme ve çoklu yoğunlaşma hareketinden oluşan polikondenzasyon hareketlerini içeren bir ekzotermik kimyasal sentezdir. Yapısında SiO_2 , Al_2O_3 CaO içeren uçucu kül (UK) veya yüksek fırın cürufu (YFC) gibi taban külleri alkali aktivatörlerle aktive edilerek bağlayıcılık özelliği kazandırılır. Bu kimyasal sürece “jeopolimerizasyon” denilmektedir (Aydın, 2010). Proses, silis ve alümin atomlarının oksijen atomlarıyla elektrik paylaşmasıyla oluşan kovalent bağlı bileşikler oluşturmaya dayanmaktadır. Kararlı SiO_2 bileşiğinin üç boyutlu yapısı alkali ortamda zayıflayarak jeopolimerin ana bileşiği olan Si-O-Al ve Si-O-Si gibi sialatları oluşturmaktadır (Şinik, 2019). Davidovits tarafından reaksiyonda kullanılan ve meydana gelen molekül grupları özetle aşağıdaki gibidir (Hardjito ve diğ, 2005).

- Si-O-Al-O- sialate, poly(sialate)
- Si-O-Al-O-Si-O- sialate-siloxo, poly(sialate-siloxo)
- Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialate-disiloxo, poly(sialate-disiloxo)
- Si-O-Si-O- siloxo, poly(siloxo) (camsuyu alakali-silikatlar)
- P-O-P-O- phosphate, poly(phosphate)
- P-O-Si-O-Al-O-P-O- phospho-sialate, poly(phospho-sialate)
- (R)-Si-O-Si-O-(R) organo-siloxo, poly-silicone

Sialat monomerleri sırasıyla oligomere ve silikat polimere dönüşür (Davidovits, 1991). Alüminasilikatların (Si-O-Al veya Si-O-Si) aktivitesi kimyasal yapılarına, morfolojilerine ve morfolojik yapılarına, inceliğine ve camsı faz içeriğine bağlıdır. Kararlı jeopolimer üretiminde önemli olan kriterler sırasıyla; kaynak malzemenin olabildiği en amorf halinde olması ve yeterli reaktif içeriğe sahip olması, alüminyumı kolayca serbest bırakması ve düşük su talebine sahip olmasıdır (Singh ve diğ, 2013, Duxson ve diğ, 2007a). Jeopolimer amorf ve kristal özellik gösterebilmektedir. Amorf yapıda inorganik polimerler olan jeopolimerin uçucu kül gibi puzolanlarla reaksiyonu sonucunda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeline benzer hidrate kalsiyum silikat (NASH) oluşmaktadır (Aydın, 2010, Davidovits, 1991). Jeopolimerin özellikleri; tasarımda kullanılan malzeme seçimi, oluşturulan karışım ve işleme tasarımıyla optimize edilir (Singh ve diğ, 2013, Duxson ve diğ, 2007a). Optimizasyonun en kritik noktası puzolanın alkali ile aktive edilmesi olduğu düşünülmektedir. Alkali aktivatörlerden oluşan çözeltide (Na_2SiO_3 , NaOH, KOH, K_2SiO_3) silika ve alümina içeren moleküller hidrolizindeki alüminasilikatların bağları kırılarak aktif Al^{+3} ve Si^{+4} iyonları oluşur. İyonlar reaksiyona girerek SiO_4 ve AlO_4 tetrahedradan oluşturur. Alüminosilikat oligomerlerindeki zincirler Si/Al oranlarına göre 3 formda oluşmaktadır. Bunlar; polisialat zinciri, polisialat silokzo zinciri ve polisialat disilokzo zinciridir. Si/Al oranı 3 üzerinde olduğunda sialat bağı olarak adlandırılır (Davidovits, 2002, Dimas ve diğ, 2009, Alnkaa, 2019) (Şekil 2.6). Jeopolimerlerin üretim sürecinde elde edilecek molekül yapısı hakkında belirleyici olan faktör aktifleştirilecek malzemeler ile aktivatörlerde yer alan alkali silikatların Si/Al molar oranıdır. (Şekil 2.7) Davidovits, jeopolimerizasyon sırasında alkali aktivasyon sentezi sırasında reaksiyona giren ve oluşan molekül gruplarını belirleyerek zincir yapı modelini çıkartmıştır (Davidovits, 2008). (Şekil 2.8)



Şekil 2.6 : Si/Al molar oranına göre bağlar (Alnkaa, 2019).



Şekil 2.8 : Davidovits'in zincir yapı modeli (Davidovits, 2008).

Kimyasal bileşenleri çözmek için fazla su kullanmak basınç dayanımını düşürmektedir. Jeopolimer hamurunun pH değeri 10-12 aralığında olmaktadır. Jeopolimerizasyon gerçekleşirken kürlleme işleminde sıcaklık artışıyla pH değeri düşmektedir. Örnekleme gerekirse 85 °C kürlleme esnasında 10,5 pH değerine sahip hamur 700 °C kürlleme esnasında 7,5 pH düzeyindedir. Yüksek sıcaklıklarda üretilen Jeopolimerlerin pH değerini dengelemek için K_2O/SiO_2 molar oranı yükseltilir. pH değeri düşük polimerler insan sağlığı açısından sakıncalıdır (Zeynek, 2009).

Jeopolimerin Sınıflandırılması

Elementlerin ve monomerlerin birçok kere bir araya gelip oluşturdukları uzun zincirli moleküllere polimer ismi verilir. İki çeşit polimer vardır bunlar; doğal (organik) ve sentetiktir (Url-9, Zeynek, 2009). Sanayi ve sağlık alanında polimer teknolojisi önemli bir yer tutmaktadır. Polimerler kovalent bağ ile molekül ve elementlerin arasında son enerji düzeylerinde enerji paylaşımları yapmalarıyla oluşur. Polimer yapısının oluşum sürecine polimerizasyon denilmektedir. İki çeşit polimer tipi vardır. Bunlardan ilki katılma polimerizasyonu olarak bilinen molekül zincirlerinin birbirinden ayrı olduğu ve birbiri üzerinde kayabildiği monomerlerin uzun zincir şeklinde bağlandığı termoplastik polimerdir. Tek tip monomerin zincir bağlarından oluşmasına homopolimer, birden fazla cinsin birleşmesine ise kopolimer ismi verilir. Yapıları yarı kristal veya amorf halde olmasından dolayı eritilerek yeniden şekillenebilir. Termoset polimerle farklarından biri budur. İkinci olarak, yoğunlaşma polimerizasyonu olarak isimlendirilen ısı ve basıncın uygulandığı vulkanize işlemi ile sert ve akıcı yapıda olmayan çapraz bağ yapıları termoset polimerdir. Isı ve basınç etkisiyle şekillenen termoset polimerler tekrar şekillendirilemezler. Laboratuvar da kondansasyon (yoğunlaşma) addition (katılma) ve plazma yöntemleriyle sentetik olarak polimer üretilebilir (Zeynek, 2009).

Jeopolimerlerin oluşumunda monomerlerin bir araya gelmesine jeopolimerizasyon ismi verilmektedir.

Tanımlanmış 9 tip jeopolimer malzeme mevcuttur (Url-10).

- Sodyumsilikat (cam suyu) esaslı jeopolimer (Si:Al=1:0)
- Kaolin hidrosodalit esaslı jeopolimer (Si:Al=1:1)
- Metakaolin esaslı jeopolimer (Si:Al=2:1)
- Kalsiyum esaslı jeopolimer (Si:Al=1, 2, 3)
- Kayaç esaslı jeopolimer ($1 < \text{Si:Al} < 5$)
- Silika-esaslı jeopolimer (Si:Al>5)
- Fosfat esaslı jeopolimer
- Organik maden esaslı jeopolimer
- Uçucu kül bazlı jeopolimer

Sodyumsilikat (cam suyu) esaslı jeopolimer (Si: Al=1:0)

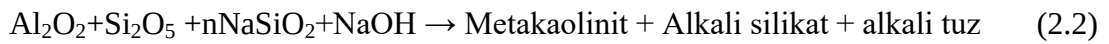
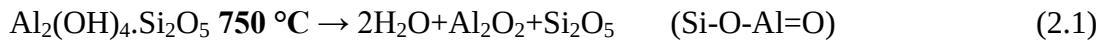
Jeopolimer üretimi çalışmalarında kullanılan Na_2SiO_3 (metasilikat) molar oranı 1'dir. Silikat oranı ürün sınıflandırılmasında kullanılır. Ticari olarak üretilen bileşik $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ (sodyum disilikat)'dır (Zeynek, 2009). Suda çözünürlük dayanıklılık ve erken dayanımı etkilediği için jeopolimerizasyon sürecinde önemlidir. Na ve K bazları alkali silikatların suda çözünürlüğünü jeopolimerizasyonu etkilemektedir.

Kaolin hidrosodalit esaslı jeopolimer (Si: Al=1:1)

A,B ve C olmak üzere üç tip kaolin doğada bulunmaktadır. A tipinin içeriği %94 kaolin, %6 kuartz ve muskovit, B tipinin içeriği %92 kaolin, %8 montmorillonit, anastaz ve kuartz, C tipi kaolinin içeriği %33 kaolin, %66 kuartz muskovit ve profilit içermektedir. Kaolin kilinin kimyasal yapısı $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ veya $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 'dir Kaolin kilinin mineral kompozisyonu zeolit kristallerini elde etmek için uygundur. 100 °C altında gerçekleşen jeopolimerizasyon alüminyumun oluşturduğu hidroksil iyonlarının bağlı olduğu cipsit kristallerinden dolayı oldukça zordur. Ayrıca kaolin kili alkali tuzlarla kararlı reaksiyonlar vermemektedir (Yeşilyurt, 2013, Davidovits, 2008).

Metakaolin esaslı jeopolimer (Si: Al=2:1)

Metakaolin ya da MK 750 olarak adlandırılan malzemeyle elde edilen jeopolimerlerdir. Metakaolin elde edilirken A ve B tipi kaolin kullanılmaktadır. Kaolinit 750 °C’de kalsine edildiğinde dehidroksilasyon gerçekleşir ve su molekülleri ayrıştığında alümina silikat oksitler elde edilir. Metakaolin taneciklerinin kaolin taneciklerinden büyük olmasının nedeni fırınlama sürecinde kil taneciklerinin genleşmelerinden kaynaklıdır. Metakaolin esaslı jeopolimer aşağıdaki sentezle elde edilir (Yeşilyurt, 2013, Sanni ve diğ, 2013).



Metakaolin esaslı jeopolimerin priz süresi bünyesindeki SiO₂/K₂O molar oranına bağlıdır. 80 °C de buhar kürü uygulanan bir jeopolimerizasyonda SiO₂/K₂O oranı 1,23 iken 1 saatte priz alır. Bu oran 2 olduğunda 4 saate kadar ulaşmaktadır (Yeşilyurt, 2013).

Metakaolin esaslı jeopolimer yüzey pürüzsüzlüğünün önemli olduğu yerlerde ve yüzey sertliğinin ve ısı dayanımının yüksek olması gereken yerlerde kullanılmaya uygundur (Yeşilyurt, 2013).

Kalsiyum esaslı jeopolimer (Si: Al=1, 2, 3)

Kalsiyum esaslı jeopolimer Al-O ve Si-O moleküllerinin çökme ve karıştırma ile yeniden reaksiyona girmesiyle sentezlenmektedir. Kalsiyumun suda çözünürlüğü az olduğu için jeopolimerizasyon yavaş ilerlemekte ve erken dayanım düşük olmaktadır (Yeşilyurt, 2013).

Kayaç esaslı jeopolimer (1 < Si: Al < 5)

Kayaç esaslı jeopolimer yeryüzünde en çok bulunan toprak maden olan feldispatoitler ve kumun ham maddesi kuartz ikame edilerek oluşturulur. Farklı tip alümino silikat kaynağı kayaç asit içerisinde çözünmesiyle kayaç esaslı jeopolimer polimerizasyonu gerçekleşmektedir (Yeşilyurt, 2013, Davidovits, 1988).

Değişken pH değerine sahip radyoaktif atıklar depolandıkları hacimleri delerek sızıntı yapabilirler. Portland çimento kullanılmış depolama hacimleri kolay

aşınmakta ve sızıntı oluşturmaktadır. Terk edilmiş nükleer atıklar çimentonun hidrotermal reaksiyon etkisiyle ısınmaktadır. Bu ısınma bu alanları nükleer bombalara çevirmektedir. Kayaç esaslı jeopolimer yüksek geçirimsizliğe sahiptir. Radyoaktif atık depolama ve nükleer santraller için uygun bir malzemedir (Yeşilyurt, 2013, Davidovits, 1988).

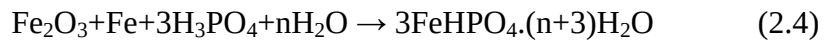
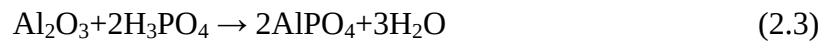
Silika-esaslı jeopolimer (Si: Al>5)

Silika (SiO₂) kaynakları 2 tanedir. İlk elde etme yöntemi kuartz 3-10 µm aralığında öğütülmesi ile silis tozu elde edilir. İkinci yöntem ise ferrosilikan çelik üretiminde oluşan 0,05-1 µm silis dumanıdır (Yeşilyurt, 2013, Davidovits, 2008).

Silis dumanı jeopolimer içerisinde filler ve puzolan olarak önemli rol oynamaktadır. Jeopolimerizasyon sürecinde NaOH ve KOH alkali aktivatörleri kolayca aktifleşmektedir. Çözünen silikat içerisindeki silis partikülleri nano jeopolimer oluşumunu sağlamaktadır. Silika esaslı oluşan nanopolisilanol jeopolimer yüksek ısı direnci olan seramik malzemeler ve paslanmaz çelik boya üretiminde kullanılabilir (Yeşilyurt, 2013, Davidovits, 2008).

Fosfat esaslı jeopolimer

Yapısının geçirimsizliğinden dolayı yapı sektöründe radyoaktif atık depolama yapılarında kullanılması uygun jeopolimerdir. Fosfat esaslı jeopolimer düşük pH'lı ortamda iki veya üç değerlikli bir metal oksit H₃PO₄ (ortofosforik asit) içinde asit baz reaksiyonlarıyla sentezlenir. Bu sentez yöntemi diğer jeopolimerlerden fosfat esaslı jeopolimeri ayırmaktadır. Aşağıda fosfat esaslı jeopolimer sentezi bulunmaktadır (Barsoum ve diğ, 2006, Yeşilyurt, 2013, Davidovits, 2008).



Organik maden esaslı jeopolimer

İklim şartlarına dayanıklı malzeme olarak organik yapıli maden esaslı jeopolimer tercih edilebilir. Hidrokarbon bağ yapıli organik polimerler ile polisialat jeopolimer yapısi kullanılarak üç tip malzeme üretimi yapılabilmektedir. Hümik asitin jeolojik mineraller üzerinde yoğunlaşması ile poli organo siloksan yapısi ve kerojen elde

edilebildiği gibi organik polimerleri mineral jeopolimere karıştırma ve emdirme işlemleri ile de organo-jeopolimer sentezi elde edilir (Yeşilyurt, 2013, Davidovits, 2008).

Uçucu kül bazlı jeopolimer

Puzolan olarak yapısı gereği içi boş ince küresel yapıya sahip uçucu kül kullanılması jeopolimerin mukavemetini arttırmaktadır. F tipi uçucu külün jeopolimer yapısında sıkça kullanılmasının başlıca nedenlerinden biri de içerdiği Al_2O_3 (alumina) ve SiO_2 (silika) içermesidir (Aydın ve Pehlivanlı, 2017, Zeynek, 2009).

2.2.3 Jeopolimerin bileşenleri ve üretimi

Konvansiyonel betonun bileşenleri ve üretimi isimli 2.1.2 bölümünde bahsedilen bileşenler: çimento, agrega, su ve katkılardır. Jeopolimer beton bahsedilen malzemelerle benzer bileşikler bünyesinde barındırdığı gibi farklı malzemelerde bünyesinde bulundurmaktadır. Bunlar: atıklar ve küllerdir (puzolan), alkali aktivatörler, agrega, katkılardır. Kullanılan malzemelerin hepsinin belirli oranda karşılaması gerekmektedir. İkame malzemeye özel olmasına karşın ikame edilen malzemelerin kalitesi ve beklenen özellikler betonda kullanılacak malzemelere paralellik göstermektedir. 2.1.2 Konvansiyonel betonun bileşenleri ve üretimi bölümünde agrega ve katkılardan bahsedilmiştir. Jeopolimer bünyesinde bulunan puzolan ve alkali aktivatörlerden bu kısımda bahsedilecektir.

Alkali aktivasyonu 2 aşamalı aktivasyondan oluşmaktadır. Aktivasyonda alkali hidroksitler ve alkali silikatlar kullanıldığı gibi ikisi bir arada da kullanılabilir. Örneğin alkali hidroksit çözeltisinde silikat içeriği az olacağı için iki tip aktivatörün de kullanılması oluşacak maddenin niteliğini güçlendirir (Khale ve Chaudhary, 2007, Sagoe-Crentsil, 2007).

Alkali aktivatörlerle aktive edilen puzolanlar aşağıdaki gibidir. (Baradan ve diğ, 2012, Khale ve Chaudhary, 2007).

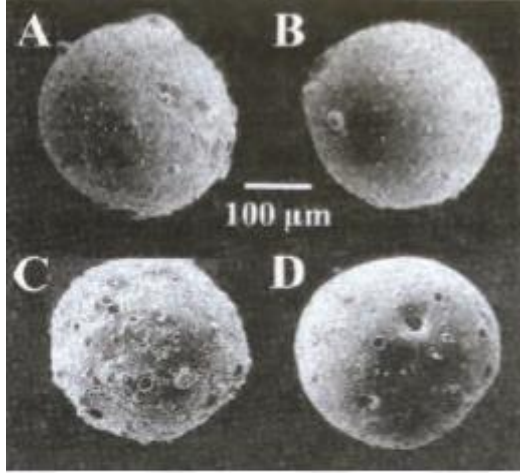
- Uçucu küller
- Uçucu kül ve cüruf karışımı
- Uçucu kül ve metakaolin

- Yüksek fırın cürufu
- Yüksek fırın cürufu ve metakaolin
- Yüksek fırın cürufu ve kırmızı çamur
- Metakaolin
- Kaolin Kili
- Uçucu kül ve kırmızı çamur
- Yüksek fırın cürufu ve silis dumanı
- Zeolit

Yukarıda görüldüğü üzere 11 adet olan puzolanlar silis ve alümin oranları fazla olan yeni keşfedilecek malzemelerle çoğalabileceği düşünülmektedir. Kullanılacak puzolanların betonla paralel olarak TS 25 – *Doğal puzolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan- Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri*’ne göre uygunluğu test edilmelidir. Bu bölümde yaygın olarak kullanılması gerekçesiyle puzolanlardan uçucu külden (UK) bahsedilecektir.

Uçucu Küller: Taş kömürü kullanan termik santraller ve linyit kömürü kullanan termik santrallerin bacalarından çıkan küller uçucu kül olarak adlandırılmaktadır. Atık bir üründür. Uçucu küller toplanıp depolanarak çevreyi olumsuz etkilemesi engellenir. Küllerin kullanımı üretici ve kullanıcı için ekonomik avantajlar sağlamaktadır (Türker ve diğ, 2009). Termik santrallerin büyük problemlerinden biri UK’lerin depolanmasıdır. Depolama bir alan gerektirdiği için doğayı tahrip etmeye neden olmaktadır. UK’nin kullanım alanlarının genişlemesi depolama ihtiyacının önüne geçecektir (Şinik, 2019). Depolamada sağlanan bu avantaj tasarım, kullanılan miktar ve nakliye göre şekillenmektedir. Dünyada ortaya çıkan kül miktarı 600 milyon ton civarında olmasına rağmen %15’i gibi küçük bir payı kullanılmaktadır (Türker ve diğ, 2009).

Uçucu küller bir çeşit hidratasyon ısını düşüren puzolanlardır. Taneli yapısının küresel bir yapıya sahip olmasından dolayı betonun kararlılığına, kolay sıkışmasına ve kolay yerleşmesine sebep olmaktadır. Uçucu küllü betonun mekanik özelliklerini, kullanılan külün kimyasal bileşeni, boyutu, inceliği, puzolanik aktivesi ve betonun kür koşulları etkilemektedir (Türker ve diğ, 2009). (Şekil 2.9)



A- Yüzeyinde birikintiler ve sıvı damlaları olan küresel tanecik
 B- Camsı küresel tanecik
 C- Yüzeyi düzensiz boşluklar içeren tanecik
 D- Boşluklu küresel tanecik

Şekil 2.9 : Uçucu küllerin küresel yapısı (Türker ve diğ. 2009).

Uçucu küllerin özellikleri, termik santralde yakılan kömürün cinsine, yakılma sıcaklığına ve bacada kullanılan filtreleme sistemine göre değişmektedir. Ayrıca, aynı termik santralde oluşan UK özellikleri her gün değişiklik göstermektedir bunun nedeni oluşum enerjisinin değişmesinden dolayı olduğu düşünülebilir. Boyutları, renkleri, çapları ve yoğunlukları değişmektedir. Gri renkli olan UK'ler içerisindeki CaO miktarının artmasıyla daha koyu renk almaktadır. Küresel şekle sahip taneciklerin çapları 1-150 µm aralığında ve %75 oranında 45 µm'den düşüktür (Çakır, 1999).

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğinin, “Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri” raporunda uçucu küller kimyasal bileşen yüzdeleri esas alınarak ASTM-C 618’e göre ve TS EN 197-1’e göre iki ana kategori olarak ayırmaktadır.

ASTM-C 618’e göre;

- F Tip Uçucu Küller

Bitümlü kömürden üretilmektedir. Genellikle %10’dan az CaO ve $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70’ten fazla bileşen içeren, düşük kireçli olarak da adlandırılır. Puzolanik özelliğe sahiptirler.

- C Tip Uçucu Küller

Linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilmektedir. %16 - %35 arası CaO ve $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70’ten az %50’den fazla bileşen içeren, yüksek kireçli olarak da adlandırılır. Puzolanik ve bağlayıcı özelliğe sahiptir.

TS EN 197-1’e göre;

- V Sınıfı Uçucu Küller

V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir tozdurlar. Yapılarının büyük kısmını reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşturur. Geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'ten fazla olması gerekmektedir.

- W Sınıfı Uçucu Küller

Hidrolik ve puzolanik özelliklere ayrı ayrı ve iki özellik birlikte olarak ince bir tozdur. Esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'ten oluşur. 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'ten fazla olması gerekmektedir (Türker ve diğ. 2009).

Aşağıda Türkiye'de uçucu kül üretimi ve depolaması yapan santraller listesi verilmiştir (Türker ve diğ. 2009). Bu 11 adet kömür kullanılan termik santralde yıllık olarak 13 milyon ton civarında UK üretimi mevcuttur (Url-3).

- Afşin-Elbistan Termik Santrali
- Çatalağzı Termik Santrali
- Çayırhan Termik Santrali
- Kangal Termik Santrali
- Kemerköy Termik Santrali
- Orhaneli Termik Santrali
- Seyitömer Termik Santrali
- Soma Termik Santrali
- Tunçbilek Termik Santrali
- Yatağan Termik Santrali
- Yeniköy Termik Santrali

1980'li yıllarla beraber uçucu küller (UK) Türkiye'de çimento üretimine ikame edilerek kullanılmaya başlamıştır. Uçucu küllerin çimentoya eklenmesi, üretiminde ihtiyaç olan çimento miktarını düşürmüş, enerji tasarrufu sağlamış, ekonomik ve daha çevreci çimentolar üretimini desteklemiştir. Ayrıca betonun dayanıklılık özelliklerine katkıda bulunmaktadır (Aruntaş, 2006).

F tip uçucu kül jeopolimer üretiminde kullanılmaya uygundur. F tip uçucu kül sodyum hidroksitle etkili bir şekilde aktive edilebilir. Sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve

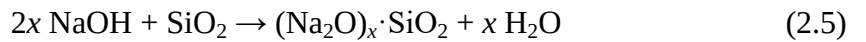
sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak aktive edilmiş UK esaslı jeopolimer yüksek basınç dayanımlarına sahip olurlar (Fernandez-Jimenez ve diğ, 1999).

Aktivatörler: Alkali aktivatörler içeriği silis ve alümin olan malzemeleri aktive etmekte kullanılmaktadır. Jeopolimer oluşumunda buna jeopolimerizasyon da denilmektedir. Jeopolimerizasyonun gerçekleşmesi için dört adet aktivatör kullanılmaktadır. Bunlar:

- Sodyum hidroksit (NaOH),
- Cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat (Na_2SiO_3)
- Potasyum hidroksit (KOH),
- Potasyum silikat ($\text{nSiO}_2\text{K}_2\text{O}$) karışımlarıdır (Baradan ve diğ, 2012, Khale ve Chaudhary, 2007).

Sodyum hidroksit (NaOH): *OH⁻ iyonu sağlamak için yaygın olarak NaOH aktivatörü kullanılmaktadır. NaOH aktivatörünün molaritesi harcın özelliklerini tayin eder. Yüksek konsantrasyon çözünmeyi hızlandırır. Etrenjit ve C-S-H oluşumunu sağlamaktadır. Erken dayanım oluşmasına katkı sağlamaktadır fakat çözelti içerisinde OH⁻ iyonunun aşırı fazlalığı dayanımı olumsuz etkilemektedir (Khale ve Chaudhary, 2007). Ayrıca, NaOH ile aktive edilen jeopolimerlerin kristal yapısı gelişmektedir. Gelişim yoğun sülfat ve asidik ortamlarda stabilitenin korunmasını sağlamaktadır (Köker, 2019).*

Sodyum silikat (Na_2SiO_3): *Cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat, erime noktası 1.713 °C olan silika (SiO_2) ve 851 °C'de eriyen sodyum karbonatla elde edilir. Reaksiyon aşağıdaki gibidir (Url-12).*



Sodyum silikat bünyesinde -OH iyonu bulundurmadiğından dolayı tek başına aktivatör olarak kullanılamamaktadır. Genellikle Sodyum hidroksit (NaOH) ile kullanılmaktadır. Na_2SiO_3 ikamesi agrega ve harç arasındaki aderansı arttırmakta ara yüz bağlarını iyileştirmektedir. Sodyum hidroksit (NaOH) ve Sodyum silikat (Na_2SiO_3) jeopolimerizasyonda en çok kullanılan aktivatörlerdir (Kong ve Sanjayan, 2010, Zhang ve diğ, 2008).

Potasyum hidroksit (KOH): *NaOH ve KOH ile aktive edilen jeopolimer kıyaslanmıştır. KOH+metakaolin ve KOH+uçucu kül karışımında oluşan kristal yapı NaOH+Metakaolin ve KOH+uçucu kül karışımı oluşan kristal yapıdan daha yavaş*

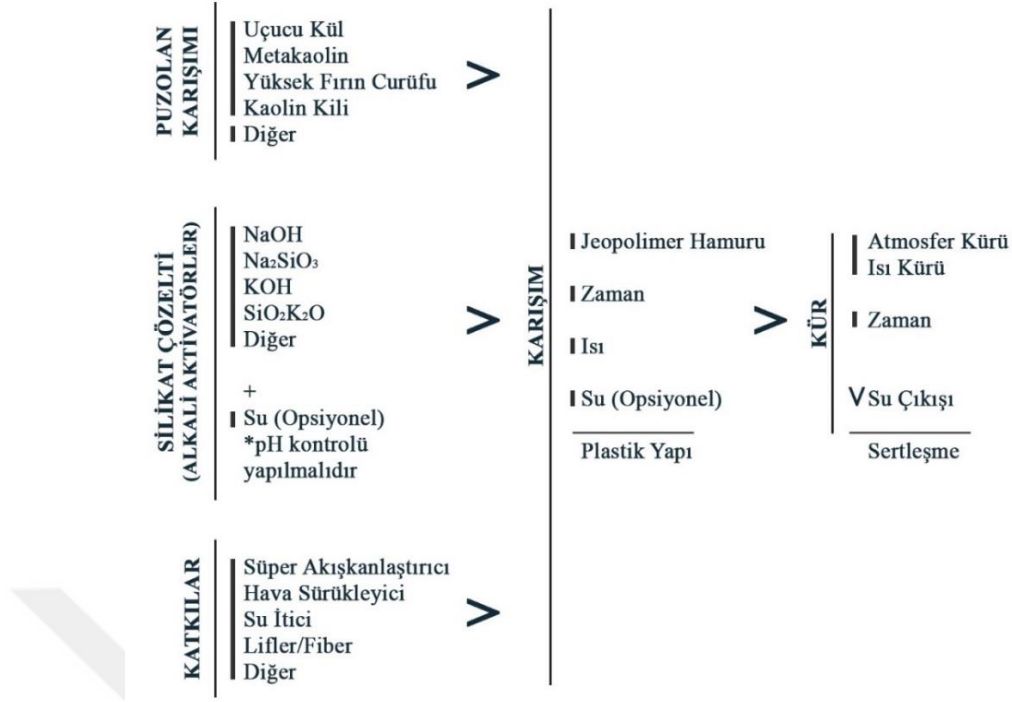
oluşur (Provis, 2009). Genellikle çalışmalarda iki aktivatör birlikte kullanılmaktadır (Xu ve Deventer, 2000, Duxson ve diğ, 2007a).

Potasyum silikat ($n\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$): Yapılan çalışmaya göre 600 °C de kürlenene jeopolimerde yüksek sıcaklıkta potasyum bazlı aktivatör kullanılan örnekler sodyum bazlı aktivatör kullanılan örneklerden daha kararlı, yüksek basınç dayanımlı, kütle kaybı daha az ve daha düşük büzülme ve çatlama görülmüştür (Hosan ve diğ, 2016).

Çözeltilerde konsantrasyon (derişim) çözeltinin belirli bir hacmi içerisinde çözünmüş olan madde miktarıdır (Url-13). Jeopolimer içerisindeki alkali aktivatör konsantrasyonu yüksek basınç dayanımı elde etmek için önemli bir rol oynar. OH- (hidroksit) iyonu derişimi arttıkça çözelti içerisindeki silikat iyonlarının polimerizasyon dereceleri ve alüminosilikatların çözünürlüğü artar böylelikle derişim artmaktadır. Küçük monomeric silikatlar ve çözünebilir alüminyum ile tepkimeye yüksek pH değerinde girerler (Khale ve Chaudhary, 2007, Zaharaki ve diğ, 2010). C-S-H jeli jeopolimerin daha az gözenekli ve boşluklu malzeme oluşturmasını sağlamaktadır (Pacheco ve diğ, 2007). C-S-H jelini arttırmak için alkali hidroksit konsantrasyonunu arttırmak gerekmektedir (Köker, 2019). Jel oluşumunu destekleyen bir diğeri değişken çözelti içerisindeki yüksek sodyum oranıdır (Khale ve Chaudhary, 2007). Dolu malzeme basınç dayanımı yüksek malzeme olarak düşünülebilir. Dayanım arttıran sodyum kullanıldığı zaman oluşan bir diğeri jel üç boyutlu jel alüminosilikat hidrattır ($\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$) (Ruiz-Santaquiteria ve diğ, 2012). Aktivatör derişimi çözünen bileşikleri arttıracak için dayanımı yüksek jeopolimer yapımında dikkat edilmesi gereken konulardandır.

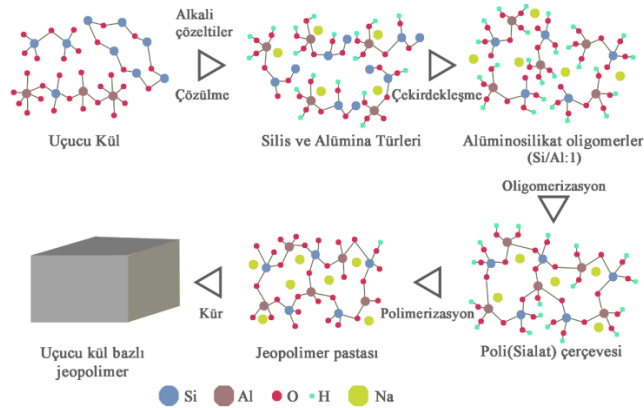
Jeopolimerin Üretimi

Jeopolimerizasyon, yüksek alkali ortamlardaki moleküllerin çözünme, taşınma, yönelme ve çoklu yoğunlaşma hareketinden oluşan polikondenzasyon (çoklu yoğunlaşma) hareketlerini içeren bir ekzotermik kimyasal süreçtir (Zeynek, 2009). Organik kimya ürünü olan polimerlerden farklı olarak karbon elementi yerine kuvars içinde bulunan silisyum moleküllerinin alkali ortamda alüminatlarla; bağlarının değişmesi ve moleküller içindeki atomların enerji düzeylerinin değişmesiyle gerçekleşir (Zeynek, 2009, Kim ve diğ, 2006). Oda sıcaklığında başlayan jeopolimerizasyon 40-100 °C sıcaklıklarda ısıtılarak üretim süreci iyileştirilir (Kommitsas ve Zaharaki, 2007). Şekil 2.10'de jeopolimerizasyon süreci verilmiştir.

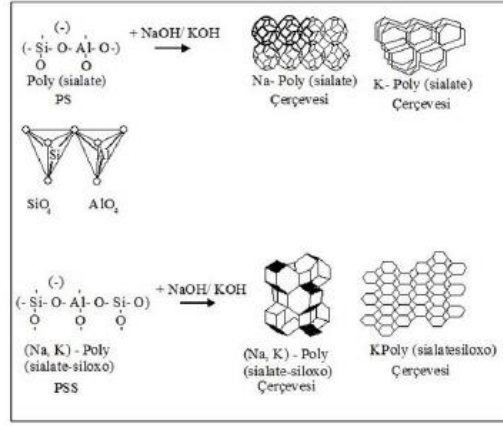


Şekil 2.10 : Jeopolimerizasyon süreci.

Kayalara benzer bir yapı oluşturmak adına alüminyum ve silis atomları sentezlenir. Ürün olarak oluşan inorganik ve polimerik ürünler, jeolojik feldispatların (mineral) amorf eşdeğeridir. İnorganik bu yapı organik polimerler gibi ısı ile sentezlenerek sertleşmektedir. Jeopolimer ismi buradan gelmektedir (Khale ve Chaudhary, 2007). Davidovits'e göre jeopolimer üretimi (Davidovits, 2008); alüminasilikat yapıtlı toprak kaynaklı yapıların (uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, volkanik tüf, metakaolin vb.) alkali silikat ve alkali tuzlar ile düşük ısıda reaksiyona girmesiyle başlamaktadır. Üretilen jeopolimerin istenilen özelliklere sahip olması için üretim tasarımı; katı malzeme kompozisyonu, aktivatör derişimi, kür sıcaklığı ve kür süresi önemle değeriendirilmedir. (Şekil 2.11- Şekil 2.12)



Şekil 2.11 : Uçucu kül bazlı jeopolimer üretimi (Zhuang ve diğ, 2016).



Şekil 2.12 : Silikat ve alüminantlarla jeopolimer üretimi (Khale ve Chaudhary, 2007).

Basınç dayanımı üzerine aktivatör derişimin doğrudan etkisi bulunmaktadır. Konsantrasyonun uygun oranlarda dahil edilmesi pozitif bir etki iken fazla ve az olması durumu tahmin edilemeyen sonuçlar çıkartmaktadır. Alkali aktive edilmiş matriste bulunan OH- iyonları çözünme hızını arttırsa da fazlalığı Al_2SiO_3 jel çökelek oluşturarak ürünün mekanik özelliklerini kaybetmesine neden olmaktadır (De Vargas ve diğ, 2011, Somna ve diğ, 2011). Jeopolimerizasyon, karışım içerisindeki alkali aktivatörlerin etkisiyle ekzotermiktir. Polikondenzasyon sürecinde su moleküllerinin de hidrasyonu jeopolimerizasyonda önemli rol oynar (Brew ve Mackenzie, 2007).

Hamur içerisindeki Si/Al oranı sonuç ürününü doğrudan etkilediği için gerekli durumlarda çözünebilir silikat eklenmesi çözülmüş silikat derişimini artırır (Fernandez ve diğ, 2009).

Puzolanlardan uçucu kül ve 750 °C fırınlanmış metakaolin (MK750) gibi hammaddeler yüksek dayanım sağlarken fırınlanmamış kaolin kili düşük dayanım sağlamaktadır (Hardjito ve diğ, 2005).

Kür sıcaklığı ve yaşı da ayrıca basıncı etkileyen konulardandır (De Vargas ve diğ, 2011, Somna ve diğ, 2011). Suyun dehidrasyonunu, karbon bileşiklerinin ayrılmasını sağlamaktadır. Ayrıca moleküllerin enerji düzeylerini arttırdığı için iyonize olmalarını kolaylaştırmaktadır. Kür işlemi ürünün reolojik özelliklerini iyileştirmektedir (Brew ve Mackenzie, 2007).

Geleneksel portland çimentosu yapısında dayanıma önemli bir katkısı olan C-S-H jeli ile jeopolimer içerisinde alüminyum ve silis kaynaklı NASH jeli oluşmaktadır (Aydın, 2010, Khale ve Chaudhary, 2007, Davidovits, 1991).

Kristal fazlar jeopolimerizasyona dahil olmamaktadır üstelik sentez sürecinde amorf fazların tamamı jeopolimere dönüşmeyebilir. Reaksiyon içerisindeki fazların sentezini artırmak için kısa süreli karışımlardan ziyade 15 dakika ve daha fazla karıştırma süresi gereklidir (He ve diğ, 2012).

Konvansiyonel beton su ile kütleme yapılırken jeopolimer betonlarda su ile kütleme yapılmaz. Jeopolimer betonların kimyasal reaksiyonlarında 3 farklı kür çeşiti kullanılmaktadır. Bunlar; buhar kürü, ısı kürü ve atmosfer kürüdür. En iyi jeopolimerleşme 40°C-85°C sıcaklıkları arasında olmaktadır (Singh ve diğ, 2013). Yapılan çalışmalarda kür süreleri 24 - 48 saat arası değişmektedir. 24 saatten uzun kür sürelerinin dayanımı artırma yönündeki iyileştirmeleri ihmal edilebilir olduğu gözlenmiştir (Nuriddin ve diğ, 2016).

Rovmamik'in 2009 yılında yaptığı çalışmada metakaolin esaslı jeopolimerin 40-80°C'de ilk 4 saatte hemen hemen yerleşmesine karşın 10 °C sıcaklıkta 4 günde yerleşmiştir. Farklı koşullar olmasına karşın 28 günlük dayanımda kayda değer farklılık olmamaktadır (Rovnanik, 2010).

Fırında ve atmosferde kürlenmiş jeopolimerin 7 – 14 -28 günlük basınç dayanımları kıyaslanan bir çalışmada Çizelge 2.16'deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 2.16 : Fırında ve atmosferde kürlenmiş jeopolimerin basınç dayanımları (Gholampour ve diğ, 2019).

	Jeopolimer karışım oranları	7 günlük (MPa)	14 günlük (MPa)	28 günlük (MPa)
Atmosfer koşulu (23°C)	%80 Uçucu Kül- %20 Yüksek Fırın Cürufu	30.8	37.1	41.5
	%50 Uçucu Kül- %50 Yüksek fırın Cürufu	34.8	40.9	44.5
	%80 Uçucu Kül- %20 Yüksek Fırın Cürufu	40.3	44.7	45.4
Fırın koşulu (70°C)	%50 Uçucu Kül- %50 Yüksek fırın Cürufu	42.6	45.8	46.9

2.2.4 Jeopolimerin performansı ve kullanım alanı

Ekolojik bir malzeme olan jeopolimer betonun konvansiyonel beton gibi avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Bilinirliği az olan bir malzeme olarak avantajlar ve dezavantajlar üretimi ve yaygınlaşmasını etkilemektedir.

Jeopolimer Betonun Avantajları

- Daha düşük CO₂ emisyonuna sahiptir ve enerji tasarrufu sağlamaktadır: *Çimento üretimi için 1.450 °C fırın sıcaklığı gerekmektedir. Jeopolimer oda kuru ve en fazla 100°C'lik buhar kuru ile üretilmesinden dolayı CO₂ emisyonu daha düşük ve enerji tasarrufu yüksektir (Toprak, 2011).*
- İyi derecede ısı yalıtımı sağlamaktadır: *Nano boşluklu yapıya sahip jeopolimerlerin ısı iletkenlik katsayıları düşük ($W/mK=0,2$) ve 2.000-2.500 kg/m³ yoğunluğa sahip çimento tabanlı yapı malzemelerine göre hafiftir (500-600 kg/m³) (Jonker, 2006).*
- Boşluklu yapısından dolayı yüksek sıcaklık ve yangın dayanımına sahiptir: *Yüksek sıcaklıkları uzun süre arka yüzeye geçirmemektedir ve uzun süre basınç dayanımlarını korurlar (Kriven, 2004).*
- Atık malzemelerin kullanımına teşvik eder ve hammadde kaynağı fazladır: *Silikat ve alüminalı silikat bileşenleri kullanılan jeopolimerler bu bileşenleri atık yüksek fırın cürufu, termik santral uçucu külü, taban külü ve metakaolinden sağlamaktadır. Atık olan bu malzemelerin depolanması yerine üretime dahil edilmesi önemli bir kazançtır (Toprak, 2011).*
- Yüksek hacim stabilitesi sağlamaktadır: *Geleneksel portland çimentosuna göre %80 daha az rötre yapmaktadır (Toprak, 2011). Basınç mukavemeti 70 MPa'a kadar ulaşabilmektedir. Erken dayanımı betona göre yüksektir (Gülner, 2019).*
- Dış etkilere dayanıklıdır: *Piramitlerde kullanıldığı düşünülen jeopolimerler beton yapı malzemelerine göre dış etkiler altında daha az kayıp vererek dayanabilmektedir (Toprak, 2011). Asite karşı dayanıklıdır (Gülner, 2019).*
- Kısa sürede dayanım kazanma: *Yapılan çalışmalarda görüldüğü üzere 4 saatlik priz süresinde %70'e kadar dayanım elde edilebilmektedir (Toprak, 2011). Ticari ismi Pyrament olan jeopolimer çimento pastası 6 saat içerisinde uçak inebilecek dayanımı kazanmaktadır (Url-14).*
- Donatıyla aderans yapma özelliği fazladır: *Bünyesindeki puzolan yapısından dolayı donatı ile aderansı yüksektir (Topçu ve Toprak, 2009, Annakoa, 2019, Gümüş, 2016).*

Jeopolimer Betonun Dezavantajları (Sarkaz, 2020)

- Üretimi zordur: *Özel işlem gerektiren malzemeler üretimde kullanılmaktadır. Oluşturulması zordur. Ek olarak, sodyum hidroksit vb. zararlı kimyasallar kullanılması başka bir zor yanıdır.*
- Hassas Üretim: *Konvansiyonel betona göre üretimi hassastır. Kullanılan malzemeler belirli oranlarda hassas şekilde karıştırılarak harç oluşturulur. Harç oranlarındaki değişiklikler sonuçların değişken olmasına neden olmaktadır.*
- Standart Üretim Sorunu: *Harç oranlarındaki değişiklikler farklı ve değişken sonuçlar verdiğinden dolayı standart bir numune üretimi yoktur. Değiştirilen oranların değişimiyle ilgili birçok unsur bulunmaktadır.*

Alkali aktivasyonundan yararlanılarak yapı yapımı Mısır Piramitlerinden daha yakın tarihli eski yapılara kadar gözlenmiştir. Ayrıca arkeolojide mezar heykelleri ve bilim tarihi gibi alanlarda kullanılmakta olduğu tespit edilmiştir (Maras, 2019, Davidovits, 2015).

Rusya, Ukrayna, Polonya ve Çin başta olmak üzere 80 yıla aşkın süredir alkali aktivesiyle oluşturulmuş betonların kullanıldığı yapı denemeleri ve yapımları yapılmaktadır (Shi ve diğ, 2006, Provis ve Van Deventer, 2014).

1960 yılında Ukrayna'nın Mariupol şehrinde alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu kullanılmış bloklar ve bağlayıcı kullanılarak 2 ile 15 katları arasında değişen yapılar inşa edilmiştir (Provis ve Van Deventer, 2014). (Şekil 2.13)



Şekil 2.13 : Mariupol'da yapılmış 2 katlı alkali aktivasyonu ile üretilen yapı (Provis ve Van Deventer, 2014).

Hlavacek'in 2014 yılında yaptığı çalışmada 2012 yılında Mariupol'de bulunan alkali aktivasyonu ile oluşturulmuş beton ve çeliklerle güçlendirilmiş yapılardan birinden (Şekil 2.14) örnek alınmıştır. Yapım yılında tasarlanan 7,5 MPa mukavemet 2012 yılında 14 MPa olarak ölçülmüştür (Hlavacek, 2014).



Şekil 2.14 : Mariupol'da bulunan Hlavacek'in çalıştığı bina (Hlavacek, 2014).

1974 yılında Polonya'nın Kraków şehrinde alkali aktivasyonu ile oluşturulmuş betonarme döşemeler ve duvar panelleri tasarlanmış depo binası inşa edilmiştir (Provis ve Van Deventer, 2014).

1988 yılında Çin'in Hubei eyaletinde Na_2SO_4 ile aktive edilmiş portland yüksek fırın cürufu ve çelikten oluşturulmuş prekast kiriş ve kolonların kullanıldığı ofis ve dükkân binası inşa edilmiştir (Şekil 2.15). 20 MPa olarak tasarlanan mukavemet 28 günlük dayanımı ölçüldüğünde 24,1 MPa çıkmıştır (Provis ve Van Deventer, 2014). Aynı yıllarda atölye olarak tasarlanan 3.500m^2 lik ve 12,6 m açıklıklı atölye binası için tasarım mukavemeti 30 MPa iken 28 günlük mukavemet 35,9 MPa çıkmıştır (Şekil 2.16) (Provis ve Van Deventer, 2014).



Şekil 2.15 : 6 Katlı ofis ve dükkân binası (Provis ve Van Deventer, 2014).



Şekil 2.16 : 12,6 metre açıklığa sahip atölye binası (Provis ve Van Deventer, 2014). 1986-1994 yılları arasında çok katlı yapılarda alkali takviyesiyle oluşturulmuş beton denemeleri yapıldı. 1988 yılında Rusya'nın Lipetsk kentinde 24 katlı olarak inşa edilen bir rezidansın dış duvarları yerinde dökülerek inşa edilirken strüktürel elemanları döşemeleri ve merdivenleri prekast olarak hazırlandı (Şekil 2.17) (Provis ve Van Deventer, 2014).



Şekil 2.17 : 24 katlı alkali aktive beton kullanılan yapı (Provis ve Van Deventer, 2014).

Jeopolimer beton üretiminde kullanılan ham madde kaynağı olarak zengindir. Atıkların kullanıldığı jeopolimer beton üretiminde yüksek sıcaklıklar gerektirmediği için düşük karbon emisyonuna ve maliyete sahiptir. Kısa sürede priz alabilen bu beton türünün kuruma ve büzülme değerleri düşüktür. Bünyesindeki puzolanların yapısından dolayı donatıyla aderansı fazla ve çevresel etkilere karşı dayanıklıdır. Üretim aşamasında suyun bünyeden ayrılması nano boşluklu bir yapı oluştururken,

jeopolimer betonun yüksek ısıya dayanıklı olmasını sağlar. Bahsedilen olumlu özellikler; inşaat, havacılık, otomotiv, plastik ve metalürji gibi alanlarda kullanılmasına olanak sağlar (Topçu ve Toprak, 2009, Annakoa, 2019, Gümüş, 2016). Kısa sürede priz mikro çatlaklara ve aktivatör olarak kullanılan alkaliler çiçeklenmeye sebep olabilmektedir (Görür, 2015).

Kullanım olanaklarının betonun kullanıldığı yerlerle paralel olmasından dolayı birçok yerde karşımıza çıkma potansiyeli olan jeopolimer beton yeni ve hassas bir malzemedir (Özodabaş, 2014, Shi ve diğ, 2006). Kullanım olanakları:

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| *Yapısal Betonlar | *Duvar Blok Elemanı Üretimi |
| *Elektrik Direkleri | *Prefabrik Yapı İnşaatı |
| *Gaz Beton Uygulamaları | *Sulama Sistemi ve Dalgakıran Yapımı |
| *Petrol Kuyuları | *Beton Kaldırım Yapımı |
| *Beton Büz Boru Yapımı | * Döşeme ve Temel Yapımı |
| *Güzel Sanatlar | *Yüksek Sıcaklığa Dayanıklı Beton |
| *Tehlikeli ve Radyoaktif Atık | |

Stabilizasyon Betonları

Jeopolimer beton kullanılan yapılara biri Brisbane West Wellcamp Havalimanıdır. Avustralya’da 2014 yılında açılmıştır. 40.000 m³ jeopolimer beton kullanımıyla dünyanın en çok jeopolimer kullanılan projesidir. Uygulama, uçak dönüş alanları, apronlar ve taksi yollarında yapılmıştır (Url-15). Ticari ismi Pyrament olan jeopolimer çimento pastası 1984 yılında Amerika’da bir havalimanında portland çimentosuyla karıştırılarak kullanılmıştır. 6 saat içerisinde uçak inebilecek dayanıma ve sertliğe ulaşan betonun 28 günlük basınç dayanımı 80 MPa’dır (Url-14).

Dünyanın ilk jeopolimer beton kullanılarak üretilmiş yapısı ise The University of Queensland’s Global Change Institute (GCI) binasıdır. Avustralya’nın Brisbane şehrinde yer almaktadır. HASSELL mimarlık tarafından tasarlanmış olan bina 3.865 m² inşaat alanına sahip eğitim yapısıdır. Yapı 2013 yılı itibarıyla tamamlanmıştır ve jeopolimer tek yapı olma özelliğini hala korumaktadır. Çevreci bir malzeme olan jeopolimer betonun kullanılması sürdürülebilir teknolojiler ve yenilikçi bina çözümlerine öncülük etmektedir (Url-16).

GCI çimento yerine uçucu kül kullanılan 33 adet 10 m x 2 m’lik prekast zemin döşemeleri ile inşa edilmiştir. Jeopolimer prekast döşemeler olduğu ürünler ve oluşum aşamasındaki kür koşulları düşünüldüğü zaman çevre dostu ve düşük maliyetlidir. Bina yaşam ömrü boyunca pasif soğutmasında önemli rol oynamaktadır.

Jeopolimer beton konvansiyonel betona göre %30 daha yüksek çekme mukavemeti, eğilme ve dayanıklılığa sahiptir. Ayrıca düşük büzülme, düşük ısı reaksiyonundan dolayı termal çatlama olasılığı da düşüktür (Url-17, Url-18, Url-19, Url-20).

Avustralya’da bulunan Brisbane şehri belediyesinin isteği doğrultusunda Brisbane, West Moggill ve Bundaleer köprüleri 40 MPa basınca dayanacak jeopolimer köprüler olarak tasarlanmışlardır (Aldred ve Day, 2012).

Amerikan ordusu piste dikey iniş ve kalkışlarda oluşan ısıya karşı dirençli olduğu için pist yapımında jeopolimer tercih etmektedir (Shah ve diğ, 2017).

Dekoratif ve kaplama malzemeleri üreten bir firmanın jeopolimer cephe kaplaması örnekleri Şekil 2.18 ve Şekil 2.19’de verilmiştir.



Şekil 2.18 : Brezilya’da kilise cephe kaplaması örneği (Schemeling ve Schemeling, 2014).



Şekil 2.19 : São Paulo’da bir kafenin cephe kaplaması (Schemeling ve Schemeling, 2014).

2.2.5 Jeopolimerin çevresel etkisi

Konvansiyonel beton bünyesinde bulunan portland çimentosu üretiminde kalsinasyon işlemi uygulanmasından kaynaklı olarak çevresel etkisi yüksektir. Pek çok konuda avantajlı olan portland çimentosunun çevresel etkisinin azaltılması konusunda alternatif malzeme arayışı 1950lerden beri sürmektedir. 1 ton portland çimentosu üretilmesi için 0,657 ton CO₂ karbon emisyonu salınmaktadır (Li ve diğ, 2011). 2017 yılında bir Türk çimento firmasının yayınladığı araştırmaya göre 1 ton çimento üretimi esnasında 0,776 ton CO₂ emisyonu salınmaktadır (Url-21). Küresel ısınma sorunu karbon emisyonunun sonuçlarından biridir. Küresel ısınma, atmosfere salınan gazların sera etkisi yaratması sonucu dünya yüzeyinde sıcaklığın artmasına denilmektedir. Başka bir deyişle, güneş ışınları tarafından ısınan dünya ışınları atmosfere yansıtmaktadır. Bu ışınlar atmosferde bulunan su buharı, karbondioksit, metan ve diazot monoksit gazlarına tutunmaktadır. Böylelikle yeryüzü sıcak kalmaktadır. Gelişen teknolojinin en önemli piklerinden olan Endüstri devrimiyle birlikte fosil yakıt kullanımındaki artış ivmelenmiştir. Kolaylaşan hayat şartlarıyla birlikte dünya nüfusu ve tüketim de doğru orantılı olarak artmıştır. Tüketim alışkanlıklarının bu hızlı artışıyla atmosferdeki zararlı gaz miktarı çoğalmıştır. Bilim adamlarına göre yığılma küresel ısınmaya neden olmaktadır (Url-22). (Şekil 2.20)



Şekil 2.20 : 2017 Karbon salınımı (Url-23).

Jeopolimer beton üretiminde bünyesine ikame edilen atık malzemeler demir üretimi sırasında atık olarak ortaya çıkan yüksek fırın cürufu veya kömür kullanılan termik

santrallerin bacalarından çıkan uçucu küllerdir. Yan ürünlerin kullanılması emisyon azaltılmasında önemli bir paya sahiptir. İkame malzemeler beton üretimi için özellikle üretilmediğinden ve jeopolimerizasyon aşamasında düşük kür sıcaklığı gerektirmeleri sebebiyle konvansiyonel betona göre CO₂ salınımı daha az ve enerji kullanımı daha düşüktür. Konvansiyonel beton ve jeopolimer beton üretim aşamaları karşılaştırıldığı zaman birbirinin alternatifi iki beton arasında %64 emisyon farkı görülmüştür. Jeopolimer oluşumu bakımından düşük emisyonlu bir malzemedir (McLellan ve diğ, 2011).

2.3. Konvansiyonel Beton ve Jeopolimer Betonun Karşılaştırılması

Bu bölümde konvansiyonel beton ve jeopolimer betonların içerdikleri malzemeler ve oluşturulan betonlardan beklenen özelliklerden bahsedilmiştir. İki malzemenin oluşum sürecinde oluşturdukları çevresel etkiler karşılaştırılmıştır.

2.3.1 Kullanılan malzemeler

Konvansiyonel beton alternatifi olarak düşünülen jeopolimer betonun ve konvansiyonel betonun içeriklerinin malzeme Çizelgesi 2.17 aşağıdaki gibidir.

Çizelge 2.17 : Konvansiyonel beton ve jeopolimer betonun malzeme karşılaştırması (Kayhan ve Özgünler Acun, 2021).

Konvansiyonel Beton	Jeopolimer Beton
Çimento	Atıklar ve Uçucu Küller
Agrega	Agrega
Su	Su (Kür işlemiyle birlikte malzeme bünyesinde kalmamaktadır.)
Katkı Malzemeleri	Katkı Malzemeleri
	Alkali Aktivatör

Geleneksel portland çimentosu ile jeopolimer çimento arasındaki farklardan biri, jeopolimer matris oluşumu ve mukavemeti için kalsiyum silikat ve hidrat oluşmamaktadır. Jeopolimerizasyonda mukavemet elde etmek için silika (SiO₂) ve alümina (AlO₃) polikondenzasyon (çoklu yoğunlaşma) yapar (Paya ve diğ, 2015, A Nazari, 2015).

2.3.2 Beklenen özellikler

Jeopolimer beton konvansiyonel betonun muadili bir malzeme olarak kaynaklarda bahsedilmektedir fakat kendine özel bir standardı yoktur. Türkiye gibi deprem kuşağında olan bir ülkede oluşabilecek tüm şartlara son derece uygun özelliklere sahip olmalıdır. Bu açıdan düşünüldüğü zaman jeopolimer betonun sağlaması gereken fiziksel ve mekanik özellikler konvansiyonel betonla aynı olmalıdır. Beton hakkında uyulması gereken standartlar Çizelge 2.18’de verilmiştir.

Çizelge 2.18 : Betonla ilgili Türk standartları.

Standartlar	Kabul Tarihi
TS 213-1 EN 13748-1 Terrazo karolar - İç mekânlarda kullanım için	27.09.2005
TS 213-2 EN 13748-2 Terrazo karolar - Dış mekânlarda kullanım için	27.09.2005
TS EN 771-3+A1 Kâgir birimler - Özellikleri - Bölüm 3: Beton kâgir birimler (Yoğun ve hafif agregalı)	27.08.2015
TS 407 Beton mamuller - Döşeme sistemleri - statik çalışmaya katılmayan asmolen hafif beton blok	19.07.2012
TS 1902 EN 588-1 Elyafli çimento borular-Kanalizasyon ve drenaj için bölüm 1: Basınsız borular, birleşim parçaları, birleşim özel parçaları	07.04.1999
TS 802 Beton karışım tasarımı hesap esasları	24.03.2016
TS EN 12467+A2 Lifli çimentodan yapılmış düz levhalar - Mamul özellikleri ve deney yöntemleri	19.11.2018
TS 1247 Beton yapım, döküm ve bakım kuralları (Normal hava koşullarında)	19.11.2018
TS 1248 Betonun hazırlanması, dökümü ve bakım kuralları - Anormal hava şartlarında	08.03.2018
TS EN 490+A1 Çatı örtüsü ve duvar kaplaması için beton çatı kiremitleri ve bağlantı parçaları - Mamul özellikleri	20.03.2017
TS EN 12467+A2 Lifli çimentodan yapılmış düz levhalar - Mamul özellikleri ve deney yöntemleri	19.11.2018
TS 2824 EN 1338 Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları	29.04.2005

Çizelge 2.18 (Devam) Betonla ilgili Türk standartları.

Standartlar	Kabul Tarihi
TS EN 934-2+A1 Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme	20.04.2013
TS EN 14992+A1 Öndökümlü beton mamuller - Duvar elemanları	10.04.2013
TS EN 13693+A1 Ön dökümlü beton mamuller - Özel çatı elemanları	13.04.2010
TS EN 13747+A2 Öndökümlü beton mamuller - Döşeme sistemlerinde kullanılan döşeme plakaları	13.07.2010
TS 4060 Denizlikler - Betondan yapılmış, hazır	16.12.2019
TS 4063 Pencere parapetleri - Betondan yapılmış, hazır	16.12.2019
TS EN 14843 Öndökümlü beton mamuller - Merdivenler	30.04.2008
TS EN 206:2013+A1 Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk	09.01.2017

“Konvansiyonel betonun bileşenleri ve üretimi” ve “Jeopolimer betonun bileşenleri ve üretimi” kısımlarında iki betonun bileşenlerinden bahsedilmiştir. Bu bölümde bu bileşenlerin sağlaması beklenen özelliklerden bahsedilecektir.

Konvansiyonel betonlarda çimento ana bileşenlerden biridir. Jeopolimer betonların bünyesinde çimento bulunmamaktadır. Çalışmalarda çimento koyulan deneyler yapılsa da jeopolimerizasyon gerçekleşmesi için çimento ikamesi olmamalıdır. Beton içerisinde kullanılacak çimentodan mekanik, fiziksel, kimyasal ve dayanımlarının yüksek olması beklenmektedir. Bu özellikler TS EN 197-1 standardına göre sağlanmalıdır. Jeopolimer için bir standart oluşturulmadığı için yapı yapmak için beklenen mekanik ve kimyasal özellikler betonunkiyle aynı kabul edilebilir.

Geleneksel portland çimentosu yapısında dayanıma önemli bir katkısı olan C-S-H jeliyken jeopolimer içerisinde alüminyum ve silis kaynaklı NASH jeli oluşmaktadır (Khale ve Chaudhary, 2007).

Agregalar harç bünyesindeki suyun çıkışından sonra betonun çatlamasını ve büzülmesini önler. Agregaların sert ve dayanımı yüksek olması betonun basınç dayanımını arttırmaktadır (Erdoğan, 2003). Beton harcında agrega hacminin

maksimum olması betonun kompozitesini arttırır eğer kompozite düşükse bağlayıcı harç miktarı artmaktadır. Bu durum çevresel etkiyi ve maliyeti arttırmaktadır (Postacıoğlu, 1987). Betonlarda kullanılacak agreganın fiziksel, kimyasal ve geometrik özellikleri TS 706 EN 12620+A1 “Beton Agregaları” standardına göre seçilmelidir. Jeopolimer beton için de agrega seçimi bu standartta göre yapılabilir.

Karışım suyu en genelgeçer bilgiyle içilebilir olmalıdır. Su içerisinde bulunabilecek partikül ve iyon çeşitliliği, oluşturulacak çimento hamurundaki kimyasal reaksiyonları etkileyebilmektedir. Etkilenmiş hamur sonucu oluşan betonun istenilen mekanik ve kimyasal özellikleri karşılamama olasılığı bulunmaktadır. İçme suyuyla oluşturulmamış betonarme yapılarda donatılar beton içerisindeki iyon yapılı moleküllerle korozyona uğrayabilir (Erdoğan, 2003). Jeopolimerizasyon sürecinde karışım içerisindeki derişimin ve molar oranın önemi kritiktir. Hassas üretime sahip jeopolimer bünyesindeki suyunun oluşturduğu ürünü sonunda dışarı atsa da su içerisindeki partiküllerin ve iyonların ürüne etkisi olacaktır.

Kimyasal katkı (su azaltıcı, priz geciktirici, priz hızlandırıcı vb.) ve mineral katkı (yüksek fırın cürufu, silis dumanı, uçucu kül, doğal puzolan vb.) olmak üzere iki çeşit katkı malzemesi vardır. Beton içerisine çimento ağırlığının %5’inden fazla katılmazlar. Bu katkıların tek başına bağlayıcı özelliği bulunmamaktadır fakat ince öğütülmüş kireçle hidrolik bağlayıcı özelliği kazanan silisli veya alümin ve silisli bir arada bulunan malzemelerdir (Erdoğan, 2003). Temelde silis ve alümin içerikli malzemelerin aktive edilmesiyle oluşturulan jeopolimer içerisine kimyasal katkı malzemeleri ikamesi çalışmaları yapılsa da istenilen özellikleri sağlaması bünyesindeki mineral katkıların oranlarıyla elde edilir.

Jeopolimer portland çimentosuna göre içerisinde düşük kalsiyum (Ca) miktarı bulundurmaktadır. Bu sayede asitlere karşı daha dirençli yapıdadır (Bakharev, 2005, Andini ve diğ, 2008).

Yüksek sıcaklık ve beton dayanımı ters orantılıdır. Sıcaklık arttıkça dayanım düşer. Düşen dayanım betonarmedeki pas payını eritmekte ve betonarme içerisindeki donatıya kolaylıkla ulaşmaktadır (Kong ve Sanjayan, 2010, Sanjayan ve Stocks, 1993). Jeopolimerin nano boşluklu yapısı ve seramik özelliği yüksek sıcaklara konvansiyonel betonarme yapılara göre daha dayanıklı yapıya sahiptir (Davidovits, 1991, Kong ve Sanjayan, 2010, Bakharev, 2005, Cheng ve Chiu, 2003).

2.3.3 Konvansiyonel beton ve jeopolimer betonun çevresel etkilerinin karşılaştırılması

Yapı sektöründe en çok kullanılan yapı malzemesi betondur. 2014 yılında yapılmış bir çalışmaya göre dünyada 10 milyar m³ hazır beton üretildiği belirtilmektedir. Dünya nüfusunun yaklaşık 7 milyar olduğu kabul edildiği zaman kişi başına 1,5 m³ beton ve 3,5 ton hazır beton düşmektedir (Url-24). Yaygın kullanıma sahip olan betonun üretimi ve tüketiminde azaltılmaya gidilebileceği düşünülemez fakat enerji tüketimi yüksek beton geliştirilerek çevresel etkisi düşürülebilir. Beton içerisinde en yüksek çevresel etkisi olan bileşen çimentodur ve çimentonun azaltılması yaklaşımı yaygın bir uygulamadır. Bu noktada çimento miktarını azaltmak yerine tamamen kaldırmak örneğin jeopolimerizasyon etkili bir çözümdür.

Bu bölümde konvansiyonel betonun çevresel etkisinden bahsedilecek ve jeopolimer betonun hangi başlıklarda yarar sağladığı tartışılacaktır.

Beton kaynaklı CO₂ emisyonunun azaltılması adına başlıca 2 yaklaşım mevcuttur.

- 1- Beton üretiminde CO₂ emisyonunun azaltılması (Doğrudan Kazanım)
- 2- Yapının kullanımı boyunca CO₂ emisyonunun azaltılmasına yönelik tasarım (Dolaylı Kazanım)

1- Beton üretiminde CO₂ emisyonunun azaltılması (Doğrudan Kazanım):

Beton bileşenlerinde oranlar değiştirilerek çevresel etki değerleri iyileştirilebilir ve düşürülebilmektedir. Başka bir deyişle, enerji tüketimi azaltılabilir, CO₂ emisyonu azaltılabilir ayrıca bunlarla bağlantılı olarak çevre sorunlar iyileştirilebilir ve azaltılabilir. Beton bileşenleri içerisinde çimentonun azaltılması çevresel etki değerlerinin düşürülmesinde etkili bir çözümdür. Çimentonun kaynaktan çıkarılması, üretiminde yüksek dereceli fırınların kullanılması ve nakliyesi yüksek enerji tüketimine sahip süreçlerdir. Yapı malzemelerinin üretimi sırasında atmosfere verilen CO₂ miktarına “gömülü CO₂” (ECO₂) kullanılan enerjiye de “gömülü enerji” denilmektedir. 1 ton normal portland çimentosu üretimi (PÇ) için atmosfere 1 ton CO₂ salgılandığı birçok kaynaktan karşımıza çıkan bir kabuldür (MPA 2008a). Betonun gömülü enerjisi (ECO₂) değerini azaltmak için sanayi atığı olan uçucu kül, silis dumanı, pirinç kabuğu külü, yüksek fırın cürufu ve çimentoya göre daha az oluşum enerjisine sahip metakaolin gibi yapay puzolanlar kullanılması etkili bir yaklaşımdır. Bahsi geçen puzolanların ECO₂ değerlerinin düşük olmasının başlıca sebebi yan ürün olmalarıdır. Bu puzolanlar muadili oldukları bağlayıcı malzemeden

daha az ECO_2 'e sahip oldukları için katıldıkları malzemenin de gömülü enerjisini düşürürler. (Çizelge 2.19)

Çizelge 2.19 : C28/35 betonunun ECO_2 değerinin kullanılan bağlayıcıya göre değişimi (MPA 2008a, MPA 2008b).

Bağlayıcı	Betonun ECO_2 değeri (kg CO_2 /ton)
Geleneksel Portland Çimentosu	120
Uçucu kül (%35) katkılı Portland Çimentosu	80
Geleneksel PÇ (%70) + Uçucu Kül (%30)	85
Geleneksel PÇ (%50) + Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (%50)	65

Karbon ayak izinin azaltılmasında bir diğer faktör de üretilen malzemenin dayanımının artırılmasıdır. Kullanılan malzemenin ömrünün uzun olması oluşum ve bakım süresinde harcanan enerji tüketimini uzun vadede karşılayabilmektedir. CO_2 emisyonunu telafi edebilmektedir. Ayrıca dayanımı artırılan yapı elemanının kullanım miktarında düşüş görülecektir. Kullanımında düşüş görülen malzemenin çevresel etkisi düşmektedir. Örneğin, yüksek basınç dayanımlı betonun kullanıldığı bir yapıda konvansiyonel betona göre yapı elemanı kesitleri daha az çıkacağı için beton kullanım miktarı düşer ve çevresel etki azalır.

Doğrudan gömülü enerjisi düşüren yaklaşımlar sırasıyla; yüksek oranda mineral katkı içeren betonlar, düşük bağlayıcı miktarı içeren betonlar, alkali reaktif agregaya dirençli betonlar ve yerel üretim agregası kullanılan betonlardır.

2- Yapının kullanımı boyunca CO_2 emisyonunun azaltılmasına yönelik tasarım (Dolaylı Kazanım):

Dolaylı kazanım, yapının kullanım süresi boyunca yapıya kattığı çevresel etki kazanımlarıdır. Bahsi geçen kazanımlar; ısıtma ve soğutma yüklerinin azaltılması olabilir. Ayrıca; işletme ve bakım gibi uygulamaların kolaylaştırılması ya da azaltılmasını sağlar.

Beton, katkı malzemeleri ikame edilerek istenilen özelliklere göre iyileştirebilen bir yapı malzemesidir. Örneğin: beton yüzeyine uygulanan ya da yapısına katılan

Titanyumdioksit (TiO_2) betonun “kirlilik emici beton” olmasını sağlar. Üzerinde bulunan kirleri ışık ve su yardımıyla parçalayarak yüzeyinden uzaklaştırmaktadır.

Dolaylı kazanım konusunda başlıca konulardan biri de malzemenin “termal kütlesi (ısı kütlesi)”dir. Yapı malzemeleri bünyelerinde ısı depolama özellikleri sayesinde inşa edilen yapının ısıtma ve soğutma yükleri azaltılmaktadır. Böylelikle dolaylı olarak CO_2 emisyonu azaltılmaktadır. Çizelge 2.20’de yapı malzemeleri ve çeşitli duvar bloklarının enerji geri ödemeleri gösterilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere 1 m²’lik bir yoğun beton blok duvarın oluşum enerjisi 20 GJ’dir. Duvarın yalıtılmasıyla sağlanan U değeri 0,45 iken yılda 76,9 GJ, bu değer U değeri 0,10 iken yılda 2.000 GJ geri ödeme oluşmaktadır (Anderson, 1988).

Çizelge 2.20 : Yalıtım malzemeleri için oluşum enerjisi geri ödeme zamanları (Anderson, 1988).

İç Gövde Malzemeleri	1 m²’lik duvarın oluşum enerjisi (GJ)	Enerji geri ödemesi: orijinal U=0,45 (yıllarda)	Enerji geri ödemesi: orijinal U=0,10 (yıllarda)
Tuğla	32	51,6	1067
Yoğun beton blok	20	76,9	2000
Hafif beton	21	11,7	230
Havalı beton	38	11,1	180

Yapılan çalışmalar incelendiğinde betonun bileşenlerindeki çimento, su gibi malzemelerin azaltılması söz konusudur fakat jeopolimer beton üretiminde kullanılan bileşenler azaltılmaya çalışılan bu bileşenleri içermez. Farklı bir şekilde açıklamak gerekirse yapısı gereği puzolan ve alkali aktivatörlerden oluşan jeopolimerler içlerinde yüksek ilk somutlaşma enerjisine (ECO_2) sahip çimento katkısı ve çimento tüketimini arttıran su barındırmamaktadır. Yan ürünler kullanılarak üretilen jeopolimer, ilk somutlaşma enerjisi (ECO_2) düşük bir yapı malzemesidir. Bundan dolayı, doğrudan kazanım başlığı altında incelendiğinde avantajlı bir yapı malzemesidir.

Jeopolimer beton üretiminde atık malzemelerin/yan ürünlerin kullanılması, düşük kür sıcaklığı uygulaması ve üretiminde yüksek sıcaklıklarda fırınlanma aşaması olmadığı için portland çimentosuna göre CO_2 salınımı daha az ve enerji kullanımı daha düşüktür. Üretim aşamaları incelendiğinde jeopolimer, portland çimentosuna göre %64 daha az emisyon oluşumuna sahip olduğu görülmüştür (McLellan ve diğ, 2011).

Beşikten sahaya jeopolimer beton üretimi, portland çimentosuyla oluşturulan bir betona göre %70 daha düşük küresel ısınma potansiyeline sahiptir (Provis ve van Deventer, 2009).

Jeopolimer beton dolaylı kazanım başlığı altında değerlendirildiği zaman; yapısında su bulundurmaması ve suyun karışım aşamasında eklenmesi durumunda üretim aşamasındaki yapısından ayrılması malzemesinin yapısında mikro gözenekler oluşturmaktadır. Bu sayede jeopolimer betonun ısı yalıtımı konvansiyonel betona göre daha iyidir.

Araştırmalara göre jeopolimer beton konvansiyonel betona göre temel dayanım özellikleri daha iyidir (Dombrowski ve diğ, 2008).

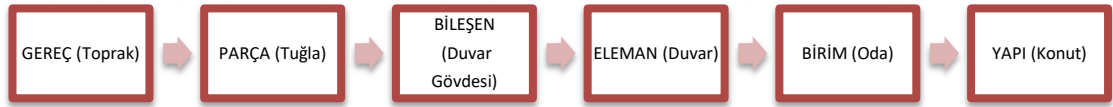
Kullanım sonrası jeopolimer beton, konvansiyonel beton gibi parçalanarak dolgu gibi amaçlar için kullanılabilir. Bundan dolayı “geri dönüşüm/bertaraf” başlığı altında jeopolimer betonun konvansiyonel betona kıyasla ekolojik bir avantajı ya da dezavantajı bulunmamaktadır (Provis ve van Deventer, 2009).

3. YAPI ÜRÜNÜ VE MALZEMESİ OLARAK JEOPOLİMER

Bu bölümde yapı ürünü ve malzemelerin sınıflandırılması sonrasındaki seçim yöntemlerinden bahsedilmiştir. Jeopolimer beton hakkında yapılan çalışmalar derlenmiştir. Jeopolimer betonun yapı ürünü ve malzemesi olarak kullanılması için özellikleri değerlendirilmiştir.

3.1 Sürdürülebilir Yapı Ürünü ve Malzemeleri

İnsanlar tarafından canlılar ve cansızlar için yapılan yapılar, çok parçalı sistemlerdir. Sistemleri sıralayan Toydemir ve diğerleri, (Toydemir ve diğ., 2000) mikrodan makroya sırasıyla yapı malzemesi, yapı elemanı, mekan, bina, bina kompleksi, şehirselle bölge, kent, ülke, dünya olarak sıralamıştır. Mikro ölçeğe odaklanıldığında bu sıralama mikrodan makroya aşağıdaki Şekil 3.1'deki gibidir (Balanlı, 1997, Önel, 1978, Özkan, 1976).



Şekil 3.1 : Yapı sistemlerinin ilişkisi (Balanlı, 1997,Önel, 1978,Özkan, 1976).

Bahsedilen sistemlerin herhangi bir düzeyinde oluşan değişiklikler ve düzenlemeler diğer sistemleri olumlu ve olumsuz olarak etkilemektedir. Bu tez kapsamında Şekil 3.1'deki sıralamada “parça” olarak isimlendirilmiş kısım yapı ürünü olarak ele alınmıştır.

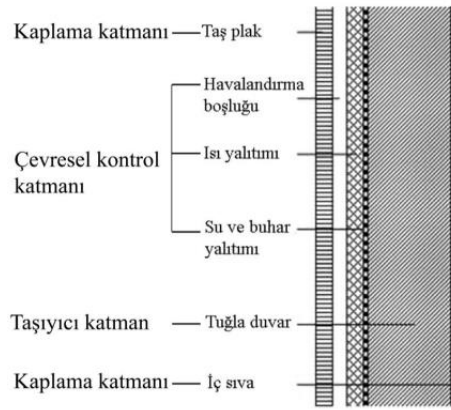
Türkçü'ye göre yapı elemanları (Türkçü, 2010), ana ve yardımcı olarak ikiye ayrılmaktadır. Ana elemanlar; temel, döşeme, duvar ve çatıdır. Yardımcı elemanlar ise düşey sirkülasyon elemanları ve doğramalardır.

Balanlı'ya göre (Balanlı, 1997), yapı elemanı bir veya daha fazla gereksinimi karşılamak için çeşitli sistemlerle bir araya getirilmiş parça ve bileşenlerin bütünüdür.

Yapılan çalışmalar gösteriyor ki, tek katmanlı yapı elemanları olabileceği gibi -tek katmanlı yapı elemanları birden fazla özellik sağlama konusunda yetersizdir- yapı

elemanlarının özellikleri, kullanılan yapı ürünleri ve bileşeniyle de doğrudan bağlantılıdır. İhtiyaca göre tasarım konfigürasyonları ve malzeme seçimi önemli bir rol oynamaktadır.

Başarır (Başarır, 2013), yapı elemanlarının katmanlaşmasını statik açıdan mukavemete sahip taşıyıcı katman, elemandan beklenen termal, akustik vb. ihtiyaçların sağlanmalarına yardımcı olan kontrol katmanı ve dış etkilerle doğrudan ilişkili olan görsel nitelik değeri olan kaplama katmanı olarak üç ana katmana ayırmaktadır. Kaplama katmanı bu tez kapsamında bir yapı ürünü olarak değerlendirilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : Yapı elemanı katmanlaşması (Başarır, 2013).

Çok parçalı yapıya sahip yapı elemanının bitiş katmanı yapı ürünü olarak tanımlanabilir. Düşey ya da yatay olmak üzere çeşit fark etmeksizin elemanın mekanla karşılaştığı ilk kesit olarak düşünülebilir.

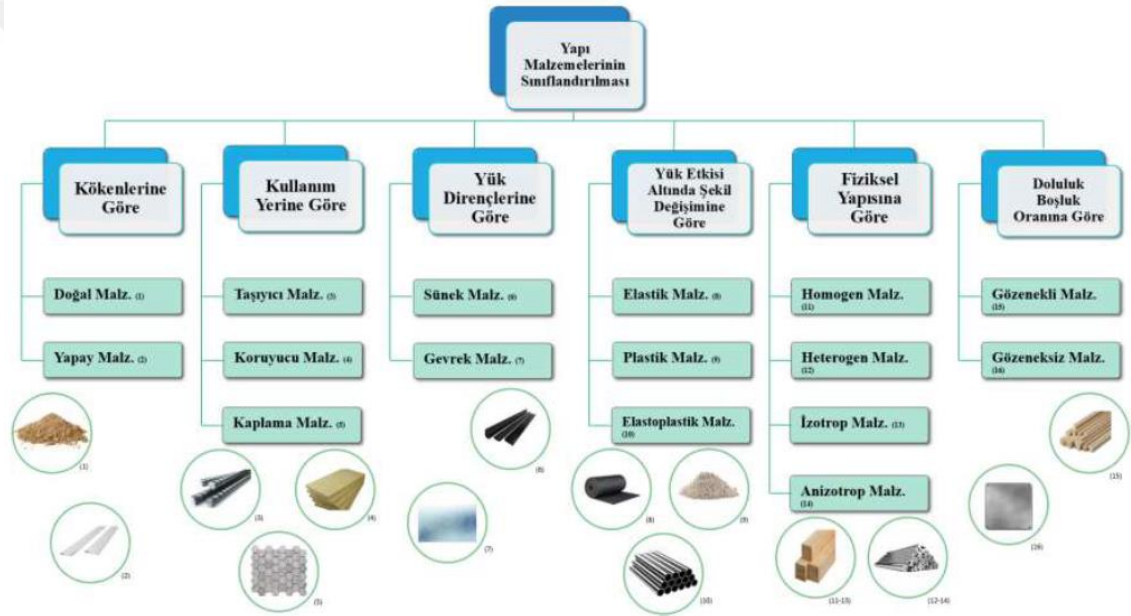
Yapı malzemeleri, yapı ürünlerinin hammaddeleridir. M. Eriç'in yazdığı Yapı Fiziği ve Malzemesi kitabına göre “Bir tasarımın bünyesine giren ve tümde o tasarımın oluşum ve kullanma süreci içindeki biçimlenişini sağlayan ve tasarımı kullanan insanın sağlık ve konforunu düzenleyen her tür işlenmemiş, yarı veya tam işlenmiş maddeler” olarak tanımlanmaktadır (Eriç, 2010, s.11). Jeopolimer beton, Eriç'in çalışması incelendiğinde Suni Taş Yapı Malzemesi başlığı altında kabul görebilir.

Yapı malzemeleri; (Eriç, 2010)

1. Doğal Taş Yapı Malzemesi
2. Agregat Yapı Malzemesi
3. Bağlayıcı Yapı Malzemesi (Alçı, Kireç, Çimento)
4. Suni Taş Yapı Malzemesi (Harç, Beton, Özel Beton)
5. Pişmiş Toprak Yapı Malzemesi
6. Cam Yapı Malzemesi

7. Metal Yapı Malzemesi
8. Ahşap Yapı Malzemesi
9. Bitüm ve Katran Yapı Malzemesi
10. Plastik Yapı Malzemesi
11. Boya ve Sıva Kaplama Yapı Malzemesi (Boya, Badana, Vernik, Cila ve Hazır Sıvalar)'dir.

Yapı malzemeleri farklı ihtiyaçlar için üretilmektedir. Bundan dolayı yapı malzemeleri; kökenlerine göre, kullanım yerine göre, yük dirençlerine göre, yük etkisi altında şekil değişimine göre, fiziksel yapılarına göre ve doluluk-boşluk oranlarına göre sınıflandırılabilir. Şekil 3.3'de yapı malzemesi sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 3.3 : Yapı malzemelerinin sınıflandırılması (Sağlam, 2021).

Yapı malzemeleri sınıflandırılması kapsamında jeopolimer beton çalışmaları ışığında belli başlı başlıkları yorumlamak gerekirse;

- Kökenlerine Göre: Yapay bir malzeme olan jeopolimer beton doğal kayaçların davranışını sergilediği için isimlendirilirken “jeo-” ön ekini almıştır.
- Kullanım Yerine Göre: Yapılan çalışmalarda “kullanım yerine göre” başlığı içerisindeki tüm alt başlıklar için kullanılabildiği görülmüştür. 2.2.4 Jeopolimerin performansı ve kullanım alanı bölümünde taşıyıcı olarak kullanıldığı örneklerden bahsedilmiştir. Jeopolimer mikro gözenekli

yapısından dolayı yalıtım köpüğü olarak da kullanılmaktadır. Kaplama malzemesi olarak jeopolimer beton, jeopolimer seramik üretildiği gibi ahşap kullanılarak oluşturulan çeşitli kaplama malzemesi örnekleri de bulunmaktadır.

- Yük Dirençlerine Göre: Jeopolimer içerisindeki katkılarla süneklik ve gevreklik davranışları değiştirilebilir. Plastik ve cam katkılı jeopolimerler gevrek bir davranış gösterirken, süper akışkanlaştırıcı gibi katkılarla tokluk seviyesi yükseltilmiş jeopolimerler sünek bir davranış göstermektedir.
- Fiziksel Yapısına Göre: Jeopolimer homojen yapılıdır.
- Doluluk-Boşluk Oranına Göre: Isı kürü sırasında bünyesinden ayrılan su jeopolimeri mikro gözenekli bir yapı haline getirir.

Kaynak tüketimi ve yönetiminin önemli olduğu günümüzde sınıflandırmanın bir parçası olarak da malzemenin sürdürülebilirlik durumu önem kazanmaktadır. Literatür çalışmalarında malzeme sınıfı olarak ekolojik, yeşil ve sürdürülebilir malzemelerden bahsedilmektedir. Ekolojik ve yeşil malzeme tanımları birbirinin aynısı olarak kabul edilebilir. Sürdürülebilir malzeme kavramı ise daha geniş kapsamlı olup bu iki isimle anılan malzemeleri kapsamaktadır.

Ekolojik ve yeşil malzemeler; az enerji tüketen, doğal kaynaklar kullanan ve doğayla uyumlu, toksit madde içeriği az olan, insan sağlığına negatif etkisi bulunmayan ve ekonomik malzemelerdir (Url-1).

Sürdürülebilir yapı malzemelerinde temel kavramlardan biri de gelecektir. Ekolojik ve yeşil malzemelerde üretim süreci önemlidir. Sürdürülebilir malzemede ürünün yaşam süreci ve hatta tekrar kullanım süreci de önemlidir. Dahası sürdürülebilir malzemelerde geleceğe günümüz imkanları, hatta daha iyi imkanlar bırakmak hedeflenmektedir. Kısacası, sürdürülebilir malzeme üretiminde kaynak kalıcı olarak azaltılmayacak şekilde kullanılmaktadır.

Sürdürülebilir malzemelerin ekolojik ve yeşil malzemeleri kapsadığını bir örnekle anlatmak gerekirse; bambu döşemeler yenilenebilir kaynaklardan üretilmiş yeşil ürünlerdir fakat bambu döşemeler Çin'de üretilmekte ve ülkelere nakledilmektedir. Ulaşım için kullanılan enerji miktarı ve bundan kaynaklı oluşan çevresel emisyonlar, malzemeyi Çin dışında kullanıldığında sürdürülebilir yapmamaktadır (Url-25).

Ürünlerin, çevresel ve sosyal olarak özelliklerinin tüketicilere sunulması için eko-etiketler kullanılmaktadır. Malzeme seçimini yapan; mimar, mühendis veya müteahhit gibi meslek grupları ve kullanıcılar sürdürülebilir ürünleri tercih etmek

istemektedir. Ürüne ulaşmaları eko-etiketler tarafından sistematikleştirilmiştir. Gelişmiş ülkeler kendi ulusal etiketlerini oluşturmaya çalışmaktadır (Delmas ve diğ, 2013).

Yapı malzemelerinin sürdürülebilir olma ve olmama durumu, oluşumundaki malzeme, malzemelerin kaynağına ve kaynak oluşum enerjisi miktarına bağlıdır. Yapı ürünü oluşumunda ise sürdürülebilirlik, oluşumunda tüketilen enerji miktarına, imalat sırasında tüketilen enerji miktarına, sahaya gelene kadarki lojistik sürecine, yaşam ömrü boyunca bakım için tüketilen enerji miktarına, insan sağlığı üzerindeki etkisine, geri dönüştürülebilir olup olmadığına ve bertaraf aşamasında tüketilen enerji miktarına bağlıdır.

Oluşumunda atık malzeme kullanımını teşvik eden jeopolimer betonun oluşum enerjisi, alternatifi olduğu konvansiyonel betona kıyasla daha düşüktür. Yapılan çalışmalarda betonun sürdürülebilir malzeme olmasıyla ilgili farklı görüşler bulunmaktadır. Kullanılan malzemeler gösterilerek sürdürülebilir malzeme olmadığını savunan bir görüş varken, kullanım ömrünün uzunluğu dikkat çekilerek sürdürülebilir olduğunu ortaya savunan bir görüş de bulunmaktadır. Jeopolimer beton oluşumunda kullanılan malzemeler düşük oluşum enerjisine sahiptir. Ayrıca, dış ortama dayanıklı olan jeopolimer beton, uzun ömürlü olma özelliğiyle de sürdürülebilir bir yapı ürünü ve malzemesidir.

3.2 Yapı Ürünü ve Malzemelerinin Seçim Kriterleri ve Yöntemleri

Yapı ürünü ve malzemesi olarak seçilecek malzemenin, değerlendirilmesi gereken pek çok konu vardır. Verilmek istenen duygu, ürün dokusu, dış ve iç ortam koşulları, maliyet gibi ihtiyaca yönelik tercihler tasarım kaygısı olarak adlandırılabilir. Tasarım kaygısı ile birlikte çevresel etkiler de tasarımcı tarafından düşünülmesi gereken önemli başlıklardandır. Malzemenin seçim aşaması; hammadde olarak çıkarılması, hazırlanması, üretim ve fabrikasyon süresi, yapım, kullanım ve onarım süreleri sonrasındaki geri dönüşümü ve oluşturduğu atık olmak üzere pek çok girdili bir seçim aşamasıdır.

Arıoğlu malzeme seçimi konusunda “Önemli olan karardaki başarı, karar vericilerin paylarına düşen görevleri yerlerine getirmelerine, ürün bilgilerine ve bilgi iletişiminin varlığına bağlı kalmaktadır. Ürünlerin kullanım olanakları, sınır şartları

bilinmedikçe seçimlerin amaca uygun ve doğru olması beklenemez.” demiştir (Arıoğlu, 1993, s.1).

Yapı malzemeleriyle ilgilenen pek çok uzmanlık alanı bulunmaktadır. Malzeme seçimi; mimarlık, malzeme bilimi, makine mühendisliği, endüstri mühendisliği ve ergonomi gibi çeşitli uzmanlık alanlarının iş birliği içerisinde çalışmasına dayanmaktadır. Yapı malzemesi seçimi kriterleri S.S. Sağlam’ın oluşturduğu çalışma geliştirilerek Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

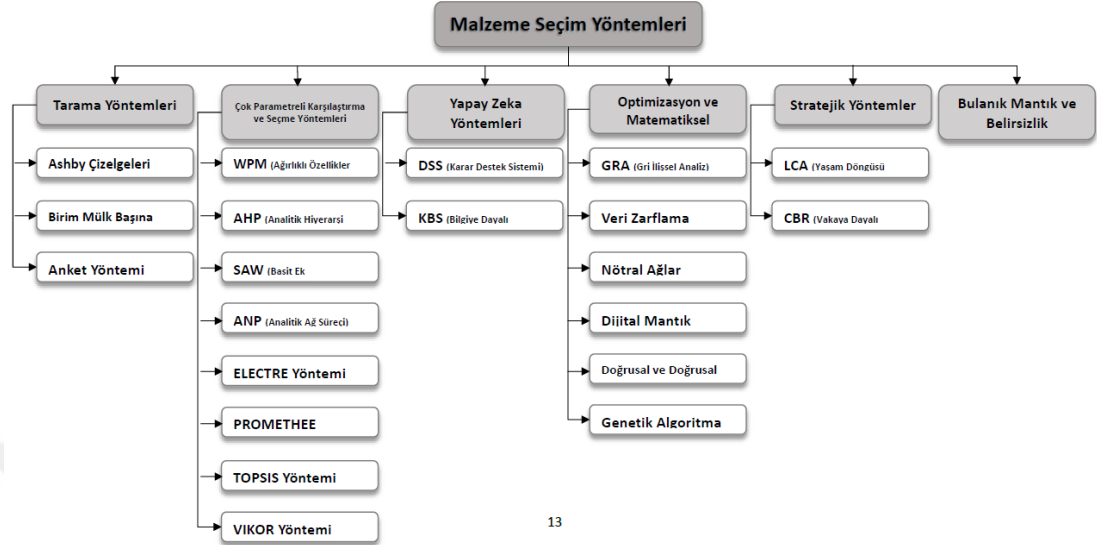
Çizelge 3.1 : Yapı malzemesi seçim kriterleri (Sağlam, 2021).

Yapı Malzemesi Seçimi Kriterleri	Fiziksel Özellikler
	Mekanik Özellikler
	Kimyasal Özellikler
	Dayanıklılık
	Termal Özellikler
	Akustik Özellikler
	Optik Özellikler
	Kullanıcı Beklentileri
	Maliyet
	Çevresel Etkiler
	Geri Dönüştürülebilirlik
	Kullanılabilirlik
	Estetik Özellikler
	Üretim Yetenekleri
	Teknolojik Özellikler

Birden fazla seçim kriteri olan malzemelerde istenilen belli başlı başlıklar için beklenen değerler sağlanırken bazı başlıklardan fedakarlık edilmesi gerekebilir. Bundan dolayı tek doğrusu olmayan malzeme seçiminde çözüm üretilmesi gereken konularla birlikte sağlanması mümkün olmayan etkenlerin dengelenmesi gerekmektedir (Rahim ve diğ, 2020).

Dengeyi bulmak için birçok seçim aracı ve yöntemi bulunmaktadır. Tarama yöntemleri, analitik yöntemleri barındıran çok parametrelili seçim yöntemleri, yapay

zeka yöntemi, optimizasyon ve matematiksel yöntemler, stratejik yöntemler ve bulanık mantık ve belirsizlik yöntemi malzeme seçimi için kullanılan yöntem başlıklarıdır (Sağlam, 2021). Şekil 3.4'te malzeme seçim yöntemleri verilmiştir.



Şekil 3.4 : Malzeme seçim yöntemleri (Sağlam, 2021).

Bu bölümde tez kapsamında önerilen jeopolimer cephe kaplama ürünü için yaşam döngü değerlendirilmesine (YDD) başvurulmuştur. Yaşam döngü etki değerlendirmesi yapılarak (YDED) jeopolimer beton cephe kaplama ürününün çevresel etkileri değerlendirilmiştir.

ISO 14040/44 standartlarına göre; YDD, bir ürünün hammaddesinin elde edilmesiyle başlamaktadır. Hammaddenin işlendikten sonra üretilip kullanımından bertarafına kadar tüm yaşam döngüsü sürecindeki çevresel etkilerinin hesaplandığı, ölçüldüğü ve raporlandığı bir değerlendirme yöntemidir. Kaynak verimliliği ve atık oluşum miktarı gibi pek çok konuyu bünyesinde barındırmaktadır. (Url-26).

Malzeme ömrünün tamamını kapsayan aşamalar, anlaşılmasını kolaylaştırmak için kategorize edilir. Yaşam döngüsü değerlendirmelerinde bu aşamalar üç adet yaklaşımla değerlendirilmektedir.

- “Beşikten Beşiğe” (Cradle to cradle) Yaklaşımı
- “Beşikten Mezara” (Cradle to grave) Yaklaşımı
- “Beşikten Kapıya” (Cradle to gate/cradle to site) Yaklaşımı (Günaydın, 2011).

Çizelge 3.2 : YDD aşamalarının kapsadığı süreçler (Günaydın, 2011).

	Hammaddenin Çıkarılması ve Hazırlanması	Üretim ve Fabrikasyon Süreci	Yapım, Kullanım ve Onarım	Geri Dönüşüm, tekrar kullanım ve atık süreci	
				Geri Dönüşüm, Tekrar Kullanım	Atık
Beşikten Beşiğe	+	+	+	+	
Beşikten Mezara	+	+	+		+
Beşikten Kapıya	+	+			

Çizelge 3.2’de YDD aşamalarının kapsadığı süreçler görülmektedir. Çevresel etkiyi arttıran başlıca nedenlerden biri enerji kullanımının yüksek olmasıdır. Tasarımcılar ve kullanıcılar tarafından gündelik hayatta göz ardı edilmesine rağmen gömülü enerji çevresel etkiyi doğrudan etkilemektedir. Malzeme ömrünün uzun olması malzemenin kazandırdığı enerji tasarrufunu doğrudan etkilemektedir. Çizelge 3.3’de bazı malzemelerin gömülü enerjileri ve gömülü karbon emisyonları verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Beşikten kapıya sürecinde gömülü enerji ve gömülü karbon miktarları (Ortiz ve diğ, 2009).

Malzeme	Gömülü Enerji (MJ/kg)	Gömülü Karbon (CO ₂ /kg)
Agrega	0,11	0,005
Alüminyum Alaşım	218	11,46
Asfalt	2,4	0,14
Bitüm	47	0,48
Pişmiş Tuğla	3	0,22
Dökme Demir	25	1,91
Çimento (Portland)	4,6	0,83
Beton (%3 Çelik Donatılı)	3,5	0,32
Bakır	70	3,83
Cam	15	0,85
Cam Lifleri	28	1,53

Çizelge 3.3 (Devam) Beşikten kapıya sürecinde gömülü enerji ve gömülü karbon miktarları (Ortiz ve diğ, 2009).

Malzeme	Gömülü Enerji (MJ/kg)	Gömülü Karbon (CO ₂ /kg)
Çelik (Yumuşak)	35,3	2,75
Çelik (Paslanmaz)	56,7	6,15
Reçineler	140	5,91
Ahşap	8,5	0,46
Kauçuk	101	3,18
Polietilen	83	1,94

Yapı ve yapı malzemelerini yaşam döngüsü değerlendirmesi altında değerlendirmek ve seçmek için sertifika sistemleri ve YDD hesaplama araçları oluşturulmuştur. Leed, Bream, Yeşil Yıldız, Sbtool, Casbee ve Greenstar gibi farklı ülkelerin oluşturduğu sertifika programları ve GaBi, SimaPro, TEAM, BEAT, Ecoinvent, BEES, MIPS, Athena gibi YDD hesaplama araçları, ASTM, ISO gibi belli başlı standartları kabul ederek yapıları enerji, malzeme, su kullanımı, ulaşım, arazi kullanımı, hava kalitesi ve iç mekân kalitesi gibi konuları değerlendirmektedir.

Hesaplama araçları yukarıda bahsedilen süreçlerin tamamını değerlendirebildikleri gibi süreçlere göre özelleştirilerek de kullanılmaktadır. Araçlar üç düzeyde analiz yapmaktadır.

Düzyey 1 – Ürün Karşılaştırması ve Veri tabanları ile Yaşam Döngüsü Analizi Yapabilen araçlardır.

Düzyey 2 – Yapı Elemanı veya Malzeme seçimine Yönelik Karar Destek Araçları

Düzyey 3 – Tüm Binayı Değerlendiren ve Sertifikalandıran Araçlardır (Ortiz ve diğ, 2009).

Düzyeyler için uygun kullanıma sahip programların isimleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

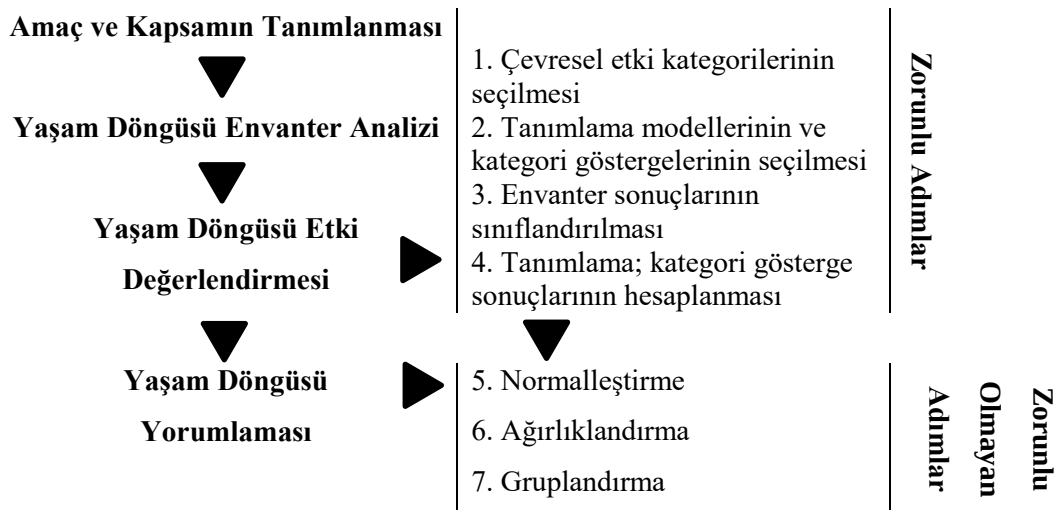
Çizelge 3.4 : Yaşam döngü değerlendirmesi için kullanılan araçlar (Ortiz ve diğ, 2009).

Düzyey	Program	Ülke
1	GaBi	Almanya
	SimaPro	Hollanda
	TEAM	Fransa
	BEAT	Danimarka
	Ecoinvent	İsviçre

Çizelge 3.4 (Devam) Yaşam döngü değerlendirmesi için kullanılan araçlar (Ortiz ve diğ, 2009).

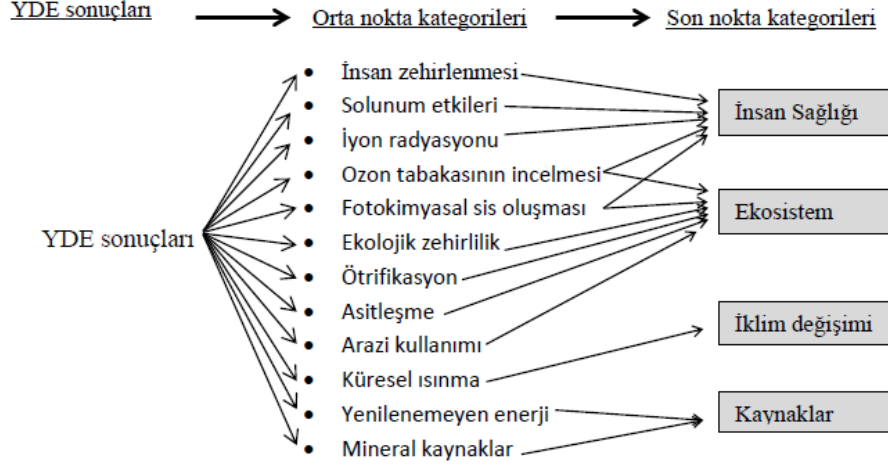
Düzy	Program	Ülke
2	BEES	ABD
	MIPS	Almanya
	TWIN	Hollanda
	Athena	Kanada
	Envest	İngiltere
	EcoQuantum	Hollanda
	LISA	Avustralya
3	LEED	ABD
	BREAM	İngiltere
	SBTool	Kanada
	CASBEE	Japonya
	DGNB	Almanya
	Green Star	Avustralya
	SEDA	Avustralya

Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi süreçleri sırasıyla; çalışmanın amacı ve kapsamın tanımlanması, yaşam döngüsü envanter analizi, yaşam döngüsü etki değerlendirmesi ve yaşam döngüsü yorumlamasıdır. YDED (Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi), yaşam döngüsü envanter analizi sürecinde varılmış sonuçlara göre değerlendirilen ürünün çevresel etkilerinin değerlendirildiği süreçtir (Udo de Haes ve Jolliet, 1999). ISO 14040’a göre YDED zorunlu olan ve zorunlu olmayan adımlardan oluşmaktadır. Bahsi geçen adımlar ve değerlendirme süreci Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5 : YDED’e göre malzeme seçim yöntemleri (Öztaş, 2014).

Ürün ve ürün sisteminin çevresel konularıyla ilgili çevresel etki kategorilerinin seçilmesi, zorunlu adımların başında gelmektedir (Öztaş, 2014). Yaşam döngüsü envanter analizinden sonra elde edilen veriler sırasıyla orta nokta çevresel etki kategorilerine sonrasında son nokta etki kategorilerine ayrılmaktadır (Öztaş, 2014, Lijinh ve diğ, 2008). Şekil 3.6’da orta ve son etki kategorileri verilmiştir.



Şekil 3.6 : YDE, orta ve son nokta çevresel etki kategorileri (Öztaş, 2014).

Enerji tüketimi, küresel ısınma, asitleşme ve ötrofikasyon en çok çalışılan çevresel etki kategorileridir. Ayrıca su tüketimi, hava kirliliği ve ekosistem kirlenmesi konuları da çalışılmaktadır (Ortiz ve diğ, 2009).

Tanımlama modellerinin ve kategori göstergelerinin seçilmesi adımı ikinci adım olup ilk adımda belirlenen çevresel etki kategorilerinin nicel ifadelerini barındırmaktadır. Tanımlama modeli; fiziksel, kimyasal ve biyolojik döngülerdeki çevresel işleyişi göstererek envanter sonuçlarıyla kategori göstergesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Çevresel ilişkiden türetilen dönüştürme katsayıları, tüm çevresel etki kategorilerini ortak bir birime getirmeyi sağlamaktadır (ISO14040).

Envanter sonuçlarının sınıflandırılması üçüncü adımdır. Tanımlama modeli aşamasında tanımlanan kat sayılarla hesaplanarak aynı eş değere getirilen salınımlar toplanarak ilgili kategorilere göre sınıflandırılır (ISO14040).

Sonuncu zorunlu adım olan dördüncü adım “Tanımlama; kategori gösterge sonuçlarının hesaplanmasıdır. Sıcaklık, rüzgar hızı, toprak yapısı ve su kütlelerine göre değişiklik gösteren salınımlar yayıldıkları bölgeye özgüdür. Asitleşme, ötrofikasyon ve fotokimyasal sis oluşumu gibi çevresel etki kategorileri bölgeye özgü katsayılarla hesaplanmaktadır (Heijung ve diğ, 1992, Gallego ve diğ, 2010).

Yaşam döngüsü yorumlaması adınının içeriğindeki normalleştirme, gruplandırma ve ağırlandırma adımları zorunlu olmayan adımlardır. Bu adımlar bölüm 4.1 Çevresel Sürdürülebilirlik bölümünde tez yöntemi olarak seçilen orta nokta yaklaşım modeli olan CML modelinde anlatılmıştır.

YDED modelleri orta nokta yaklaşım modelleri, son nokta yaklaşım modelleri, orta ve son nokta yaklaşımını birleştiren yaklaşım modelleri olmak üzere üç farklı yaklaşıma sahiptir (Öztaş, 2014).

Orta nokta yaklaşım modelleri, küresel ısınma, asitleşme, ötrofikasyon, ozon tabakasının incelenmesi, fotokimyasal sis oluşumu gibi orta nokta etki kategorilerinin adlandırıldığı ve nicel hesaplama yapılan tanımlama adınının yapıldığı yaklaşım modelleridir (Öztaş, 2014). Sebep-etki zincirindeki bağlantı olarak kabul edilen orta nokta yaklaşımları salınım ve tüketilen kaynakların miktarına odaklanarak dönüştürme katsayıları üretmektedir. Bundan dolayı “problem odaklı yaklaşım” olarak anılmaktadır. Son nokta yaklaşım modelleri ise insan sağlığı, ekosistem, iklim değişimi ve kaynaklar gibi kategorileri hesaplamakta ve “hasar odaklı yaklaşım” olarak da anılmaktadır (Bare ve diğ, 2000, Joliet ve diğ, 2003).

Orta ve son nokta yaklaşım modelini birleştiren modeller, bazı orta nokta kategorilerini son nokta kategorileriyle ilişkilendirerek iki kategori için de nicel hesaplamalar yapmaktadır (Öztaş, 2014). YDED modellerinin oluşturulduğu ülkeler ve model yaklaşımları Çizelge 3.5’te verilmiştir.

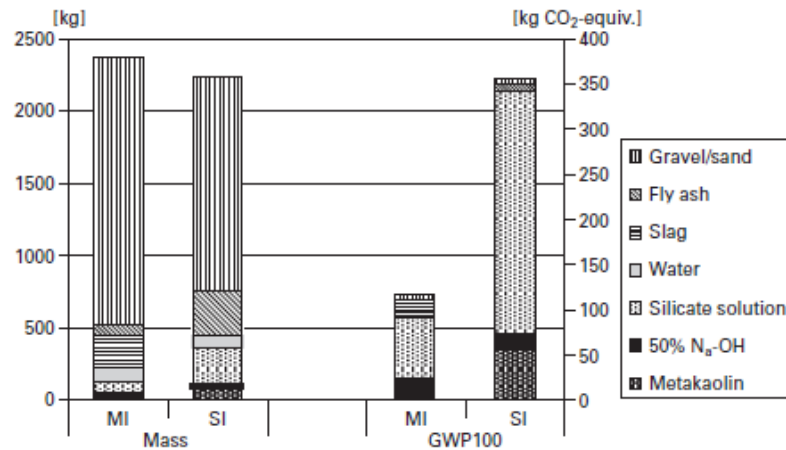
Çizelge 3.5 : YDED modellerinin oluşturulduğu ülkeler ve model yaklaşımları (Öztaş, 2014).

Ülkeler	AVRUPA				AMERİKA		ASYA
	Hollanda	İsveç	Danimarka	İsviçre	Amerika	Kanada	Japonya
YDED Modelleri	Orta nokta yaklaşım modelleri	CML, MEEup	EPD	EDIP	CED, CExD, Eco-footprint	TRACI	
	Son nokta yaklaşım modelleri	EI99	EPS		Eco-scarcity, EDP		JEPIX
	Orta ve son nokta yaklaşım modellerini birleştiren modeller	Recipe			Impact2002	LUCAS	LIME

Jeopolimer beton hakkında literatürde sistemli YDD hesaplamaları bulunmamakla birlikte jeopolimer betonun bazı çevresel etkiler için çalışmalar yapılmıştır. Çoğunlukla CO₂ emisyonu hakkında çalışmalar yapılmış ve beton/portland çimentosuyla kıyaslanmıştır. Literatür çalışmaları incelendiğinde jeopolimerin ilk somutlaşma enerjisindeki CO₂ emisyonunun azalması %20 ile %80 oranında değişmektedir (Brew ve Mackenzie, 2007, Nowak, 2008, Duxson ve diğ., 2007b). Aralığın bu kadar geniş olmasının sebebi jeopolimerin pek çok katı ve sıvı hammaddelerle üretilebilir bir malzeme olmasıdır.

Jeopolimer oluşumunda seçilen hammaddeler, ürünün sertleşme davranışı ve süresine, işlenebilirliğine, kimyasal ve fiziksel özelliklerine ve kür gibi çeşitli parametrelere bağlıdır (Duxson ve diğ., 2007a). Örneğin metakaolin gibi sıcaklıkla elde edilen bir malzeme kullanılması yerine uçucu kül veya taban külünün kullanılması oluşum enerjisinde ciddi farklara sebep olur.

Uçucu kül ve metakaolin bazlı iki farklı jeopolimer kompozitin ağırlıkları ve küresel ısınma potansiyelinin kıyaslanması Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7 : Uçucu kül ve metakaolin esaslı jeopolimerlerin kütle ve küresel ısınma potansiyeli karşılaştırması (Provis ve van Deventer, 2009).

Şekil 3.7 incelendiği zaman görülüyor ki; (Provis ve van Deventer, 2009).

- Yüksek kütle oranına rağmen kum ve çakılın küresel ısınmaya katkısı azdır.
- Uçucu kül, küresel ısınmaya büyük derecede katkıda bulunmaz.
- Metakaolin, küresel ısınmaya büyük derecede katkıda bulunur.
- Cüruf (slag), küresel ısınmaya büyük derecede katkıda bulunur.
- Su, küresel ısınmaya önemli ölçüde katkıda bulunmaz.
- Silikat çözeltisi ve sodyum hidroksit (NaOH) kullanılan puzolana göre değişmektedir ve küresel ısınmaya etkisi fazladır.

Yukarıda bahsedilen hammaddeler gibi jeopolimer ilk somutlaşma enerjisi ısı kürünü de kapsamaktadır. Her jeopolimer, ısı kürüne ihtiyaç duymamaktadır. Cürufta zengin jeopolimerler birkaç günde ve saatte amaçlanan teknik özelliklere gelebilmektedir (Duxson ve diğ., 2007c, Bakharev ve diğ., 1999). Fakat genel olarak jeopolimerizasyon için 20-80 °C arası kür gerekmektedir (Provis ve van Deventer, 2009). Bu sıcaklık çimento üretimiyle kıyaslandığında düşük bir sıcaklıktır.

Isı kürü sürecinde etüv kullanılması yerine gaz fanlı brülör kullanılırsa jeopolimerin çevresel etkisi daha da azalacaktır (Provis ve van Deventer, 2009).

Bu bölümde jeopolimerin gömülü enerjisi üzerine incelemelerden bahsedilmiştir. Tez kapsamında jeopolimer beton kullanılmış bir yapının yıllık enerji tüketimine bağlı olarak çevresel etki değerlendirmeleri yapılacaktır. Simülasyon için jeopolimer beton cephe kaplaması seçilmiştir. Cephe kaplamasının seçilmesinin nedeni, cephe kaplamasının yapı kabuğunun en büyük yüzey alanı olması ve atmosferle ara kesit oluşturmasıdır.

3.3 Yapı Ürünü ve Malzemesi Olarak Jeopolimer

Yapısında çimento yerine yapay puzolan kullanılarak (atık kül) oluşturulan jeopolimer betonlar yapılan araştırmalarda iyi bir performans göstermiştir. Konvansiyonel betonun sağlaması gereken fiziksel ve mekanik kriterlerin çoğunu sağlayan jeopolimer betonun dış ortam şartlarında daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Özelliklerine bakıldığında yapı ürünü ve malzemesi olarak kullanılabilir fakat her yapı elemanı için kullanım olanakları teker teker test edilmeli, şartnameler ve standartlara bağlı kalınarak detaylıca araştırılmalıdır. Yapı ürünü ve malzemesi olarak jeopolimer beton seri üretime geçmiş bir yapı malzemesi değildir. Bu bölümde hala anlaşılmaya çalışılan jeopolimer hakkında yapılan çalışmalar derlenmiştir. Jeopolimer Enstitünün 2010-2020 yılları arasında yapmış olduğu konferanslar başta olmak üzere ulusal ve uluslararası 343 kaynak incelenmiştir. Bu kaynakların bir kısmı jeopolimer betonun alkaliyle aktive edilmiş betonla karıştırılmasından dolayı elenmiştir. Jeopolimer seramik gibi farklı jeopolimer çeşitleriyle ilgili çalışmalar kapsam dışı bırakılmıştır. Verileri okunamayan deneyler ve çalışmalar tabloya dahil edilmemiştir. Kauçuk ve cam gibi atık malzemelerin kullanıldığı çalışmalar, fiber ve vermikülit gibi farklı katkı malzemelerinin katıldığı çalışmalar elenerek tabloya dahil edilmiştir. 70 kaynak

derlenerek eklerde bulunan Çizelge A.2.1'deki tabloda yapılan araştırmalarda bulunan sonuçlar gösterilmiştir. Çalışma sonuçları; birim hacim ağırlık, ısı iletkenlik, öz ısı, ses geçişi, görünür yoğunluk, basınç dayanımı, su emme, görünür porozite, yüksek sıcaklık altında basınç ve ağırlık kaybı yüzdesi, hidroklorik asit (HCl) ve sülfirik asit (H_2SO_4) altında yüzde basınç kayıpları, sodyum sülfat (Na_2SO_4) ve magnezyum sülfat ($MgSO_4$) tuzlarıyla yapılan testlerde yüzde basınç kayıpları ve donma çözünme deneyleri sırasında yüzde basınç kayıpları başlık olarak derlenmiştir.

Bu bölümde eklerde bulunan Çizelge A.2.1'deki jeopolimer beton hakkında çalışmaların derlenerek oluşturulduğu tabloya dayanarak jeopolimer beton içeriği hakkında değerlendirme yapılacaktır.

Aktivatöre Göre Değerlendirme:

Sodyum silikat bünyesinde -OH iyonu bulundurmadiğından dolayı tek başına aktivatör olarak kullanılamamaktadır. Genellikle Sodyum hidroksit (NaOH) ile kullanılmaktadır. Na_2SiO_3 ikamesi agrega ve harç arasındaki aderansı arttırmakta ara yüz bağlarını iyileştirmektedir. Sodyum hidroksit (NaOH) ve Sodyum silikat (Na_2SiO_3) jeopolimerizasyonda en çok kullanılan aktivatörlerdir (Kong ve Sanjayan, 2010, Zhang ve diğ, 2008). Değerlendirme, yaygın kullanılan NaOH ve Na_2SiO_3 aktivatörlerinin kullanıldığı çalışmalar ve diğer aktivatörlerin kullanıldığı çalışmalar olarak ikiye ayrılarak incelenmiştir.

Aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3 kullanılması:

Birim Hacim Ağırlık: Derlenen 70 çalışmanın 54'ünde NaOH ve Na_2SiO_3 aktivatör olarak kullanılmıştır.

54 çalışmanın 24'ünde birim hacim verileri bulunmaktadır. 11 tane çalışmada birim hacim $800-2.000 \text{ kg/m}^3$ (hafif beton) aralığında, 9 tanesinde ise $2.000-2.600 \text{ kg/m}^3$ (normal beton) aralığında sonuçlara sahiptir. Kalan 4 çalışmanın sonuçları $910-2.575,8 \text{ kg/m}^3$ aralığındadır. İçeriğindeki değişikliklerle özelleştirilebilen jeopolimer beton, NaOH ve Na_2SiO_3 aktivatör olarak kullanıldığı durumlarda hafif beton olma eğilimindedir.

Isıl İletkenlik: 8 adet çalışmada ısı iletkenlik deneyleri yapılmıştır. Çalışmaların ortalaması $0,68 \text{ W/mK}$ 'dır. Piyasada bulunan normal betonların ısı iletkenlikleri $1,63-2,09 \text{ W/mK}$, hafif betonların ise $0,87 \text{ W/mK}$ 'dır (Url-27). Jeopolimer betonda

NaOH ve Na₂SiO₃'ün aktivatör olarak kullanılması durumunda piyasada bulunan betonlara kıyasla jeopolimer beton düşük ısı iletkenlik özelliğine sahiptir.

Öz Isı: 3 adet çalışmada öz ısı verisi bulunmaktadır. Deney sonuçları Mj/m³K olarak rapor edilmiştir. Simülasyon programına girilmesi için J/kgK çevrilmesi gerekmiştir. Çevirme işlemi için 70 çalışmanın ortalaması olan 1.807,7 kg/m³ ile çarpılmıştır. Birim dönüştürme işlemi sonucu 3 çalışmanın ortalaması 1.191 J/kg-K olarak hesaplanmıştır. Hafif betona göre öz ısı daha yüksek çıkan jeopolimer beton daha geç ısınmaktadır. NaOH ve Na₂SiO₃ aktivatör olarak kullanılması jeopolimer betonu konvansiyonel betona göre daha gelişmiş bir beton haline getirmektedir.

Basınç Dayanımı: 50 çalışmada basınç deneyi yapılarak sonuçlar rapor edilmiştir. Sonuçlar 1 MPa - 97,6 MPa arasında geniş bir aralığa sahiptir. Deneylerde bulunan sonuç aralıkları karşılaştırılarak sonuçların yığıldığı aralıklar belirlenmiştir. Çalışmaların %14'ü 1-15 MPa arasında sonuç verirken ortalaması 6,79 MPa'dır. 6,7 MPa kaplama malzemesi olabilecek bir dayanımdır. Değerlerin yarısı 15,01-45,00 MPa arasında sonuç göstermiştir. Sonuçların %30'u 45,01-75,00 MPa aralığındadır. %6'lık kısmı 75,01-97,6 MPa aralığındadır. Basınç deneyleri sonuçları incelendiğinde kaplama malzemesi olarak kullanılabilecek dayanım görüldüğü gibi taşıyıcı eleman tasarımında kullanılabilecek dayanım sonuçları da olduğu görülmüştür.

Eğilme Dayanımı: Yapılan 54 çalışmanın 15 tanesinde eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Çalışmaların ortalaması 7,16 MPa'dır. Sonuçların %23'ü 0-4 MPa, %33'ü 4,01-8,0 MPa, %27'si 8,01-12,0 MPa ve %17'si 12,0-16,9 MPa aralığında sonuç vermiştir. Sonuçlar orantılı bir şekilde dağılım göstermiştir. Değerler düşük aralıklarda yoğunlaşmaktadır fakat belli bir aralıkta yığılma olmadığı için kesin bir yorum yapılamamaktadır.

Su Emme: Su emme deneyleri 20 çalışmada görülmektedir. Çalışmaların bir tanesi yüksek sıcaklıkta hazırlanmış jeopolimer betonların su emme deneyi olduğu için değerlendirme dışında bırakılmıştır. 19 çalışmanın %75'i %0 - %10 su emme aralığında, %11'i %10,01 - %20 su emme aralığında ve %13'ü %20,01 - %30 su emme aralığındadır. NaOH ve Na₂SiO₃'ün aktivatör olarak kullanılması, jeopolimer betonun su emme oranının %0 - %10 arasında olmasını sağlamıştır.

Aktivatör olarak KOH, NaOH, Na₂SiO₃, K₂SiO₃, Na(Na+K), SiO₂/M₂O, H₂O/M₂O, K₂SiO₃ ve Na₂CO₃ kullanılması :

Derlenen 70 çalışmanın 14 tanesinde farklı aktivatör ve farklı konfigürasyon denemeleri yapılmıştır. 2 tane çalışmanın aktivatörü bilinmemektedir. Hesaba katılan çalışmaların numaraları: 4, 5, 7, 10, 14, 18, 21, 31, 35, 47, 48, 55, 61 ve 63. çalışmalardır. Çalışma dışı kalan sonuçlar 42 ve 70. maddelerdir.

Birim Hacim Ağırlık: 8 adet çalışmada birim hacim sonuçları verilmiştir. 5 adet sonuç hafif beton sınıfına 2 adet sonuç normal beton sınıfına girmektedir. 1 tane çalışma 1.900-2.270 kg/m³ arasında sonuç vermesinden dolayı normal betona yakın bir sonuç olarak değerlendirilebilir. NaOH ve Na₂SiO₃ aktivatörleriyle paralel olarak hafif beton ağırlıklı sonuç çıkmıştır.

Isıl İletkenlik: Isıl iletkenlik deneyi 4 çalışmada yapılmıştır. Çalışmaların ortalaması 0,27 W/mK'dir. Farklı aktivatör çalışmaları ısı iletkenliği düşürmüştür.

Öz Isı: 1 tane çalışmada öz ısı değeri bulunmaktadır. 1,5-3,5 MJ/m³K aralığında bir değer çalışma kapsamında çevrilerek 830-1.936 J/kg-K olarak kabul edilmiştir. Öz ısı değeri üzerinde yorum yapılabilmesi için geniş bir aralığa sahiptir ve tek sonuç olmasından dolayı aktivatör bakımından değerlendirilememektedir.

Basınç Dayanımı: 11 çalışmada basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Çalışmaların %43'ü 0-15 MPa arasında sonuç vermiş ve ortalaması 9,94 MPa'dır. Sonuçların %14'ü 15,01-45,0 MPa, %29'u 45,01-75,0 MPa, %14'ü 75,01-120,0 MPa aralığındadır. Sonuçlarda yığılma 45,01-75,0 MPa aralığındadır. Alternatif aktivatörler kullanılan deneylerde yüksek dayanımlı jeopolimer betonlar üretilmiştir.

Eğilme Dayanımı: 7 çalışmada eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Ortalaması 6,88 MPa'dır. Çalışmaların %41'i 0-4,0 MPa değerleri arasında ve 2,29 MPa ortalamasındadır. Kalan sonuçların %11'i 4,01-8,0 MPa, %24'ü 8,01-12,0 MPa ve %24'ü 12,01-16,0 MPa aralığındadır. Farklı aktivatör denemelerinde eğilme dayanımı düşük aralıklarda çıkmıştır.

Su Emme: 4 adet çalışmada su emme deneyi yapılmıştır. Sonuçların %75'i %0 - %10 aralığında su emmeye, %12,5'i %20 - %30 ve %12,5'i %30 - %40 aralığında su emmeye sahiptir. Farklı aktivatörlerden yararlanılarak hazırlanan deneylerde de

NaOH ve Na₂SiO₃ aktivatörleriyle yapılan çalışmalara paralel olarak su emme oranı düşüktür.

Puzolana Göre Değerlendirme:

Pek çok puzolanla üretilen jeopolimer üretiminde yaygın olarak atık şeklinde oluşan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ve çimentoya göre oluşum ısısı düşük metakaolin kullanılmaktadır. Çalışmalar sadece uçucu kül kullanılan çalışmalar, sadece metakaolin kullanan çalışmalar, sadece yüksek fırın cürufu kullanan çalışmalar, uçucu kül, metakaolin ve yüksek fırın cürufunun en az ikisinin kullanıldığı çalışmalar ve diğer puzolanlar olmak üzere 5 farklı açıdan incelenmiştir.

Puzolan olarak uçucu kül kullanılması:

Derlenen 70 çalışmanın 23'ünde puzolan olarak sadece uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül tek başına kullanılan en yaygın puzolan olmakla birlikte birden çok puzolanın kullanıldığı çalışmalarda da yer almaktadır. Puzolan olarak sadece uçucu kül kullanan çalışmalar: 5, 7, 9, 14, 15, 16, 17, 20, 22, 24, 25, 28, 30, 36, 48, 49, 52, 54, 56, 60, 63, 67 ve 69'dur.

Birim Hacim Ağırlık: 23 çalışmanın 11 tanesinde birim hacim değeri bulunmaktadır. 4 sonuç hafif beton ve 2 sonuç normal beton sınıfındadır. 5 sonucun değer aralığı 2.000kg/m³'un altında başlayarak 2.000 kg/m³'un üzerinde bitmiştir. İki beton tipini de kapsayan sonuç aralıkları çoğunlukla normal beton aralığına yakındır. Uçucu kül kullanılan çalışmalarda orantılı bir dağılım olduğundan dolayı net bir özellikten bahsedilememektedir.

Isıl İletkenlik: 2 tane çalışmada ısı iletkenlik deneyi yapılmıştır. Çalışmaların ortalaması 0,6 W/mK'dır. Hafif betonla kıyaslandığında uçucu kül kullanılan jeopolimer betonlar düşük ısı iletkenlik değerine sahiptir.

Öz Isı: Uçucu külle yapılan çalışmalarda öz ısı deneyi bulunmamaktadır.

Basınç Dayanımı: 23 çalışmanın 22'sinde basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. %15,5'i 0-15 MPa aralığında ve ortalaması 6,84'tür. %38'i 15,01-30,0 MPa, %11'i 30,01-45,0 MPa, %13'ü 45,01-60,0 MPa, %13'ü 60,01-75,0 MPa ve %9,5'i 75-120,0 MPa aralığındadır. Basınç dayanım değerlerinin yığıldığı aralık 15,01-30,0 MPa aralığı olmakla birlikte bu aralık, yapı ürünü olmak için ideal bir basınç dayanımıdır.

Eğilme Dayanımı: 10 adet çalışmada eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. 10 çalışmanın ortalaması 7,48'dir. Çalışmaların %26'sı 0-4,0 MPa aralığında ve ortalaması 1,68 MPa'dır. %31,5'i 4,01-8,0 MPa, %21'i 8,01-12,0 MPa, %16'sı 12,01-16,0 MPa ve %5,5'i 16,01-20,0 MPa aralığındadır. Çalışmalar geniş bir aralık olan 0-12,0 MPa arası homojen denebilecek şekilde dağılmıştır.

Su Emme: Su emme deneyleri 7 çalışmada yapılmıştır. %78,6'sı %0 - %10'a kadar su emme değeri sonucuna sahipken %7,2'si %10,01 - %20 ve %7,2'si %20,01 - %30 aralığında su emme göstermiştir. Uçucu kül kullanılan çalışmalar düşük su emme özelliğine sahiptir. Hatta diğer çalışmalarda %40'ı bulan su emme değerleri görülürken uçucu kül kullanılan çalışmalarda en fazla %20,01 - %30 aralığında veri bulunmuştur.

Puzolan olarak metakaolin kullanılması:

Puzolanlardan uçucu kül ve 750°C fırınlanmış metakaolin (MK750) gibi hammaddeler yüksek dayanım sağlarken fırınlanmamış kaolin kili düşük dayanım sağlamaktadır (Hardjito ve diğ., 2005). Derlenen çalışmalarda metakaolini puzolan olarak kullanan çalışma sayısı 8'dir. Bu çalışmalar 3, 4, 34, 35, 38, 42, 55 ve 58'dir.

Birim Hacim Ağırlık: 4 çalışmada birim hacim değerleri verilmiştir ve hepsi hafif betondur. Sonuçlara göre metakaolin esaslı jeopolimerlerde hafif beton eğilimi vardır.

Isıl İletkenlik: 5 çalışmada ısı iletkenlik değeri bulunmaktadır. Ortalaması 0,46W/mK'dır. Metakaolin esaslı jeopolimerin ısı iletkenlik değeri hafif betonun ortalama değerine göre düşüktür.

Öz Isı: 2 çalışmada öz ısı deneyi yapılmıştır. Çalışmaların ortalaması 1.341,5 J/kg-K'dir. İki deney sonucunun ortak değer aralığı 830-1.336 J/kg-K'dir. Metakaolin esaslı jeopolimerin öz ısı değeri muadili olduğu betona göre yüksektir.

Basınç Dayanımı: 5 tane çalışmada basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. %15'i 0-15,0 MPa ve ortalaması 10,65 MPa'dır. Düşük aralıkta dahi yüksek bir ortalama sahiptir. %23,34'ü 30,01-45,0 MPa, %15'i 45,01-60,0 MPa, %23,33'ü 60,01-75,0 MPa ve %23,33'ü 75,01-120,0 MPa'dır. Isıl işlemle üretilen metakaolin, jeopolimer betonda kullanıldığı zaman yüksek dayanıma sahip ürünler oluşturmaktadır.

Eğilme Dayanımı: Eğilme dayanımı deneyi 1 çalışmada yapılmıştır. Değer aralığı 10,5-13,0 MPa aralığıdır.

Su Emme: Su emme deneyi yoktur.

Puzolan olarak yüksek fırın cürufu kullanılması:

70 çalışmanın 10 tanesinde puzolan olarak tek başına yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Ayrıca farklı puzolanlarla karıştırılarak da yapılan çalışmalar mevcuttur. Yüksek fırın cürufu kullanan çalışmalar: 1, 8, 10, 13, 19, 27, 29, 53, 62 ve 66'dır.

Birim Hacim Ağırlık: 6 adet çalışmada birim hacim ağırlık değerleri verilmiştir. Değerlerin 2 tanesi hafif beton ve 4 tanesi normal beton hacmine sahiptir. Yüksek fırın cürufu kullanılan jeopolimerlerde normal betona yakınlık mevcuttur.

Isıl İletkenlik: 1 adet çalışmada ısı iletkenlik değeri bulunmuştur. Sonuç 0,59-0,96 W/mK'dır. Bu, uçucu kül ve metakaolin kullanılan jeopolimerlere göre yüksek bir değerdir. Ayrıca, konvansiyonel betona paralel bir değerdir.

Öz ısı: Yapılan çalışma yoktur.

Basınç Dayanımı: Yüksek fırın cürufu kullanılan tüm çalışmalarda basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. %10'u 0-15,0 MPa aralığındadır ve bu aralıktaki ortalama 7,81 MPa gibi ortalama bir değerdir. %35'i 15,01-30,0 MPa, %10'u 30,01-45,0 MPa, %30'u 45,01-60,0 MPa ve %15'i 60,01-75,0 MPa aralığındadır. Çalışma değerleri 15,01-30,0 MPa ve 45,01-60,0 MPa aralıklarında kümelenme göstermiştir. Metakaolin gibi çok yüksek değerlerde basınç dayanımı sağlamamaktadır. Uçucu kül esaslı jeopolimerlere göre yüksek sonuçlar çıkmıştır.

Eğilme Dayanımı: 4 tane çalışmada eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır sonuçların ortalaması 3,29'dur. Sonuçların %62,5'i 0-4,0 MPa aralığında ve ortalaması 2,03 MPa'dır. %25'i 4,01-8,0 MPa ve %12,5'i 8,01-120 MPa aralığındadır. Yüksek fırın cürufu üretilen jeopolimerlerde düşük eğilme dayanımı değerleri görülmektedir.

Su Emme: Su emme deneyleri 5 çalışmada yapılmıştır. %0 - %10 arası su emme %90 oranındadır. %10,01 - %20 arası su emme ise %10 değerindedir. Uçucu kül, metakaolin ve yüksek fırın cürufu kullanılan alternatifler kıyaslandığında en az su emme özelliğine sahip jeopolimer, YFC ile hazırlanmış jeopolimerlerdir.

Puzolan olarak uçucu kül, metakaolin ve yüksek fırın cürufu kullanılması:

Ayrı ayrı oldukları kadar yaygın olarak da kendi aralarında farklı konfigürasyonlarla bir araya gelen uçucu kül, metakaolin ve yüksek fırın cürufu puzolanları derlenen 70 çalışmanın 8'ini kapsamaktadır. Üç puzolanın kullanıldığı çalışmalar: 6, 22, 33, 39, 40, 47, 51 ve 61'dir.

Birim Hacim Ağırlık: 8 çalışmanın 2 tanesinde birim hacim ağırlık değeri bulunmuştur. 1 tanesi hafif beton diğeri de normal beton aralığındadır. Veri azlığından yorum yapılamamaktadır.

Isıl İletkenlik: 2 adet çalışmada ısı iletkenlik deneyi yapılmıştır. Ortalaması 0,417 W/mK'dır. Kendi başlarına kullanıldıkları zaman 0,46-0,96 W/mK aralığında çıkan ısı iletkenlik değerleri, 3 malzemenin bir arada kullanılması sonucu düşmüştür.

Öz ısı: 1 adet çalışmada öz ısı deneyi yapılmıştır ve aralığı 1.161-1.382 J/kg-K'dir.

Basınç Dayanımı: 6 çalışmada basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. %36'sı 0-15,0 MPa aralığındadır ve ortalaması 12,65 MPa'dır. Bu, aralığına göre yüksek bir ortalama değildir. %18'i 30,01-45,0 MPa, %18'i 45,01-60,0 MPa, %10'u 60,01-75,0 MPa ve %18'i 75,01-90,0 MPa'dır. Kümelenme 0-15,0 MPa aralığında gözükse de çalışmaların sonuçlarının çoğu yüksek basınç dayanımlı aralıklara dağılmış durumdadır.

Eğilme Dayanımı: 8 çalışmanın 1 tanesinde eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Tek çalışmanın sonucu 5-15,0 MPa'dır ve bu geniş bir aralıktır.

Su Emme: Su emme deneyi sadece 1 tane çalışmada yapılmıştır. Aralığı %7,5-8,6'dır. Malzemeler tek tek kullanıldığı çalışmalarda düşük su emme eğilimi düşüktür. Birlikte kullanıldığı bu deneyde de bu bilgiye paralel bir sonuç görülmüştür.

Puzolan olarak cam tozu, ponza, tras, zeolit, tuğla tozu, kolemit, silis dumanı, diatomit, atık döküm külü, piriç kabuğu, seramik tozu, pomza elek altı atığı, küspe külü, linyit alt külü, taban külü, yakıt külü, palmiye yağı, mikrosilika ve kalsit kullanılması:

Puzolan olarak uçucu kül, metakaolin ve yüksek fırın cürufu kullanılmayan 21 çalışmada cam tozu, ponza, tras, zeolit, tuğla tozu, kolemanit, silis dumanı, diatomit, atık döküm külü, piriç kabuğu, seramik tozu, pomza elek altı atığı, küspe külü, linyit alt külü, taban külü, yakıt külü, palmye yağı, mikrosilika ve kalsit kullanılmıştır. Çalışmaların numaraları: 2, 11, 12, 18, 23, 26, 31, 32, 37, 41, 43, 44, 45, 46, 50, 57, 59, 64, 65, 68 ve 70'tir.

Birim Hacim Ağırlık: 21 çalışmanın 10 tanesinde sonuçlar 5 hafif beton ve 4 normal beton hacim aralığındadır. 1 tanesi 1.900-2.270 kg/m³ aralığındadır ve normal betona yakın bir sonuç olarak değerlendirilebilir.

Isıl İletkenlik: Diğer puzolan denemelerinin yapılmış olduğu çalışmaların 3 tanesinde ısı iletkenlik deneyi yapılmıştır. Ortalaması 0,72 W/mK'dır. UK, metakaolin ve YFC'nun puzolan olarak kullanıldığı çalışmalara göre incelendiğinde ısı iletkenlik yüksek çıkmıştır.

Öz Isı: 1 adet öz ısı deneyi yapılmıştır. Deney 929-1.079 J/kg-K aralığında sonuç vermiştir. Farklı atıkların puzolan olarak kullanılması öz ısıyı düşürmüştür.

Basınç Dayanımı: 19 adet çalışmada basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. %22'si 0-15,0 MPa aralığında ve 6,15 MPa ortalamasındadır. %33'ü 15,01-30,0 MPa, %17'si 30,01-45,0 MPa, %8'i 45,01-60,0 MPa, %14'ü 60,01-75,0 MPa ve %6'sı 75-90,0 MPa aralığında sonuç vermiştir. 30,0 MPa'ya kadar olan sonuçlarda yığılma vardır.

Eğilme Dayanımı: 21 çalışmanın 6 tanesinde eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarının ortalaması 7,49 MPa'dır. Sonuçların %31'i 0-4,0 MPa ve ortalaması 2,38'dir. Diğer sonuç aralıkları; %13'ü 4,01-8,0 MPa, %39'u 8,01-12,0 MPa ve %17'si 12,01-16,0 MPa'dır. Deney sonuçlarının ortalaması 7,49 MPa olmasına rağmen sonuçlar 0-4,0 ile 4,01-8,0 MPa aralıklarında yığılma yapmıştır.

Su Emme: 11 adet çalışmada su emme deneyi yapılmıştır. Çalışmaların 1 tanesi yüksek sıcaklıklarda üretilmiş jeopolimer beton deneyi olduğu için hesaba katılmamıştır. 10 adet çalışmanın değerleri; %63'ü %0 - %10 su emme, %5,5'i %10,01 - %20 su emme, %26'sı %20,01 - %30 su emme ve %5,5'i %30,01 - %40 su emme oranına sahiptir. Farklı puzolanların kullanıldığı çalışmalarda su emme oranları yüksek çıkmıştır.

Katkı Malzemelerine Göre Değerlendirme:

Katkı malzemeleri jeopolimer beton üretiminde betonun özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Akışkanlaştırıcı gibi katkılarla reaksiyon hızı arttırılabilir. Lastik, kauçuk gibi atıklarla dayanımı düşük fakat dekoratif ürünler elde edilebilir. Çalışmaların bir kısmında fiber katısı yaparak dayanım olarak yüksek değerli betonlar elde edilmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmalarda yaygın olarak akışkanlaştırıcı kullanıldığı görülmüştür. Ayrıca deneylerde katkı malzemesi olarak; kauçuk, fiber, su itici, atık cam, lastik, vermikülit, hava sürükleyici, polivinil alkol lif, bazalt lif, SiO₂ ve Na₂O denemeleri yapılmıştır. 19 adet olan çalışmaların numaraları: 1, 2, 4, 12, 15, 16, 24, 27, 29, 32, 36, 40, 43, 5, 59, 62, 65, 66 ve 69'dur. Katkı malzemeleri akışkanlaştırıcılar ve çeşitli katkı malzemelerinin kullanılması olarak 2 aşamada incelenecektir.

Akışkanlaştırıcı kullanılması:

19 çalışmanın 7'sinde katkı malzemesi olarak sadece akışkanlaştırıcı kullanılarak deney yapılmıştır. Bu çalışmalar: 15, 24, 40, 49, 59, 62 ve 69'dur.

Birim Hacim Ağırlık: Çalışmaların 2 tanesinde birim hacim verilmiştir. Çalışmaların biri normal beton aralığında sonuç gösterirken diğeri 1.940,4-2.575,8 kg/m³ sonucuna sahiptir. Akışkanlaştırıcıların reaksiyon hızını ve miktarını arttırmasından dolayı daha yoğun betonlar elde edildiği görülmüştür.

Isıl İletkenlik: Deney bulunmamaktadır.

Öz ısı: Deney bulunmamaktadır.

Basınç Dayanımı: 7 çalışmada basınç dayanımı testi yapılmıştır. Ortalaması 10,95 MPa olan 0-15 MPa aralığında %13'lük bir yığılma vardır. Çalışmaların %33'ü 15,01-30,0 MPa aralığında, %13'ü 30,01-45,0 MPa, %13'ü 45,01-60,0 MPa, %20'si 60,01-75,0 MPa ve %8'i 75,01-90,0 MPa aralığındadır. Düşük aralıklarda da yüksek basınç dayanıma sahip sonuçlar 15,01 MPa ve üzerinde kümelenmiştir.

Eğilme Dayanımı: Deney bulunmamaktadır.

Su Emme: Deney bulunmamaktadır.

Çeşitli katkı malzemelerinin kullanılması:

Çeşitli katkı malzemelerinin kullanıldığı 12 adet deney bulunmaktadır.

Birim Hacim Ağırlık: 7 çalışmada verilen birim hacim ağırlık deneylerine bakıldığı zaman 3 tanesi hafif beton ve 3 tanesi normal beton aralığında sonuca sahiptir. 1 tanesi normal aralığına yakın $1.916-2.288 \text{ kg/m}^3$ sonucunu vermiştir.

Isıl İletkenlik: 2 adet çalışmada ısı iletkenlik deneyi yapılmış ve ortalaması $0,435 \text{ W/mK}$ 'dır. Çeşitli katkıların kullanıldığı jeopolimer betonların ısı iletkenlikleri düşük çıkmıştır.

Öz ısı: Deney bulunmamaktadır.

Basınç Dayanımı: 12 adet çalışmada basınç dayanım deneyi yapılmıştır. Orantılı olarak yüksek basınç dayanım aralıklarına dağılan sonuçlar şu şekildedir; %12,5'i 0-15,0 MPa, %25'i 15,01-30,0 MPa, %12,5'u 30,01-45,0 MPa, %21'i 45,01-60,0 MPa, %21'i 60,01-75,0 MPa ve %8'i 75,01-90,0 MPa aralığındadır.

Eğilme Dayanımı: 7 çalışmada eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Sonuçların ortalaması $6,25 \text{ MPa}$ 'dır. Deney sonuç aralıkları çok düşük ve çok yüksek aralıklarda yığılma göstermiştir. Sonuçlar; %43'ü 0-4,0 MPa aralığı ve $1,65 \text{ MPa}$ ortalaması, %14'ü 4,01-8,0 MPa, %21,5'i 8,01-12,0 MPa ve %21,5'i 12,01-15,0 MPa aralığındadır.

Su Emme: Su emme deneyleri 4 tanedir. %62,5'i %0 - %10 aralığında su emmeye sahiptir. %12,5'i %10,01 - %20 ve %25'i %20,01 - %30 aralığında su emme potansiyeline sahiptir.

Sıcaklığa Göre Değerlendirme:

Literatürde bulunan jeopolimerizasyon için gerekli ısı değerlendirmelerinde görüldüğü üzere jeopolimerizasyon için $20-80^\circ\text{C}$ arası kür gerekmektedir (Provis ve van Deventer, 2009). Derlenen çalışmalar 3 şekilde ayrılmıştır. Bunlar; $0-80^\circ\text{C}$ arası kür yapılan çalışmalar, 80°C ve daha fazlası kür uygulaması yapılan çalışmalar ve $20-200^\circ\text{C}$ arası kür yapılan çalışmalardır. 4 çalışmada sıcaklık verisi olmadığı için değerlendirmeye dahil edilememiştir.

Kür için 0-80°C kullanılması:

42 adet çalışmada 0-80°C arası kür uygulanarak jeopolimerizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar: 1, 3, 4, 10, 12, 15, 17, 19, 21, 25, 26, 27, 29, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 40, 41, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61 ve 62'dir.

Birim Hacim Ağırlık: 18 çalışmada birim hacim ağırlık değerlendirmesi yapılmıştır 9 tanesi hafif beton özelliğinde 8 tanesi normal beton özelliğindedir. 1 çalışma 1.940-2.575 kg/m³ sonucuna sahip olup normal betona yakın özelliklere sahiptir. Kür sıcaklığının 80°C'e kadar olması belirgin bir birim hacim davranışı özelliği göstermemiştir.

Isıl İletkenlik: 10 çalışmada ısı iletkenlik deneyi vardır ve ortalaması 0,52 W/mK'dır. Bu ortalama, konvansiyonel betona göre düşük bir ortalama.

Öz Isı: 70 çalışmada sadece 4 tane öz ısı deneyi bulunmaktadır. Tamamı 80°C'e kadar kür uygulanarak deney yapılmıştır. Çalışmaların ortalaması 1.139 J/kg-K'dir.

Basınç Dayanımı: 37 tane çalışmada basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Çalışmaların sonuçları 15,01-30,0 MPa aralığında kümelenirse de genel olarak yüksek değerlere dağılım göstermektedir. Çalışma sonuçlarının %15'i 9,95 MPa ortalama ile 0-15,0 MPa, %30'u 15,01-30,0 MPa, %18'i 30,01-45,0 MPa, %15'i 45,01-60,0 MPa, %15'i 60,01-75,0 MPa ve %7'si 75,01-90,0 MPa aralığındadır.

Eğilme Dayanımı: 10 çalışmada ortalama 7,47 MPa'dır. Sonuçlar değer aralıklarına orantılı bir şekilde dağılmıştır. %30'u 0-4,0 MPa arasında ve ortalaması 2,36 MPa'dır. %20'si 4,01-8,0 MPa, %25'i 8,01-12,0 MPa ve %25'i 12,01-15,0 MPa arasında dağılmıştır.

Su Emme: Su emme deneyi 12 çalışmada vardır. Fakat 1 tanesi yüksek sıcaklıkta üretilen jeopolimer deneyi olduğu için hesaplama dışında bırakılmıştır. %81 oranında su emme değeri %0 - %10 arasındadır. %9,5'i %10,01 - %20 ve %9,5'i %20,01 - %30 aralığında su emme değerine sahiptir.

Kür için 80 + °C kullanılması:

Hızlı jeopolimerizasyon hedeflenerek 6 adet çalışmada 80°C ve üzeri ısı kürü denemeleri yapılmıştır. Bu çalışmalar; 5, 16, 22, 36, 48 ve 52'dir.

Birim Hacim Ağırlık: 4 çalışmada görülen birim hacim ağırlık sonuçlarının 2 tanesi hafif beton 1 tanesi normal betondur. Normale yakın özellik gösteren 1.916-2.288 kg/m³ aralığında bir adet sonuç bulunmaktadır.

Isıl İletkenlik: Isıl iletkenlik 1 tane çalışmada gözükmemektedir. Bu çalışmanın aralığı 0,37-0,79 W/mK'dir ve düşük-normal sayılabilecek bir aralığa sahiptir.

Öz ısı: Deney bulunmamaktadır.

Basınç Dayanımı: 5 çalışmada basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Sonuçlar 0-105 MPa gibi geniş bir aralığa homojen denilebilecek şekilde dağılmıştır. Sonuçların %20'si 0-15,0 MPa, %20'si 15,01-30,0 MPa, %20'si 30,01-45,0 MPa, %10'u 45,01-60,0 MPa, %20'si 60,01-75,0 MPa ve %10'u 90,01-105,0 MPa aralığındadır.

Eğilme Dayanımı: Eğilme dayanımı deneyi 3 çalışmada vardır. Çalışmaların ortalaması 6,24 MPa'dır. %33'ü 0-4,0 MPa ve ortalaması 1,65 MPa, %33'ü 4,01-8,0 MPa, %17'si 8,01-12,0 MPa ve %17'si 12,01-16,0 MPa aralığında sonuca sahiptir.

Su Emme: Aralığı %5,29 - %6,61 olan bir adet çalışma bulunmaktadır.

Kür için 20-200 °C kullanılması:

18 çalışmada düşük ve yüksek sıcaklıklar bir arada değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar tabloda; 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 18, 20, 23, 24, 28, 30, 31, 43, 63, 67 ve 69'dur.

Birim Hacim Ağırlık: Birim hacim sonuçları 10 adet çalışmada bulunmaktadır. 4 sonuç hafif beton, 2 sonuç normal beton aralığındadır fakat kalan 4 sonuç hem hafif hem normal aralığa dağılmış durumdadır.

Isıl İletkenlik: 0,59-0,96 W/mK aralığına sahip tek bir çalışma bulunmaktadır.

Öz ısı: Deney bulunmamaktadır.

Basınç Dayanımı: 18 adet çalışmaların çoğunluğu 0-30 MPa arasında kümelenmiştir. %29'u 0-15,0 MPa ve ortalaması 6,91, %32'si 15,01-30,0 MPa, %9'u 30,01-45,0 MPa, %15'i 45,01-60,0 MPa, %3'ü 60,01-75,0 MPa, %6'sı 75,01-90,0 MPa, %3'ü 90,01-105,0 MPa ve %3'ü 105-120,0 MPa aralığındadır.

Eğilme Dayanımı: 9 çalışmada görülen eğilme dayanımı değerinin ortalaması 6,9 MPa'dır. Sonuçlar 0-12,0 MPa arası yoğunluklu olmak üzere orantılı dağılmıştır.

Sonuçların %33'ü 0-4,0 MPa ve ortalaması 1,86 MPa, %24'ü 4,01-8,0 MPa, %29'u 8,01-12,0 MPa, %10'u 12,01-16,0 MPa ve %4'ü 16,01-20,0 MPa aralığındadır.

Su Emme: 11 adet çalışmada su emme deneyi görülmektedir. Sonuçlar: %68'i %0 - %10'luk, %9'u %10,01 - %20, %18'i %20,01 - %30 ve %5'i %30,01 - %40 oranında su emmeye sahiptir. Sonuçların yoğunluğu düşük su emme özelliğinde olsa dahi yüksek oranda sonuçlar bulunmaktadır.

Derlenen 70 çalışmanın 33 tanesinde birim hacim ağırlık değeri verilmiştir. Değerlerin %57,5'i 2.000 kg/m³'ten az, %40,9'u 2.000-2.600 kg/m³ aralığında ve %1,6'sı 2.600 kg/m³'ten büyüktür. Çoğunluğu hafif beton özelliğinde çıkan sonuçların büyük bir kısmı da normal beton aralığında çıkmıştır. Sonuçlardan görüldüğü üzere jeopolimer beton kullanılmak istediği yere göre -hafif beton veya taşıyıcı beton- karışım tasarımı yapılabilir.

Jeopolimer beton düzey ve yatay kaplama malzemesi olabilecek fiziksel, mekanik, kimyasal ve termal özelliklere sahiptir. Hafif ve yüklere karşı dayanımı yüksektir. Isı yalıtım özelliğine sahiptir. Su emme oranı %0 - %10 oranında ve düşüktür. Atmosfer koşullarına karşı davranışı asitlere karşı davranışı, tuzlara karşı davranışı ve donma-çözünme deneyleri yapılarak ölçülmüştür ve betona göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Yüksek sıcaklıklara karşı davranışı % basınç kaybı ve % ağırlık kaybı olarak iki başlıkta incelenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda %basınç kaybı deneyleri 14 tanedir ve 100-900°C arasında ara değerlerde deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları aşağıdaki gibidir;

100 °C – 1 adet çalışma bulunmaktadır. %3,93 - %6,87 oranında bir basınç dayanımı *kazanımı* bulunmaktadır.

200 °C – 4 adet çalışma bulunmaktadır. 75±20 °C'de ısı kürü uygulanmış UK ve YFC kullanılan jeopolimerlerde %20,92 - %21,21 oranında bir basınç dayanımı *kazanımı* bulunmaktadır. Diğer sonuçlar %1,82 - %10,01 oranında bir basınç dayanımı kaybı bulunmaktadır.

300 °C – 6 adet çalışma bulunmaktadır. 75 °C'de YFC kullanılan bir jeopolimerde sonuçta %5,58 - %32,96 oranında basınç *kazanımı* olmuştur. Genel olarak sonuçlar %30 civarında düşüşe sahiptir.

400 °C – 4 adet çalışma bulunmaktadır. %7,62 *kazanım* olan bir sonum olmasına rağmen sonuçlarda genelde %4 - %40 oranında bir basınç dayanımı kaybı bulunmaktadır.

450 °C – 1 adet çalışma bulunmaktadır. %59,03 oranında bir basınç dayanımı kaybı bulunmaktadır.

500 °C – 2 adet çalışma bulunmaktadır. Çalışmaların birinde %21,93 - %42,57 oranında basınç dayanımı kaybı diğerinde %63,79 - %100 oranında bir basınç dayanımı kaybı bulunmaktadır.

600 °C – 8 adet çalışma bulunmaktadır. %4,21 *kazanım*, %10,62 ve %93,02 kayıp gibi sonuçlar olmasına rağmen ortalama %45 oranında bir basınç dayanımı kaybı bulunmaktadır.

700 °C – 1 adet çalışma bulunmaktadır. %46,09 - %47,53 oranında bir basınç dayanımı kaybı bulunmaktadır.

800 °C – 3 adet çalışma bulunmaktadır. Çalışmalarda ortalama %20 oranında basınç dayanımında *kazanımı* olmuştur.

900 °C – 7 adet çalışma bulunmaktadır. Ortalama basınç kaybı %72,5'tir sonuçlar %41,87 ile %100 aralığındadır.

Yüksek sıcaklıklarda %ağırlık kaybı deneyleri 7 tanedir ve 200-1000°C arasında ara değerlerde deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları aşağıdaki gibidir;

200 °C – 5 adet çalışma bulunmaktadır. Bir çalışmada %8,37 oranında ağırlık *kazanımı* olmuştur. Kalan çalışma sonuçlarında %6 - %9,08 aralığında ağırlık kaybı bulunmaktadır.

300 °C – 2 adet çalışma bulunmaktadır. Çalışmaların birinde %1,92 - %2,81 aralığında ağırlık kaybı diğerinde %7,89 - %8,08 aralığında ağırlık kaybı bulunmaktadır.

400 °C – 5 adet çalışma bulunmaktadır. %32,85 gibi uç örnek ağırlık kaybı dışarıda tutulduğu zaman çalışmaların ortalama ağırlık kaybı %6 civarındadır.

600 °C – 6 adet çalışma bulunmaktadır. %37,57 gibi uç örnek ağırlık kaybı dışarıda tutulduğu zaman çalışmaların ortalama ağırlık kaybı %6 civarındadır.

800 °C – 4 adet çalışma bulunmaktadır. %39,28 gibi uç örnek ağırlık kaybı dışarıda tutulduğu zaman çalışmaların ortalama ağırlık kaybı %10 civarındadır.

900 °C – 2 adet çalışma bulunmaktadır. Çalışmaların birinde %13,33 - %13,54 aralığında ağırlık kaybı diğerinde %4,78 - %6,01 aralığında ağırlık kaybı bulunmaktadır.

1000 °C – 1 adet çalışma bulunmaktadır. %91,71 oranında bir ağırlık kaybı bulunmaktadır.

HCl ve H₂SO₄ asitlerine karşı jeopolimer betonun davranışı 3 adet çalışmada incelenmiştir.

HCl asit 2 adet çalışmada incelenmiştir. Tüm çalışmalarda numuneler 1 yıl HCl içerisinde tutulmuştur. Bir çalışma, %7 oranında basınç dayanımı kazanmak ile %9 oranında basınç dayanımı kaybetmek arasında sonuçlar elde etmiştir. Diğer çalışma %72,31 - %79,05 oranında basınç dayanımını kaybetmiştir.

H₂SO₄ asit 2 adet çalışmada incelenmiştir. Çalışma sonuçları birbirinden uzaktır. Çalışmaların 2 tanesi 1 yıl 1 tanesi 1,5 yıl olarak düzenlenmiştir. Bir yıl süren bir çalışmada numuneler %8 - %27 oranında basınç dayanımını kaybetmiştir. Bir yıl süren diğer çalışmada numuneler %84,4 - %88,21 oranında basınç dayanımını kaybetmiştir. Bir buçuk yıllık çalışmada numuneler %33,33 oranında basınç dayanımını kaybetmiştir.

Na₂SO₄ ve MgSO₄ tuzlarına karşı jeopolimer beton davranışı 4 adet çalışmada incelenmiştir. Çalışmalar 28, 30, 90, 180 ve 365 gün gibi farklı periyotlarda yapılmıştır.

Na₂SO₄ tuzu sonuçları incelendiğinde çeşitli sonuçlar bulunmaktadır. Çalışmaların birinde kayda değer değişim bulunmamaktadır. %10 - %60'lar arasında geniş bir %basınç kaybı aralığı bulunmaktadır.

MgSO₄ tuzu sonuçları incelendiğinde çeşitli sonuçlar bulunmaktadır. Çalışmaların birinde kayda değer değişim bulunmamaktadır. %10 - %70'ler arasında geniş bir %basınç kaybı aralığı bulunmaktadır.

Donma-Çözünme deneyleri 9 adet çalışmada gözükmemektedir. Deneyler 25, 30, 50, 56, 60, 80, 100 ve 150 döngü sayısı olarak çeşitli döngü sayılarında yapılmıştır. En fazla basınç dayanımı kaybı %34,02'dir. Sonuçlar ortalama %5 - %15 aralığındadır.



4. JEOPOLİMER BETONUN YAPI ÜRÜNÜ VE MALZEMESİ OLARAK ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışmanın temel amacı yapılan jeopolimer araştırmaları ışığında yeni bir malzeme olan jeopolimer betonun konvansiyonel beton yerine kullanılabilmesi ve yapı ürünü olarak kullanılabilir olmasının araştırılmasıdır. Yapılan araştırmaların çoğunun laboratuvar aşamasında kalması, endüstriyel çalışmaların yeterli düzeyde yaygınlaşmaması ve bundan dolayı da yapılaşmaya dahil edilemediği gözlenmiştir. Özel firmalarda müşteriye özel üretim olarak üretilerek piyasada yerini alan jeopolimer, gelişen yapı sektöründe farkındalık arttırarak sahip olduğu dilimi hızlıca büyütebilir. Bu çalışmada, jeopolimer beton cephe kaplamasının çevresel etki bakımından beton cephe kaplaması yerine kullanılabilirliği irdelenmiştir.

4.1 Çevresel Sürdürülebilirlik

Artan tüketim alışkanlığıyla birlikte oluşan atıklar, enerji sarfiyatı gibi konularda doğal yaşama ve döngüye sadık kalarak; su, yiyecek, barınma ve enerji dengesinin kurulmasına çevresel sürdürülebilirlik denilmektedir. Kavramın hedeflerinden biri biyoçeşitlilik ve ekosistemin devamlılığını sağlamak kadar yenilenerek insan ve doğa arasında uyum oluşturmaktır. Çevresel sürdürülebilirliğin en önemli hedeflerinden biri dünyadaki mevcut kaynakların en az şekilde kullanılıp gelecek kuşaklara aktarılmasıdır. Bahsedilen hedef doğrultusunda; atıkların tekrar kullanılması (beşikten-beşiğe), yenilenebilir enerji, organik yiyecek gelişimi, yeşil bina gibi çalışmalar yapılmaktadır (Paçin, 2019).

SETAC'a (Society of Environmental Toxixology and Chemistry) göre çevresel etki; insan sağlığına etki, canlıların nesillerinin tükenmesi, küresel ısınma, çevresel kirlilik ve asidifikasyon olarak kendini ortaya koymaktadır (Url-28).

Çevresel sorunları etkileyen faktörlerin başında kontrolsüz tüketim başlıklarından biri olan enerji tüketimi: sürdürülebilirlik kavramıyla ilişkilendirilebilir ve bununla ilgili alınacak kararlar doğrudan sürdürülebilirlik kavramını etkilemektedir. Enerji

üretimi ve tüketimi sürecinde ortaya çıkan atıklar çevresel problemleri beraberinde getirmektedir. Kullanılan kaynakların alternatif kaynaklar seçilmesi ya da tüketim araçlarının az enerji gerektirir şekilde kurgulanmasıyla problemler ve tüketim arasında denge sağlanabilir (Url-28).

CML yöntemi (Center of Environmental Science of Leiden University)

1992 yılında Hollanda’da bulunan Leiden Üniversitesi Çevre Bilimler Enstitüsü tarafından geliştirilmiş bir orta nokta yaklaşım modelidir. CML adı altında bir grup bilim insanı 2001 yılında ISO (International Organization for Standardization) standartlarına yönelik “operasyonel rehber” isimli etki değerlendirme basamağı için bir dizi etki kategorisi ve karakterizasyon yöntemi önerilmiş bir kılavuz yayınladılar. Problem odaklı 7 adet etki kategorisi olan (küresel ısınma, ozon tabakasında incelme, asitleşme (have ve kara), ötrofikasyon, fotokimyasal sis oluşumu, abiyotik kaynakların tükenmesi-elemanlar, abiyotik kaynakların tükenmesi-fosil yakıtlar) yaklaşım etki değerlendirmesi metodu olan CML yöntemi geliştirilerek uygulanmıştır (Hischier ve diğ, 2013, Öztaş, 2014). Küresel bir yöntem olan CML asitleşme ve fotokimyasal sis oluşumu başlıklarında avrupayı esas almaktadır (Öztaş, 2014). Zorunlu ve zorunlu olmayan etki kategorileri olarak ikiye ayrılan yöntemin kategorileri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : CML, etki kategorileri (Kılıç, 2010).

Etki kategorisi	Parametre	Birimler
Zorunlu Olan Etki Kategorileri		
Küresel Isınma	Küresel Isınma, GWP	kgCO ₂ eşiti,100yıl
Ozon tabakasının incelmesi	Strasforik ozon tabakasının incelmesi, ODP	kgCFC11eşiti
Asitleşme	Toprağın ve suyun asitleşme potansiyeli, AP	kgSO ₂ eşiti
Ötrofikasyon	Ötrofikasyon potansiyeli, EP	kg (PO ₄) ⁻³
Fotokimyasal sis oluşumu	Fotokimyasal sis oluşturma potansiyeli, POCP	kgC ₂ H ₄ eşiti
Abiotic kaynakların tükenmesi - Elemanlar	Fosil kaynaklı olmayan abiyotiklerin tükenme potansiyeli, ADP elemanlar	kg Sb eşiti
Abiotic kaynakların tükenmesi- Fosil yakıtlar	Fosil kaynaklı olan abiyotiklerin tükenme potansiyeli, ADP fosil yakıtlar	

Çizelge 4.1 (Devam) CML, etki kategorileri (Kılıç, 2010).

Etki kategorisi	Parametre	Birimler
Zorunlu Olanmayan Etki Kategorileri		
Temiz su ekotoksosite potansiyeli	Su canlıları üzerinde toksik etkisi olan bileşiklerin su ekosistemine salınması	1,4-Diklorobenzen
Deniz ekotoksosite potansiyeli	Su canlıları üzerinde toksik etkisi olan bileşiklerin su ekosistemine salınması	1,4-Diklorobenzen
Toprak ekotoksosite potansiyeli	Toprak ekosistemi üzerinde toksik etkisi olan bileşiklerin salınması	1,4-Diklorobenzen
İnsan ekotoksosite potansiyeli	İnsan sağlığı üzerinde toksik etkisi olan bileşiklerin hava, su ve toprak yoluyla salınması	1,4-Diklorobenzen

Küresel Isınma

Atmosferde karbon dioksit (CO₂), metan (CH₄), azot protoksit (N₂O), hidroflorokarbonlar (HFCs) kloroflorokarbon (CFC), kükürthekezafloid (SF₆), ozon (O₃) ve su buharı gibi gazlar bulunmaktadır. Bahsi geçen gazlar atmosfere gelen ısının bir kısmını tutarak yeryüzünün belirli bir sıcaklıkta kalmasını sağlamaktadır. Gazların oranlarının dengesiz artışıyla yeryüzüne gelen güneş ışınlarındaki ısının tutulması gerekenden fazla bir kısmının tutulmasıyla sera etkisi oluşur (Url-30, Url-31, Url-32, Schoen ve diğ, 2017, Akın, 2006).

Ötrofikasyon

Evsel atıklar, tarımda kullanılan fosfat ve nitrat içerikli gübrelerin topraktan yıkanması gibi nedenlerin sonucu olarak ötrofikasyon; suda, özellikle azot ve fosfor bileşiklerince çeşitli besinlerin büyük oranda artması sonucu bitkiler, alg ve planktonların çoğalmasındır. Bunun sonucunda suda yaşayan balıkların ihtiyacı olan suda çözülmüş oksijen miktarı azalmaktadır. Artış, sudaki canlı dengesini değiştirmekte ve su kalitesini bozmaktadır (Url-29, Şaşı ve Yabanlı, 2015, Url-33).

Doğal ve kültürel ötrofikasyon olmak üzere iki çeşit vardır. Doğal ötrofikasyon; yağmur suları, kayaların aşınması, göl tabanındaki toprak yapısı, orman yangınları bitki polenleri ve erozyon gibi doğal sebeplerle oluşmaktadır fakat kültürel ötrofikasyonu; kanalizasyon atıkları, endüstriyel atıklar, evsel atıklar, tarım arazilerinden gelen drenaj suları ve gübreleme atıkları gibi oluşumlar tetikler. Doğal ötrofikasyon binlerce yıllık bir sürece yayılırken kültürel ötrofikasyon ise yalnızca bu süreci hızlandırır (Yiğit, 2002).

Asitleşme

Konutlar, ofisler ve fabrikalar gibi kaynaklardan atmosfere salınan kükürt dioksit (SO_2) ve azot oksit (NO_2) emisyonları, rüzgarlar yardımıyla sülfirik asit (H_2SO_4) ve sülfat (SO_4^{2-}) ile nitrat (NO_3^-) tuzları içeren azot oksit (NO), nitrik asit (HNO_3) dumanları ve damlacıklardan oluşan kirleticileri oluştururlar. Yeryüzündeki su kütleleri havadaki CO_2 'i erimiş bir şekilde içerisinde barındırır. CO_2 miktarının artışı su pH seviyesinin değişimine neden olmaktadır. Asidifikasyon suyun içerisinde çözünen CO_2 'in pH değerini düşürmesine denilmektedir. Oluşan kirleticiler yeryüzüne kuru ya da sulu (yağmur, çığ, sis) halde geri dönerler. Kuru ve sulu kirleticilerin karışımının yeryüzüne dönüşüne asit birikim ya da asit yağmuru adı verilir (Raisman ve diğ, 2013).

Bir diğer faktörler ise; nüfus artış hızı ve kentleşme, endüstride kullanılan hammaddeler, aşırı tüketim ve atıklar, ormanlık alanların azalması, su ve hava kirliliği ve iklim değişimidir. Faktörlerin sonucu olarak; kuraklık, sel, yangın, volkanik patlama, deprem, hortum, hastalık gibi olağanüstü durumlar ve dereceli değişimler olarak bilinen iklim değişimi, ozon tabakasının incilmesi ve asit yağmurları örnek gösterilebilir (Selici ve diğ, 2005).

Ozon Tabakasının İncelenmesi

Dünyayı kısa dalga boylu ultraviyole güneş radyasyonlarından ozon tabakası korumaktadır. Ayrıca, ozon fotosentez esnasında güneş radyasyonunun oksijen üzerindeki etkisi sonucu oluştuğundan dolayı doğal azot, klor, brom ve hidrojen içeren bir katalitik döngüye sahiptir. Ozon tabakasının incelmesinin iki farklı sebebi bulunmaktadır. İlk sebep volkanik ve güneşteki değişikliklerdir. İkinci sebep ise yirminci yüzyılda endüstrinin gelişmesiyle yapay olarak sentezlenen maddelerdir. Endüstride yaygın olarak kullanılan bu maddeler kloroflorokarbon (CFC), hidroklorofluorokarbonlar (HCFC) ve halonlar gibi maddelerdir. Artan radyasyon miktarı pek çok canlıya zarar vermektedir. Örneğin, insanlarda cilt kanseri, katarakt ve diğer hastalıklara neden olduğu gibi pek çok canlıda da DNA bozulmalarına neden olmaktadır. Ayrıca çok sayıda okyanus planktonlarına ve arazi mikroorganizmalarına da zarar verdiği bilinmektedir (Vermishev ve Danilov-Danilyan, 2014).

İyonlaşmış Radyasyon

Yüksek hızda partiküllerin ve elektromanyetik dalgaların enerjisi olarak tanımlanan radyasyon, iyonize ve iyonize olmayan radyasyon olarak ikiye ayrılır. Ayrıca oluşumları kaynaklı radyasyonlar doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Doğal radyasyonlar içinde bulunduğumuz çevrede doğal olarak var olan, kaçınamayacağımız radyasyon tipleriyle yapay radyasyon insan kaynaklıdır ve doğal radyasyonun çoğalmasında etkili rol oynamaktadır. Son zamanlarda nükleer tesisler ve nükleer silahlanma radyasyon miktarını arttırmıştır. Bu artışlar canlılarda kalıtsal bozulmalara neden olmaktadır (Coşkun, 2011, Ravanat ve Douki, 2016).

Fotokimyasal Ozon Oluşumu

Baca ve egzozlardan çıkan azot monoksit (NO) oluşumlarından kısa bir süre sonra azot dioksitlere (NO₂) dönüşmektedir. Oluşan azot dioksitler (NO₂) stratosfer katmanındaki ozonlar (O₃) ve kirleticilerle reaksiyona girmesi durumunda insan sağlığını olumsuz etkileyen bileşikler oluşturmaktadır. Oluşan bileşikler fotokimyasal sis oluşumu olarak adlandırılır ve bu sis kırmızı renkli bir duman gibi gözükmektedir (Sharma ve diğ, 2011, Çetin ve diğ, 2008).

Abiyotik Kaynakların Tüketilmesi (Elementler)

Kaynak tüketiminin çevresel etkisi abiyotik (biyolojik olmayan) elementler ve abiyotik fosil yakıtlar olmak üzere ikiye ayrılır. Abiyotik kaynakların tüketilmesi - elementler isminden de anlaşılacağı üzere içerdiği mineraller, kimyasallar ve madenler olan abiyotik kaynaklardır. CML yöntemi etki değerlendirmesinde alt kategorilerinde bu kaynak tüketimi; mevcut nihai rezerv, elde edilecek potansiyel, şu an elde edebilen rezerv, kullanılan teknoloji ve ekonomik sınırlar olarak raporlanmıştır. Birim olarak antimon (Sb) adında bir element referans birim olarak kabul edilmiştir. Bu element metale benzemektedir. Kırılabilen, toz haline getirilebilen, gümüş renkli bir katıdır. Akü imalatında ana madde olarak kullanılmaktadır. Cephane yapımında, cam ve seramik sanayide kullanılmaktadır. CML yönteminde birim olarak Sb'ye kabul edilmiştir (Simonen, 2014).

Abiyotik Kaynakların Tüketilmesi (Fosil Yakıtlar)

Tüketim alışkanlıklarının kritik olduğu bir başka konu da abiyotik kaynakların tükenmesi - fosil yakıtlar başlığıdır. Yaşam şartlarının teknoloji ile paralel bir şekilde iyileştirilmesi hedeflenirken teknolojinin bu denli hayatımıza girmesi enerji

tüketimini artırmaktadır. Enerji üretiminde önemli bir payı bulunan fosil yakıtlar 100 milyonlarca yıl önce denizlerde yaşayan ya da suların denizlere sürüklediği hayvan ve bitki kalıntıları anaerobik bir ortamda gerekli koşullar altında oluşan yakıtlardır (Simonen, 2014). Tüketicinin azaltılması yaşam sürdürülebilirliği için desteklenmelidir.

Deniz suyu Ve Temiz Su Ekotoksitesi

Deniz suyunun pH değeri, içerisinde çözünmüş besinler ve mineraller barındırdığı canlılar için önem arz etmektedir. Temiz su, sadece canlıların temel kaynağı değil ayrıca tarım, ulaşım, enerji üretimi ve sanayi içinde vazgeçilmezdir. Örneğin, beton oluşturulması için kullanılan su temiz su olmalıdır (Benli Yıldız, 2017).

Deniz suyu ve temiz su ekotoksitesi, su kütlelerinin toksik etkiler altında incelenmesini ifade eder. Etki süresi için zaman kısıtlaması bulunmamaktadır. Karakterizasyon faktörleri 1,4 diklobenzen eşdeğerleri/kg emisyon olarak verilir (ECETOC, 2016)

Toprak Ekotoksitesi

Toprak Ekotoksitesi, karasal ortamda yaşayan organizmaların toksik bir kimyasala maruz kalması sonucu oluşabilecek olumsuz etkileri göstermek için kullanılır (Socolof ve diğ, 2001).

İnsan Sağlığı Ekotoksitesi

Partikül maddeler ve kimyasal emisyonlar insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Özellikle astım, kalp hastalıkları, kanser olmak üzere çeşitli hastalıklara neden olabilmektedir. Bahsedilen diğer kategoriler de insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Test organizmasının %50'sinin ölmesine sebep olan madde konsantrasyonuna LC₅₀ ismi verilmektedir. İnsan ekotoksitesite kategorisi LC₅₀ verisini eş değere dönüştürür. Dönüşüm için açığa çıkarma ve multimedya modelleme kullanılır (Klopffer ve Grahl, 2014, Demirer, 2011).

Karakterizasyon

Analiz edilmek istenilen ürün sisteminin çevresel etkisinin tanımlanması ve ölçülmesine karakterizasyon denilmektedir. Yaşam döngü envanteri (YDE) sonuçları etki kategorilerine göre sınıflandırıldıktan sonra karakterizasyon faktörlerinin miktarları hesaba katılarak hesaplanır (ISO14042). Seçilen etki kategorisi yöntemine

göre değişen karakterizasyon faktörleri, emisyonların referans birimlerine dönüştürülmesini sağlar. Örneğin, “küresel ısınma potansiyeli” etki kategorisinin referans bileşiği CO₂ ve referans birimi kgCO₂ eşdeğeri’dir (Kılıç, 2010). Şekil 4.1’de örnek bir yaşam döngü envanteri değerlendirilmesi sınıflandırılması ve karakterizasyonu görülmektedir.

YDE	ETKİ KATEGORİLERİ	FAKTÖRLER	YDED
HAVAYA VERİLEN EMİSYONLAR CO ₂ 1.3 kg CO 3 kg CH ₄ 6 kg SO ₂ 0.001 kg NO _x 0.08 kg HCl 0.9 kg SUYA VERİLEN EMİSYONLAR PO ₄ 2 kg NH ₃ 0.1 kg SINIFLANDIRMA	GWP	1.3 kg CO ₂ * 1 3 kg CO * 3 6 kg CH ₄ * 25	160.3 kg CO ₂ Eq.
	AP	0.001 kg SO ₂ * 1 0.08 kg NO _x * 0.7 0.9 kg HCl * 0.88	0.849 kg SO ₂ Eq.
	EP	0.08 kg NO _x * 0.13 2 kg PO ₄ * 1 0.1 kg NH ₃ * 0.33	2.043 kg PO ₄ Eq.
		KARAKTERİZASYON	

(GWP: Küresel ısınma, AP: Asidifikasyon potansiyeli, EP: Ötrifikasyon potansiyeli)

Şekil 4.1 : YDED sınıflandırması ve karakterizasyon örneği (Kılıç, 2010).

Normalizasyon

Bir adet referans modelinin etki miktarlarına göre başka bir modelin etki göstergesi sonuçlarının büyüklüğünün tayin edilmesi normalizasyon olarak adlandırılmaktadır. Etki kategori sonuçları normal olanı ya da olmayanı ayırt etmek için referans ile karşılaştırılır. Normalleştirme için referansa bir bölge veya bir ülke ve bir süre belirlenir. Tüm etki kategorileri referansları ile karşılaştırıldığında hangi etki göstergesi sonucunun az ya da çok payı olduğunu söylemek mümkün olduğundan birbirleriyle kolay karşılaştırılır. Tek bir grafikte karşılaştırılmalı olarak ifade edilebilir (Simonen, 2014, Url-34).

Gruplandırma

Etki kategorileri alanlarına göre birleştirilerek daha iyi yorumlanabilir. Gruplandırma önceden belirlenmiş amaç ve kapsam doğrultusunda yapılabileceği gibi sınıflandırarak veya sıralanarak da yapılabilir. Etki kategorileri emisyonlarına ve

kaynaklarına göre isimlendirilebilir. Ayrıca yüksek, orta ve düşük olmak üzere hiyerarşik bir kategorizasyon yapılabilir (ISO14042).

Ağırlıklandırma

Ağırlıklandırma adımı zorunluğu olmayan bir adımdır. Çevresel etki kategorilerine çevresel derecelerine göre öznel bir değer verilmektedir. Puanlanan kategoriler, kategorinin puanıyla çarpılarak toplanır ve toplam çevresel performans değeri oluşturulur. Ağırlıklandırma için iki aşama bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla; gösterge veya normalizasyon sonuçlarının seçilen ağırlıklandırma faktörüne dönüştürülmesi ve sonuçların bir araya getirilerek gruplandırılmasıdır (ISO14042). Somut bir örnek vermek gerekirse; hava kirliliği yüksek bir bölgede yüksek çevresel etkisi olan bir ürün üretmek düşük hava kirliliği olan bir yerde üretilmesinden daha fazla ciddiye alınır (Demirer, 2011).

YDED Sonuçlarının Yorumlanması

Yorumlama aşaması; önemli noktaların belirlenmesi ve değerlendirmesi olarak iki aşamalıdır. Önemli noktalara göre gruplanan veriler, değerlendirme aşamasında kritik noktaları ortaya çıkartmaktadır. Sonuçlarla birlikte çevresel etkinin hangi aşamadan ve hangi malzemeden kaynaklandığı tespit edilerek YDD çalışma raporları hazırlanarak tavsiyeler verilmektedir. Raporlar oluşturulurken değerlendirme sonuçlarının net ve anlaşılır olması gerektiği gibi verilerin nereden alındığı, yapılan kabuller ve varsayımlar detaylıca rapora eklenmelidir (Url-34, ISO14042).

Kullanım iyileştirme, atık yönetimi veya bu tez kapsamındaki gibi ürün geliştirme kapsamı olan çalışmalarda nicel ve nitel ölçütlerin raporda olması beklenmektedir (Taygun, 2005, Ölmez, 2011).

4.2 Performans Değerlendirme Yöntemi

Bu bölümde performans değerlendirilmesinin amacı, bununla ilgili kullanılan program, kriterler, veriler ve çalışmanın yönteminden bahsedilmiştir.

Çalışmanın Amacı

Ülkemizde dünyada olduğu gibi enerjinin önemli bir oranı binalardaki konforu sağlamak için ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma için kullanılmaktadır (Bakos, 2000). Yapıların %20'si ulaşım, %43'ü sanayi ve %37'si konut, iş yeri gibi

binalardır (Bakos, 2000). Yapılarda konfor şartları için harcanan enerji miktarı yapının dış ortamla sınırını oluşturan kabuğuyla doğrudan bağlantılıdır. Pasif bir önlem olarak uygulanan bir cephe kaplama malzemesi ile binanın enerji talebini azaltmak mümkündür. Yapı kaynaklı çevresel emisyonların azaltılmasında inşaat sektörü önemli bir paya sahiptir.

Bu çalışmada, yapımında atık malzemelerin kullanıldığı üçüncü nesil beton olarak kabul edilen jeopolimer betonun bina kabuğunda beton cephe kaplama malzemesinin yerine kullanılabilirliği ve çevresel etkilerinin değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Ofis binası olarak tasarlanan simülasyon modelinin yıllık toplam enerji tüketimi hesabı yapılması düşünülmüş ve ısıtma için kullanılan doğal gaz sonucu oluşan çevresel etkilerin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Kullanılan Program, kriter ve veriler

Enerji modelleri 1960'lı yıllarda daha çok değerlendirme ve kıyaslama yöntemi olarak yapılmaya başlanmıştır (Buyle ve diğ, 2013). 1979 yılında çevre konusunda çalışan biyolog, kimyager vb. meslek gruplarındaki bilim insanlarının bir araya gelerek kurdukları, kâr amacı gütmeyen ve dünya çapında uzmanları ve enstitüleri bir araya getiren Çevre Toksikoloji ve Kimya Örgütünü (SETAC) kurmuşlardır. Bu tarih itibarıyla yaşam döngü değerlendirmeleri ve çeşitli iş alanlarında standartlar oluşturulmuştur (Bekker, 1982). Enerji modellemesi yapılırken uluslararası bir yöntem ve standart seçilmesi önemli bir noktadır. Seçilen yöntemle birlikte simülasyonu yapılacak yapının sistemlerinin doğru seçilmesi ve planlaması enerji verimliliğini arttıracaktır.

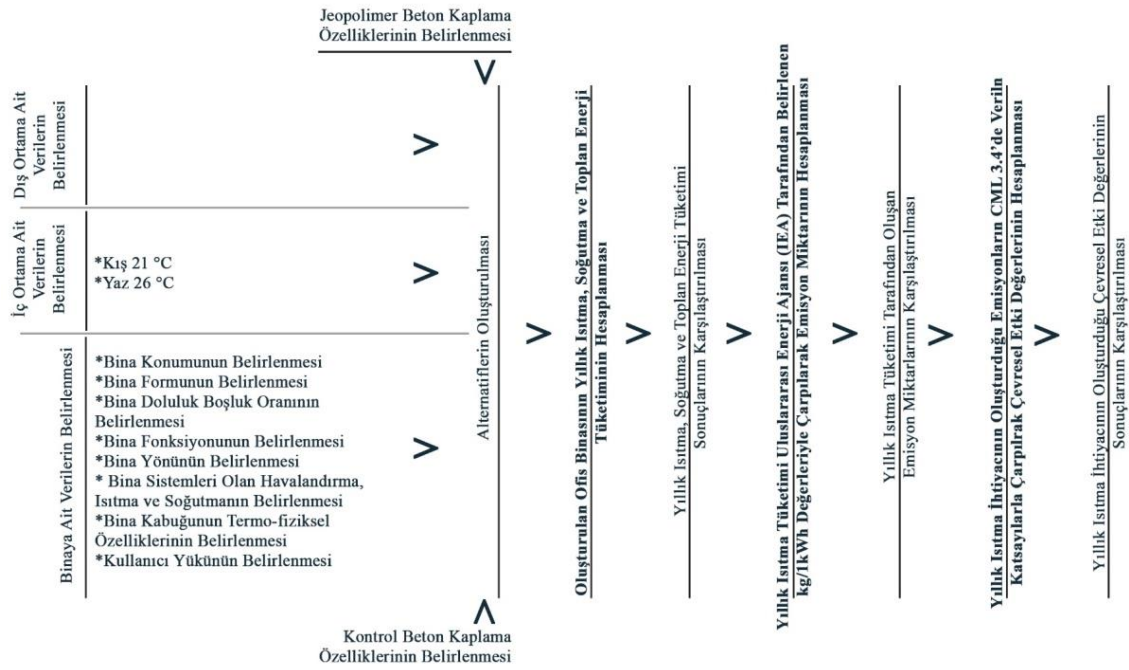
Çalışma sırasında İngiltere menşeli DesignBuilder 7.0.1.006 programı kullanılmıştır.

Program Autodesk tabanlı 3D modelleme programlarına entegre edilebildiği gibi kendi bünyesinde de çizim seçeneği mevcuttur. İlk aşamada enerji simülasyonu yapılacak binanın üç boyutlu modellemesi yapılır. Daha sonra hesabı etkileyecek sistemlerin seçimi ve gerektiği yerlerde malzemelerin özelleştirilmesi yapılmaktadır. Bina kabuğunun ısı geçirgenlik kat sayısı, camların gölgeleme katsayısı, bina doluluk boşluk oranları, ekipmanlarının verimlilikleri (COP, IPLV vb.), aydınlatma parametreleri ($W/m^2/100lux$), otomasyon senaryoları, ısıtma, soğutma ve sıhhi tesisat sistemlerinin seçimi, alternatif enerji sistemleri ve binadaki kullanıcı yükleri

programa girilerek model oluşturulmaktadır. Değerler rahatlıkla değiştirilip kısa sürede simülasyon yapılabilir. Program ara yüzleri eklerde bulunan Şekil A.5.1-8’de verilmiştir.

Çalışmanın Yöntemi

Çalışma kapsamında jeopolimer beton cephe kaplama ürününün, beton cephe kaplama ürünü alternatifi olup olmadığı ve aynı derece gün bölgesinde yer alan; ılımlı-nemli iklim tipinin temsil ili İstanbul ve sıcak-kuru iklim tipinin temsil ili Diyarbakır’da farklı iklim koşullarında gözlenmesi hedeflenmiştir. İki ürünün kıyaslanması, çevresel etkileri göz önüne alınarak yapılmıştır. Binaya ait veriler, iç ve dış ortam koşulları belirlendikten sonra farklı cephe kaplamalarından türetilen alternatifler oluşturulmuştur. Oluşturulan alternatiflerin yıllık ısıtma, soğutma ve toplam enerji yükleri hesaplanmıştır. Yıllık ısıtma verileri IEA tarafından belirlenmiş değerlerle çarpılarak emisyon miktarı bulunmuştur. Emisyon miktarları CML 3.4’e göre verilen kat sayılarla çarpılarak çevresel etki değerleri hesaplanmıştır. Çevresel etki değerlerinden olan küresel ısınma, asitleşme potansiyeli ve ötrofikasyon hesapları yapılarak karşılaştırılmıştır. Şekil 4.2’de çalışmanın akış şeması verilmiştir.



Şekil 4.2 : Tez kapsamında oluşturulan çalışma akış şeması.

4.3 Çalışma Parametreleri

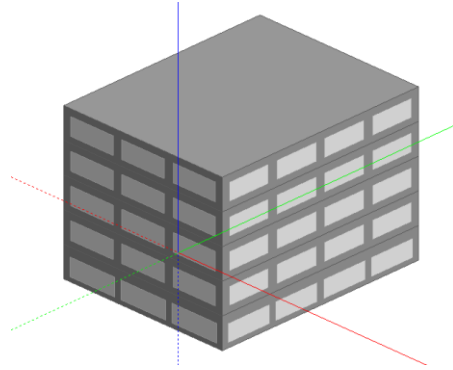
Performans değerlendirme yöntemi başlığında bahsedilmiş olan çalışmanın amacı, yöntemi, kullanılan program, kriterler ve veriler doğrultusunda simülasyon yapılacak alternatif modelleri oluşturulurken bazı parametreler sabit tutulurken bazılarında değişikliğe gidilerek yapı ürünü performansı değerlendirilmesi yapılmıştır. Mekan içerisindeki diğer yüzeylerdeki ısı alışverişi sebebiyle malzemenin performansını etkilememesi için değerlendirilen hacim teorik bir hacim olarak önerilmiş, merdiven sahanlığı vb. gibi fonksiyonlara ilişkin servis mekânları planlamada ihmal edilmiştir.

4.3.1 Sabit Veriler

- Bina Formu
- Saydamlık Oranı
- Bina Sistemleri
 - Havalandırma Sistemi
 - Isıtma ve Soğutma Sistemi
 - Aydınlatma
 - Ofis Ekipmanları
- Kullanıcı Yüğü

Bina Formu

Bina formu sabit tutulan bina taban alanı 25x20 m dikdörtgen formunda 1 katı 500 m² olan 5 katlı bir ofis binasıdır. Oluşturulan alternatiflerde zemine oturan döşeme, ara kat döşemesi, çatı ve iç duvar katmanları sabit tutulmuştur. Şekil 4.3'te simülasyon modeli gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Simülasyon modeli.

Saydamlık Oranı

Ofis binası gündüz kullanımının yoğun olduğu bir bina tipolojisine sahip olmasından dolayı saydamlık oranı düşük tutulmamaya çalışılmıştır. Bina dış kabuğunun enerji tüketimindeki rolü incelendiği için cephedeki saydamlık oranı %50 olarak belirlenmiştir. Pencerele 0,5m parapeti olacak şekilde 2m yüksekliğe sahiptir. U değeri 1,493 W/m²-K olan 6/13/6mm argon gazı bulunan Low-E cam kullanılmıştır.

Bina Sistemleri

- Mekanik havalandırma sistemi olarak fancoil seçilmiştir. Kabuk performansının daha iyi değerlendirilebilmesi için binada doğal havalandırma olmadığı kabul edilmiştir. Doğal havalandırma olup olmaması durumu karşılaştırılmıştır. Sonuçlarda büyük farklılıklar çıkmamıştır.
- Isıtmanın doğal gaz kullanılarak yapılacağı düşünülmüştür. Soğuk aylarda ortam sıcaklığı 21°C olarak kabul edilmektedir. 19°C itibariyle ısıtma sistemi çalışacağı kabul edilmiştir.
- Gün boyunca bina kabuğunda depolanan güneş enerjisini iç ortama salması beklenmektedir. Soğutma sistemi kaynağı olarak elektrik kabul edilmiştir. Sıcak aylarda ortam sıcaklığı 26°C olarak kabul edilmiş sıcaklık 28°C ve üzerine çıktığında soğutma sistemi devreye gireceği varsayılmıştır. Soğutma yükleri çevresel etki değerlendirme hesaplarına dahil edilmemiştir.
- Alternatiflerin tamamında ASHRAE Standard 55 ve BEP-TR (Binalarda Enerji Performansı Hesaplama Yöntemi)'de verilen bilgilere göre sızdırmazlık değeri (infiltrasyon) 0,5 ac/h olarak kabul edilmiştir.
- Ofis aydınlatması spot aydınlatma olarak belirlenmiştir.
- Ofis ekipmanları ve bilgisayarlar açık durumda olduğu varsayılarak simülasyonlar yapılmıştır.

Kullanıcı Yüğü

Ofis çalışanlarının her katta 60 kişi olduğu ve toplam 300 kişinin çalıştığı kabul edilmiştir. Metrekare başına düşen insan oranı 0,12'dir. Türkiye'deki resmi ve dini bayramlardan yola çıkılarak yılda 14 gün tatil olduğu varsayılmıştır.

4.3.2 Değişken Veriler

- Bina Konumu
- Cephe Kaplama Ürünü
- Bina Yalıtım Durumu

Bina Konumu

Cephe kaplama ürününün değerlendirildiği alternatiflerde malzemenin iklim değişikliğindeki davranışı değerlendirilmek istendiğinden ılımlı-nemli iklim tipini temsil eden İstanbul ve sıcak-kuru iklim bölgesini temsil eden Diyarbakır illeri için değerlendirme yapılmıştır. 2. Bölgede bulunan İstanbul ve Diyarbakır illerinde de sağlanması gereken toplam ısı geçirme katsayısı TSE 825 – Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları standardına göre aynı kabul edilmektedir. (Çizelge 4.2) Karşılaştırma illerinin farklı bölgelerde olması durumunda sağlanması gereken U değeri farklılaşacağından dolayı ısı yalıtımı kalınlığında değişikliğe gidilmesi gerekmektedir. Dış cephe kaplama ürününün performansının değerlendirilebilmesi için aynı bölgedeki illerden seçilmiştir.

Çizelge 4.2 : TSE 825'e göre bölgelere önerilen U değerleri.

İklim Bölgesi	UD (W/m ² K)	UT (W/m ² K)	Ut (W/m ² K)	UP (W/m ² K)
1. Bölge	0,66	0,43	0,66	1,8
2. Bölge	0,57	0,38	0,57	1,8
3. Bölge	0,48	0,28	0,43	1,8
4. Bölge	0,38	0,23	0,38	1,8
5. Bölge	0,36	0,21	0,36	1,8

Cephe Kaplama Ürünü

Kontrol ve Jeopolimer beton katmanlaşması olarak iki farklı katmanlaşma oluşturulmuştur. Oluşturulan katmanlaşmaların yalıtımsız alternatiflerine de simülasyon yapılarak dört farklı kabuk oluşumu oluşturulmuştur. Eklerde bulunan Çizelge A.3.1 – A.3.2 – A.3.3 ve A.3.4’te katmanlaşmalar ve Çizelge 4.5’te alternatifler gösterilmektedir.

Nihai farkları kaplama ürünü farkı olan katmanlaşmalarda, kontrol katmanlaşması kaplama ürünü olarak DesignBuilder 7.0.1.006 kütüphanesinde bulunan beton karo seçilmiştir. Seçilen karonun özellikleri Çizelge 4.3’teki gibidir:

Çizelge 4.3 : Beton karo özellikleri.

Özellik	Değer
Isı İletkenlik	1,1 W/m-K
Özısı	840 J/Kg-K
Yoğunluk	2.100 kg/m ³
Sertlik	Sert
Gömülü Enerji	0,22 kgCO ₂ /kg

Çalışma, piyasa karşılığı hala netleşmemiş olan jeopolimerin bina kabuğunda kullanıldığı zamanki çevresel davranışlarını incelemektedir. Özel üretim olarak üretilen jeopolimer beton yapı ürünlerin, içerisindeki katkılarla istenilen özellikler kazandırılabilir. Bir standart arayışı hala süren jeopolimer beton için yapılan laboratuvar çalışmalarının sonuçları derlenerek simülasyon programına girilerek simülasyon yapılmıştır. Jeopolimer betonun özellikleri 3.3 Yapı Ürünü Olarak Jeopolimer başlığı altında bahsedilen 70 farklı çalışma dahil edilerek oluşturulmuş çizelgeden yararlanılmıştır. Jeopolimer beton için kabul edilen özellikler Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Jeopolimer beton özellikleri.

Özellik	Değer	Kontrol Beton Kaplamasına Göre Değişiklik Yüzdesi
Isı İletkenlik	0,49 W/m-K	√ %55,45
Öz ısı	1.139 J/Kg-K	∧ %35,59
Yoğunluk	1.807,7 kg/m ³	√ %13,91
Sertlik	Sert	-
Gömülü Enerji	0,15 kgCO ₂ /kg	√ %31,81

Değerler belirlenirken 9 tipi bulunan jeopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemelerin kullanıldığı çalışmalar referans alınmıştır. Her çalışmada her sonuç elde edilmediğinden dolayı değerler belirlenirken farklı adetlerde çalışmaların ortalaması alınmıştır.

Isıl İletkenlik Değerinin Belirlenmesi:

70 çalışmanın 13'ünde ısı iletkenlik testi yapılmıştır. Bunların 10 adedi (4,13,16,21,33,34,35,38,45 ve 56. çalışma) ortalamaya dahil edilmiştir. 37 ve 55. Çalışmalar farklı aktivatör ve agrega kullanıldığı için ortalamaya dahil edilmemiştir. 70. Çalışma bir sempozyum sunumu olup malzeme içeriği yayınlanmadığı için dahil edilmemiştir.

Öz ısı Değerinin Belirlenmesi:

Yapılan çalışmalarda öz ısı değerleri MJ/m³-K cinsinden verilmiştir. Kullanılan simülasyon programı öz ısı değerini J/kg-K değerinden girilmesini istemektedir. Birimlerin birbirlerine çevrilmeleri için çalışmalarda bulunan MJ/m³-K cinsinden sonuçlar yoğunluğa (kg /m³) bölünüp 10⁶ ile çarpılmıştır.

Dönüşüm formülü:

$$\left(\frac{MJ}{m^3 K} \div \frac{kg}{m^3} \right) \times 10^6 = \frac{J}{kg K} \quad (4.1)$$

İncelenip çizelgelenen 70 çalışmanın 4 tanesinde öz ısı deneyi yapılmıştır. 4 çalışmanın MJ/m³-K cinsinden ortalaması alınmıştır. Öz ısı çalışması yapılan 4 çalışmanın sadece 1 tanesinde yoğunluk değeri bulunmaktadır. Var olan tek kaynağın sonuç aralığı çok geniş olduğundan dolayı dönüşüm için 24 tane kaynaktan yararlanılarak oluşturulmuş ve simülasyon programına girilmesi için olması gereken yoğunluk değeri 1.807,7 kg /m³ kabul edilmiştir. Kabul edilen değer var olan bir çalışmanın aralığına yakın bir değerdir. 1.807,7 kg /m³ yoğunlukla hesaplanan yaklaşık J/kg-K değerleri çizelgeye işlenmiştir.

Yoğunluk Değerinin Belirlenmesi:

Referans alınan 70 çalışmanın 34 tanesinde yoğunluk değerleri raporlanmıştır. 34 çalışmanın 24 tanesinde (1,4,5,6,7,8,9,10,16,18,19,21,22,23,25,28,30,34,38,41,46,49, 57,67. çalışmalar) standart denilebilecek malzemeler kullanıldığı için ortalamaya dahil edilmiştir. Jeopolimer atık kullanımına teşvik eden bir malzeme olduğu için 9 adet çalışmada (12,26,27,29,31,32,36,55,62.çalışmalar) atık cam, plastik gibi malzemelerin geri dönüşümü ve kazanımı için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar yoğunluk değeri belirlenirken hesap dışında bırakılmıştır. 70. çalışma bir sempozyum sunumu olup malzeme içeriği yayınlanmadığı için dahil edilmemiştir. 70 çalışma içerisinde jeopolimerin cephe malzemesi olarak kullanılmasıyla ilgili 2 adet çalışma bulunmaktadır. Bunlardan biri Doç. Dr. Gökhan Görhan ve Doç.Dr. Gökhan Kürklü tarafından yazılmış “Alkali Tuz İçeriğinin Geopolimer Cephe Kaplama Malzemesi Özelliklerine Etkisi” isimli makaledir. Çalışmada oluşturulan cephe karolarının yoğunluğu $1.688-1.707 \text{ kg/m}^3$ olarak gözükmetedir. Kabul edilen $1.807,7 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğu yapılan çalışmaya yakın olarak kabul edilebilir. Diğer çalışma Parames Kamhangritrong tarafından “Synthesis and Properties of High Calcium Fly Ash Based Geopolymer for Concrete Applications (Geopolymer Tile)” isimli çalışmadır. Bu çalışmada yoğunlukla ilgili veri okunamamıştır. $800-2.000 \text{ kg/m}^3$ aralığında yoğunluğa sahip olduğu için hafif beton kategorisindeki betonlarla kıyaslanabilir.

Gömülü Enerji Değerinin Belirlenmesi:

John L. Provis ve Jannie S. J. Deventer tarafından düzenlenen “Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications” isimli kitabın M. Weil, K. Dombrowski ve A. Buchwald tarafından hazırlanan “Life-cycle analysis of geopolymers” bölümünde örnek olarak uçucu kül ve metakaolin esaslı jeopolimerlerin gömülü enerjisi verilmiştir. Sırasıyla $0,05$ ve $0,15 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$ gömülü enerjiye sahip jeopolimerlerden metakaolin esaslı olan gömülü enerjisi $0,15 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$ olan örnek simülasyon hesabına seçilmiştir.

Bina Yalıtım Durumu

Alternatiflerin üzerinde yalıtım malzemesinin enerji tüketimine etkisini incelemek ve karşılaştırabilmek adına oluşturulan kontrol ve jeopolimer katmanlaşmasının yalıtımsız alternatifleri de incelenmiştir. Yalıtımsız alternatiflerin gerekli U değeri şartını sağlamaması göz ardı edilmiştir.

Çizelge 4.5 : Simülasyon alternatifleri listesi.

ALTERNATİFLER	ALTERNATİF KODU	KATMANLAŞMA	ŞEHİR	YALITIMLI/ YALITIMSIZ	KAT SAYISI	SAYDAMLIK ORANI
ALTERNATİF 1	G-İST-Y	GEOPOLİMER KATMANLAŞMASI	İSTANBUL	YALITIMLI	5	50
ALTERNATİF 2	G-DİY-Y	GEOPOLİMER KATMANLAŞMASI	DİYARBAKIR	YALITIMLI	5	50
ALTERNATİF 3	K-İST-Y	KONTROL KATMANLAŞMASI	İSTANBUL	YALITIMLI	5	50
ALTERNATİF 4	K-DİY-Y	KONTROL KATMANLAŞMASI	DİYARBAKIR	YALITIMLI	5	50
ALTERNATİF 5	G-İST-Z	GEOPOLİMER KATMANLAŞMASI	İSTANBUL	YALITIMSIZ	5	50
ALTERNATİF 6	G-DİY-Z	GEOPOLİMER KATMANLAŞMASI	DİYARBAKIR	YALITIMSIZ	5	50
ALTERNATİF 7	K-İST-Z	KONTROL KATMANLAŞMASI	İSTANBUL	YALITIMSIZ	5	50
ALTERNATİF 8	K-DİY-Z	KONTROL KATMANLAŞMASI	DİYARBAKIR	YALITIMSIZ	5	50

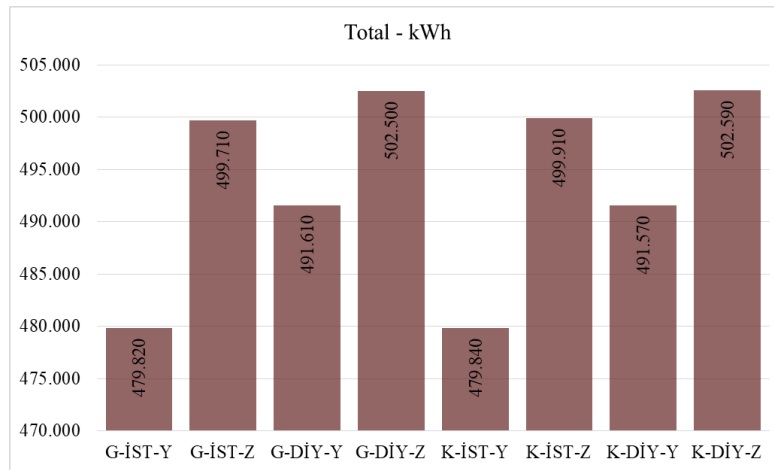
4.4 Hesaplama ve Değerlendirme

Parametreleri belirlenen modeller üzerine yapılan çalışmalar sonucu elde edilen verilere bu bölümde yer verilmiştir.

4.4.1 Simülasyon sonuçları

Bu bölümde İstanbul ve Diyarbakır şehirlerinde olmak üzere jeopolimer cephe kaplaması ve kontrol katmanlaşmalarının yalıtımlı ve yalıtımsız alternatifleri olmak üzere 8 alternatifin DesignBuilder 7.1.006 programıyla elde edilmiş ısıtma, soğutma ve toplam enerji tüketimi miktarlarına yer verilmektedir. U değeri düşük, yalıtım özelliği beton cephe kaplamasından yüksek jeopolimer beton cephe kaplaması tüm alternatiflerde ısıtma tüketimini azaltmıştır. Bununla beraber, yalıtım özelliği artan kabuk soğutma yüklerini gör ardı edilecek düzeyde arttırmıştır. Ancak, G-Dİ-Y ismiyle geçen Diyarbakır- yalıtımlı jeopolimer alternatif dışındaki alternatiflerde toplam enerji tüketimi kontrol grubunun altında kalmıştır. Sıcak-Kuru iklim bölgesini temsil eden Diyarbakır için yalıtım özelliği bulunan jeopolimer kaplama uygulamalarında yapı elemanındaki yalıtım katmanının azaltılabileceği sonucuna varılmıştır. Çizelge 4.6 ve Şekil 4.4-4.5-4.6’de alternatiflerin yıllık ısıtma, soğutma ve toplam enerjilerin birbirleriyle karşılaştırılması verilmiştir.

Yıllık toplam enerji tüketiminde en çok tüketim 502.590 kWh ile K-Dİ-Y-Z (Diyarbakır- Yalıtımsız Kontrol Katmanlaşması) alternatifidir. En az toplam enerji tüketimi 47.820 kWh ile G-İST-Y (İstanbul-Yalıtımlı Jeopolimer Katmanlaşması) alternatifidir.

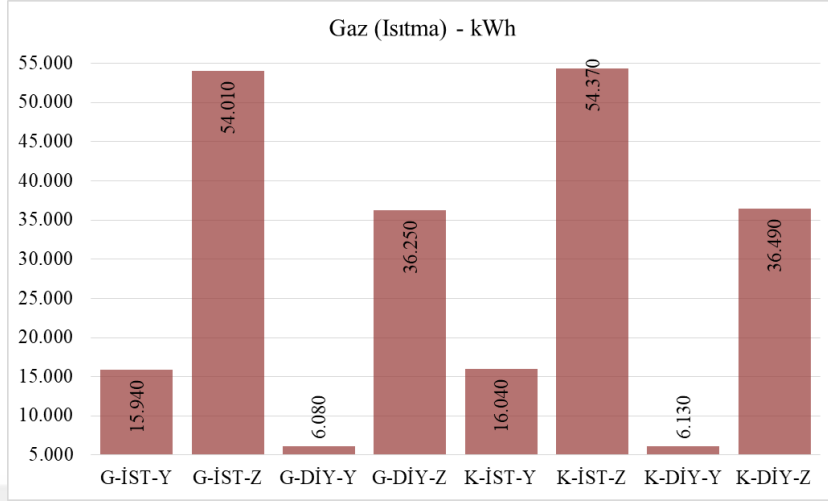


Şekil 4.4 : Alternatiflerin toplam enerji tüketimleri.

Çizelge 4.6 : Alternatiflerin yıllık ısıtma, soğutma ve toplam enerji tüketimleri.

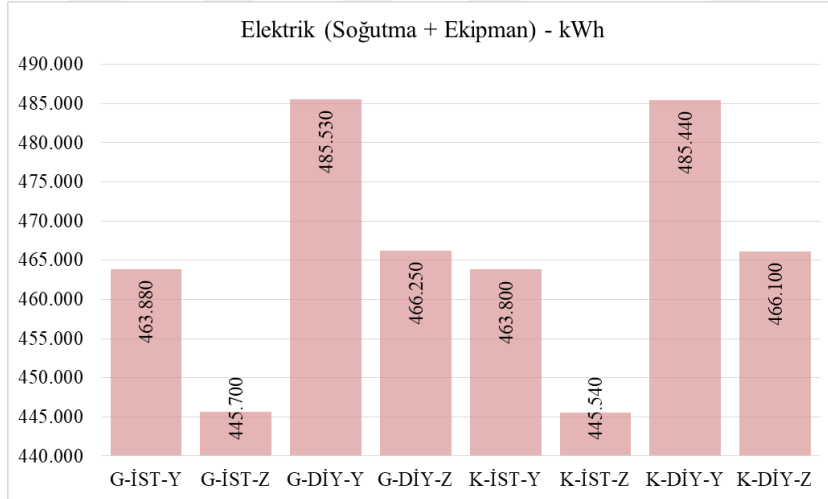
		ALTERNATİFLER	Gaz (Isıtma)	Elektrik (Soğutma + Ekipman)	Total	
			kWh	kWh	kWh	
JEOPİLİMER KATMANLAŞMA	İSTANBUL	YALITIMLI	G-İST-Y	15.940	463.880	479.820
		YALITIMSIZ	G-İST-Z	54.010	445.700	499.710
	DİYARBAKIR	YALITIMLI	G-DİY-Y	6.080	485.530	491.610
		YALITIMSIZ	G-DİY-Z	36.250	466.250	502.500
KONTROL KATMANLAŞMASI	İSTANBUL	YALITIMLI	K-İST-Y	16.040	463.800	479.840
		YALITIMSIZ	K-İST-Z	54.370	445.540	499.910
	DİYARBAKIR	YALITIMLI	K-DİY-Y	6.130	485.440	491.570
		YALITIMSIZ	K-DİY-Z	36.490	466.100	502.590

Yıllık ısıtma için doğal gaz tüketimi en çok 54.370 kWh ile K-İST-Z ve en az 6.080 kWh ile G-Dİ-Y alternatifinde kullanılmıştır.



Şekil 4.5 : Alternatiflerin gaz (ısıtma) enerji tüketimleri.

Elektrikli sistemlerinin her alternatifte sabit olduğu varsayılarak elektrikli sistem kullanımı ve soğutma için yıllık kullanılan elektrik yüklerine incelendiği zaman en yüksek tüketim 485.530 kWh ile G-Dİ-Y alternatiftir. En düşük elektrik kullanımı 445.540 kWh ile K-İST-Z'dir.



Şekil 4.6 : Alternatiflerin elektrik (soğutma+ekipman) enerji tüketimleri.

Jeopolimer katmanlaşması alternatifleriyle kontrol katmanlaşması alternatifleri karşılaştırıldığında toplam yükleri birbirine yakın fakat kontrol grubundan daha düşük çıkarken ısıtma yükleri tüm koşullarda düşük çıkmıştır. Sonuçlar gömülü enerjisi daha düşük olan jeopolimerin beton cephe kaplaması yerine kullanılabilirliğini destekler durumdadır.

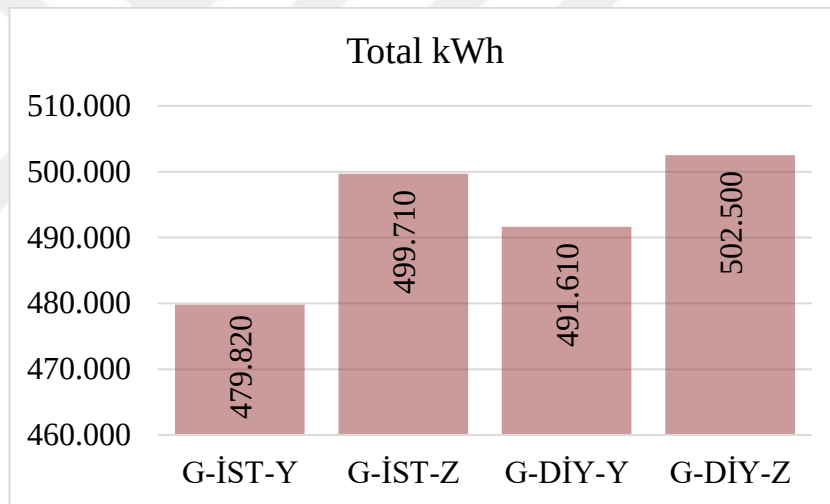
4.4.2 Yıllık enerji tüketimi karşılaştırılması

4.4.1 Simülasyon sonuçları bölümünde tüm alternatifler için verilen hesaplama sonuçları bu bölümde gruplandırılarak karşılaştırılmıştır. Alternatifler cephe katmanlaşması, bölge ve yalıtım durumu olarak 3 farklı değişkene bağlıdır. Gruplandırma da bu yönde yapılmıştır.

Kaplama Ürününe Göre Bina Alternatiflerinin Karşılaştırılması

Çalışmanın temel amaçlarından biri bina kabuğunda kullanılabilecek yapı ürünü önermektir. Geliştirilen ürünün yaşam ömrünün 1 yılına bakılarak çevresel etkileri incelenmektedir.

Jeopolimer katmanlaşmasına göre bina alternatiflerinde en az toplam enerji harcanan alternatifler sırasıyla; G-İST-Y, G-DİY-Y, G-İST-Z ve G-DİY-Z'dir. (Şekil 4.7)

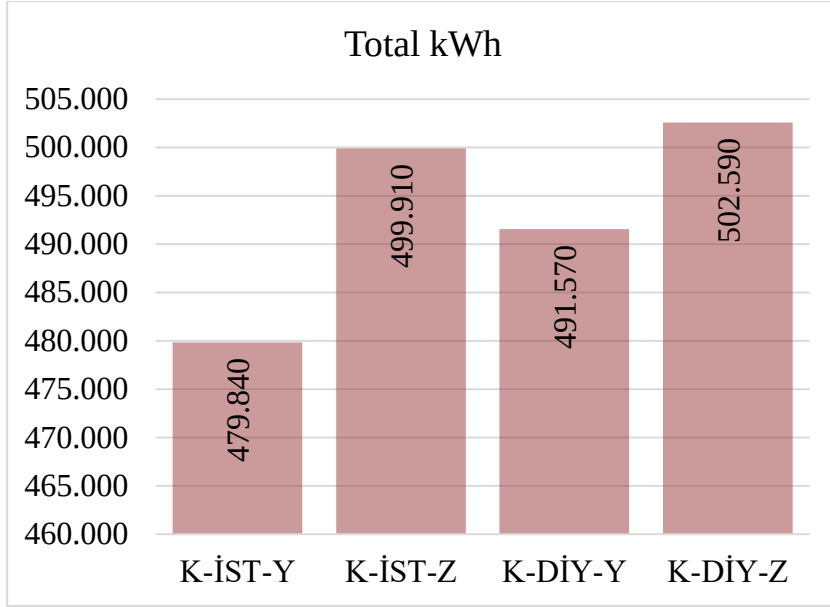


Şekil 4.7 : Jeopolimer katmanlaşması bina alternatiflerin yıllık enerji tüketimleri.

Jeopolimer cephe katmanlaşmasının yalıtımlı alternatiflerinin yalıtımsızlara göre daha iyi olduğu sonucu çıkartılırken diğer karşılaştırmalar da göz önünde bulundurularak oluşturulan jeopolimer kaplamanın oluşturulan katmanlaşmalar arasında ılımlı-nemli iklimde daha iyi performans sağladığı görülmüştür.

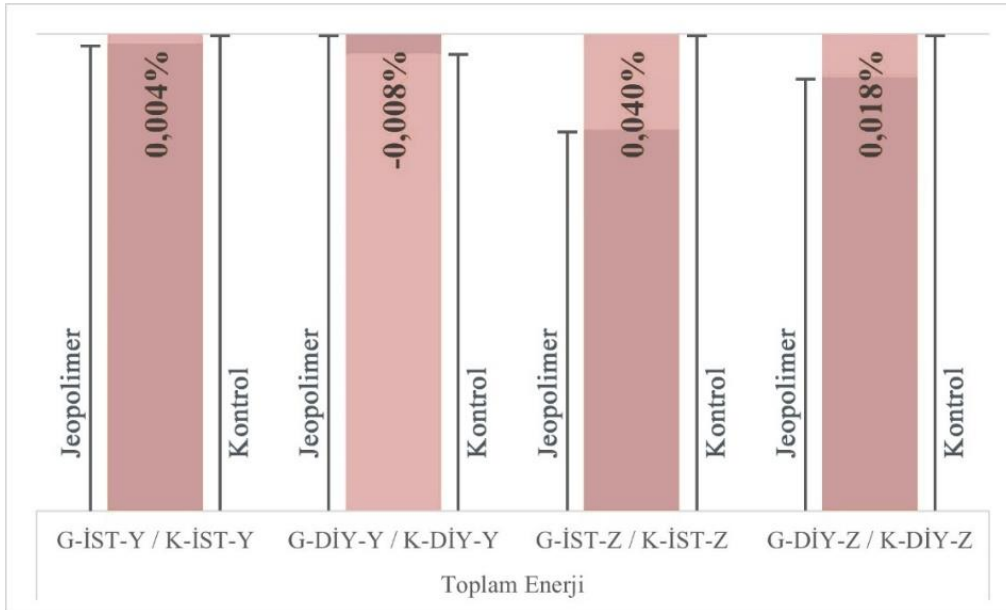
Kontrol katmanlaşmasına göre bina alternatiflerinde en az toplam enerji harcanan alternatifler sırasıyla; K-İST-Y, K-DİY-Y, K-İST-Z ve K-DİY-Z'dir. (Şekil 4.8)

Kontrol katmanlaşmasında beklendiği gibi yalıtımlı alternatifler yalıtımsız alternatiflere göre daha az yıllık enerji harcamasına sahiptir.



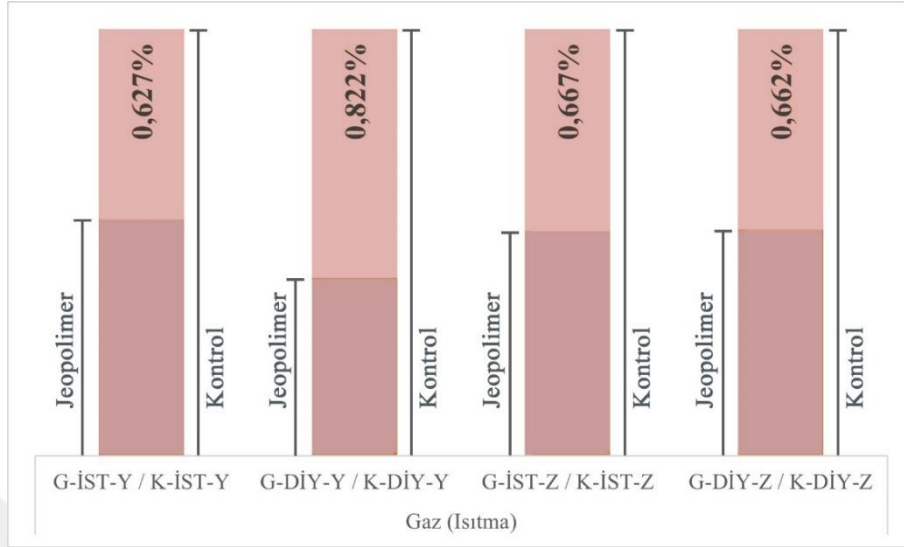
Şekil 4.8 : Kontrol katmanlaşması bina alternatiflerin yıllık enerji tüketimleri.

Toplam enerji tüketimleri verilen jeopolimer ve kontrol katmanlaşmaları karşılaştırılmıştır. G-DİY-Y alternatifi K-İST-Y'ye göre %0,008 daha fazla enerji harcamıştır. Diğer sonuçlarda %0,004 - %0,040 oranında jeopolimer katmanlaşmalarında toplam enerjide düşüş yaşanmıştır. Değişim oranları kayda değer değildir fakat jeopolimer beton cephe kaplamasının ilk somutlaşma enerjisi beton cephe kaplamasından daha düşük olduğu için tercih edilmelidir. Ayrıca düşük değişim oranları logaritmik bir şekilde çevresel etkiyi etkilemektedir. (Şekil 4.9)



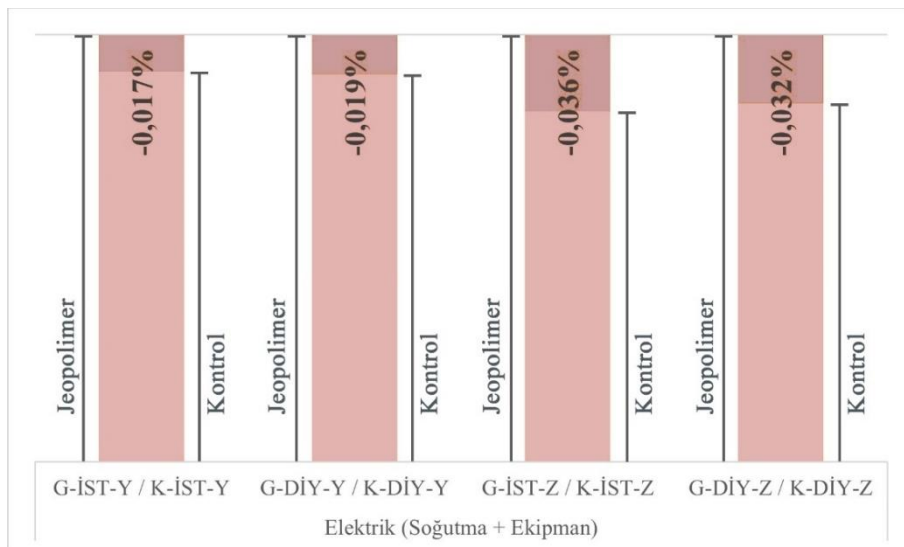
Şekil 4.9 : Jeopolimer ve kontrol katmanlaşmasının yıllık enerji tüketimlerinin karşılaştırılması.

Jeopolimer kullanılan tüm alternatiflerde ısınma için gaz tüketiminde kontrol gruplarına göre düşüş yaşanmıştır. Düşüşler %0,627 ile %0,822 arasındadır. Jeopolimerin gözenekli yapısı kabuğa yalıtım özelliği kazandırmaktadır. (Şekil 4.10)



Şekil 4.10 : Jeopolimer ve kontrol katmanlaşmasının yıllık gaz tüketimlerinin karşılaştırılması.

Jeopolimer beton cephe kaplamasına sahip alternatiflerin hepsinde yıllık soğutma için kullanılan elektrik miktarı göz ardı edilebilecek şekilde yükselmiştir. Jeopolimer betonun öz ısıısının yüksek olması ve yalıtım özelliğine sahip olması alternatiflerde kabul edilmiş katmanlaşmada soğutma için kullanılan elektrik tüketimini göz ardı edilecek düzeyde arttırmıştır. Elektrik tüketimi %0,017 - %0,36 oranında jeopolimer cephe kaplaması alternatiflerinde artış göstermiştir. (Şekil 4.11)

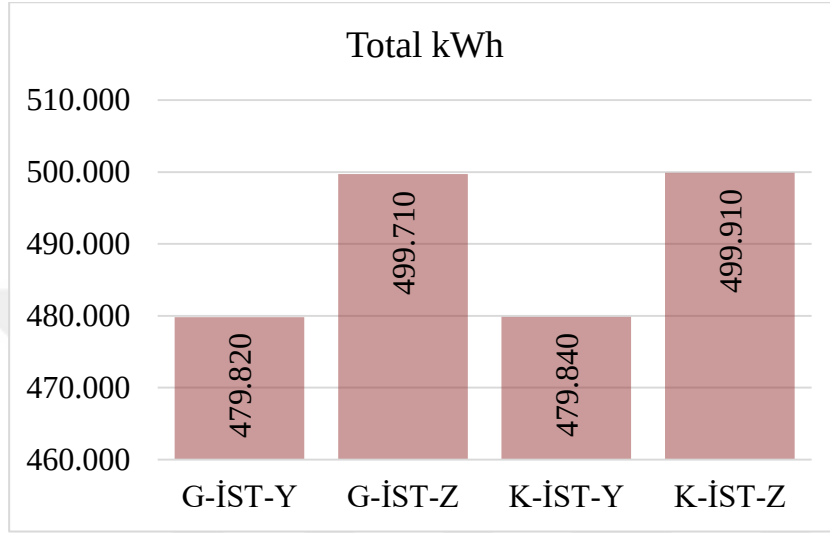


Şekil 4.11 : Jeopolimer ve kontrol katmanlaşmasının yıllık elektrik tüketimlerinin karşılaştırılması.

Şehre Göre Bina Alternatiflerinin Karşılaştırılması

İstanbul şehrindeki bina alternatiflerinde en az toplam enerji harcanan alternatifler sırasıyla; G-İST-Y, K-İST-Y, G-İST-Z ve K-İST-Z'dir. (Şekil 4.12)

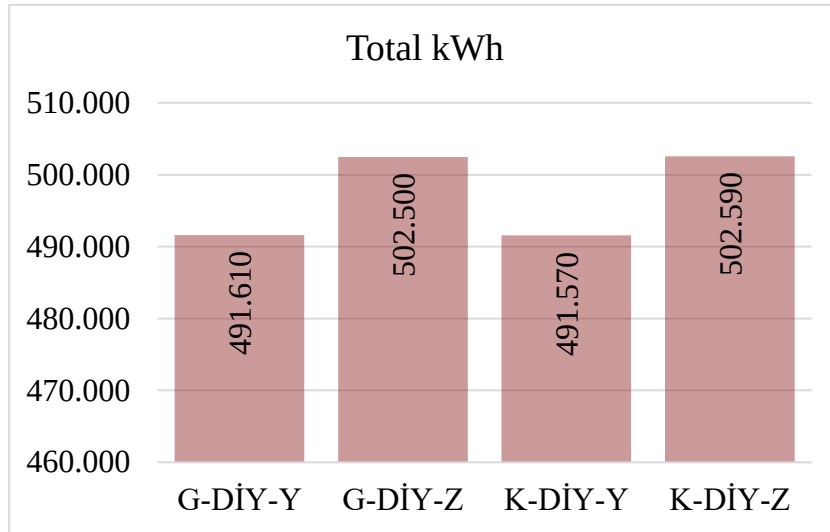
Ilımlı-nemli iklime sahip İstanbul şehrinde jeopolimer katmanlaşması muadili olan kontrol katmanlaşmalarından daha iyi sonuç vermiştir.



Şekil 4.12 : İstanbul bina alternatiflerin yıllık enerji tüketimleri.

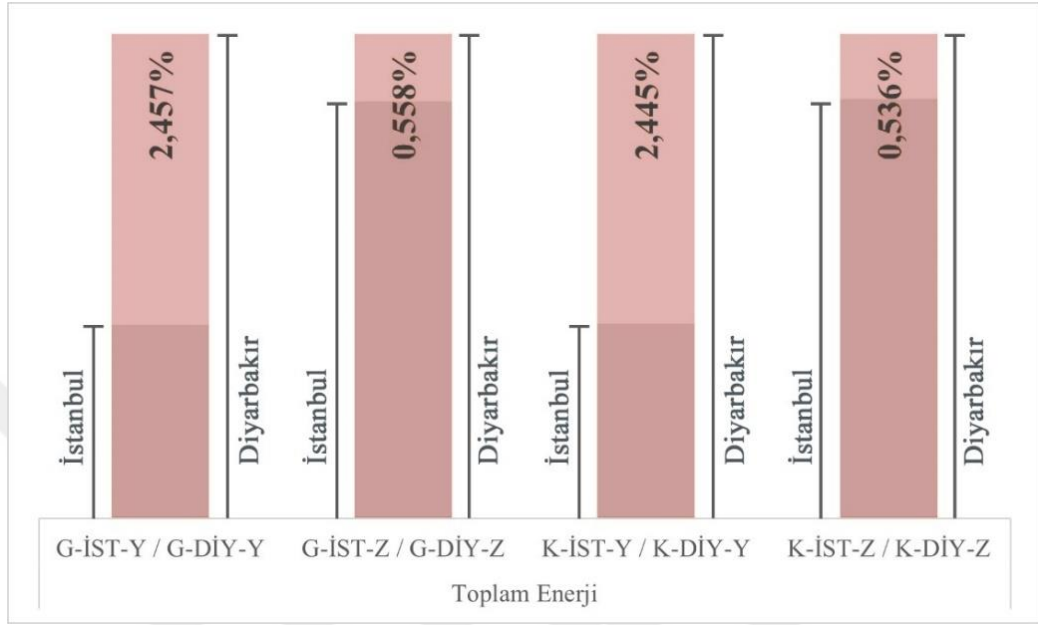
Diyarbakır şehrindeki bina alternatiflerinde en az toplam enerji harcanan alternatifler sırasıyla; K-DİY-Y, G-DİY-Y, G-DİY-Z ve K-DİY-Z'dir. (Şekil 4.13)

Sıcak-kuru iklime sahip Diyarbakır şehrinde yalıtımlı jeopolimer katmanlaşması kontrol katmanlaşmasından daha fazla tüketim sonucu verirken yalıtımsız jeopolimer katmanlaşması daha iyi sonuç vermiştir.



Şekil 4.13 : Diyarbakır bina alternatiflerin yıllık enerji tüketimleri.

Şehre göre incelendiği zaman toplam enerji miktarı ikliminden dolayı en fazla Diyarbakır'da çıkmıştır. Jeopolimer beton cephe kaplamasının Diyarbakır'da kullanılması sırasında İstanbul iline göre %2,457 daha fazla enerji harcadığı görülmüştür. (Şekil 4.14)



Şekil 4.14 : Şehre göre toplam enerji tüketiminin karşılaştırılması.

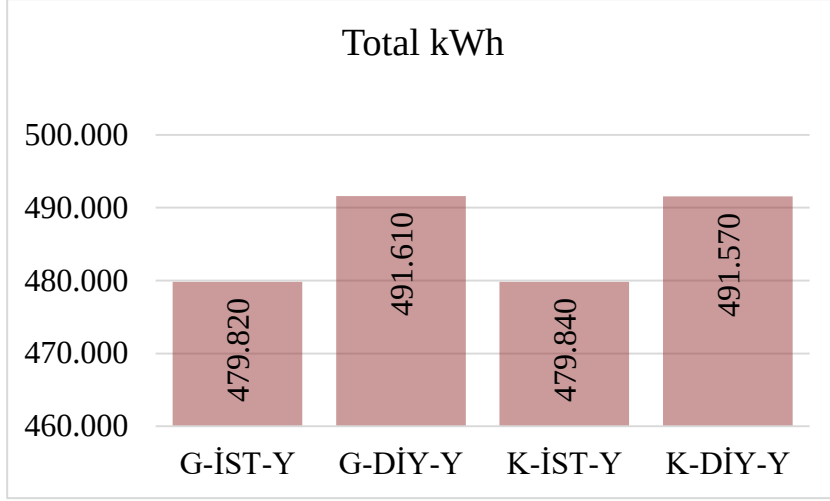
Yalıtımına Göre Bina Alternatiflerinin Karşılaştırılması

Yalıtımlı ve yalıtımsız olmak üzere iki başlıkta incelenen alternatiflerin; yıllık toplam enerji harcamalarında meydana gelen oransal değişimler şekil 4.15-4.16'de gösterilmiştir.

Yalıtımlı bina alternatiflerinde en az toplam enerji harcanan alternatifler sırasıyla;

G-İST-Y, K-İST-Y, K-DİY-Y ve G-DİY-Y'dir.

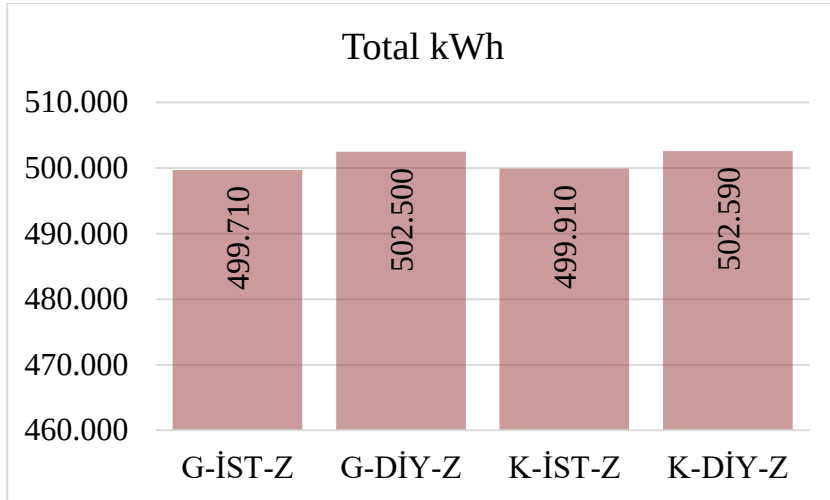
Yalıtımlı bina alternatiflerinde ılımlı-nemli iklime daha uyumlu olan jeopolimer katmanlaşması en az tüketime sahip alternatif olmuştur. Sıcak-Kuru iklim bölgesini temsil eden Diyarbakır için yalıtım özelliği bulunan jeopolimer kaplama uygulamalarında yapı elemanının U değerinin düşüşü yaz aylarında soğuma yükünü göz ardı edilebilecek düzeyde artmış fakat en yüksek tüketime sahip alternatif olmuştur. Toplam tüketimin kontrol katmanlaşmasından düşük olabilmesi için yalıtım katmanının azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.15 : Yalıtımlı bina alternatiflerin yıllık enerji tüketimleri.

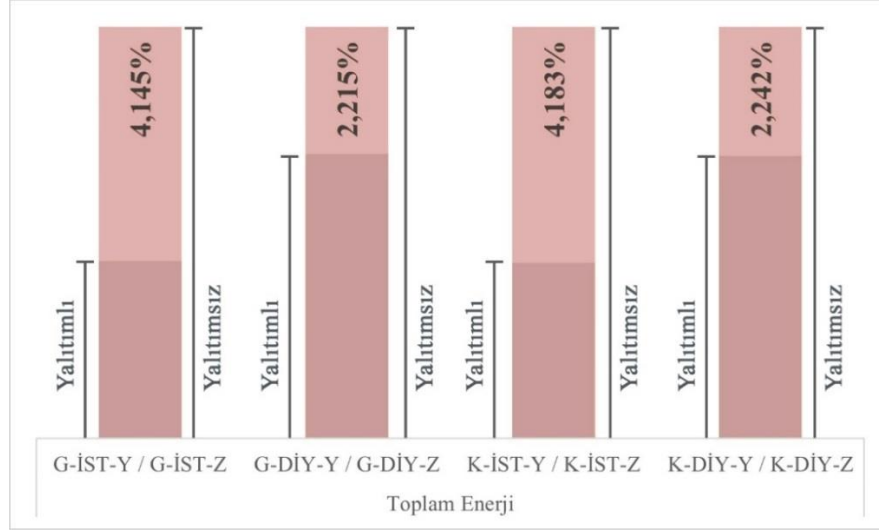
Yalıtımsız bina alternatiflerinde en az toplam enerji harcanan alternatifler sırasıyla; G-İST-Z, K-İST-Z, G-DİY-Z ve K-DİY-Z'dir.

Yalıtımsız katmanlaşma alternatiflerinde en az toplam enerji tüketimi ılımlı-nemli iklimde uygulanan jeopolimer beton cephe kaplamasına aittir. Yalıtımsız alternatiflerde Diyarbakır ilinde jeopolimer katmanlaşma kontrol katmanlaşmasından daha az tüketim gerçekleştirdiği için yalıtım özelliğini destekler bir sonuç çıkartmıştır.



Şekil 4.16 : Yalıtımsız bina alternatiflerin yıllık enerji tüketimleri.

Yalıtım durumuna göre toplam enerji tüketiminin karşılaştırıldığında İstanbul ilinde jeopolimer beton cephe kaplamasının yalıtımlı ve yalıtımsız durumuna bakıldığı zaman fark %4,145'tir. Diyarbakır ilinde jeopolimer beton cephe kaplamasının yalıtımlı ve yalıtımsız durumuna bakıldığı zaman fark %2,215'tir. (Şekil 4.17)



Şekil 4.17 : Yalıtım durumuna göre toplam enerji tüketiminin karşılaştırılması.

4.4.3 Isıtma enerjisi tüketimi sonucu oluşan çevresel etki değerlendirilmesi

Bilgisayar programıyla hesaplanmış yıllık enerji tüketimleri hesaplanan 8 alternatifin yıllık ısıtma tüketim miktarları bulunmuştur. Isıtma kaynağı olarak doğal gaz kullanılmıştır. Doğal gaz tüketimi başına düşen emisyon miktarı Uluslararası Enerji Ajansı (EIA) tarafından belirlenen katsayılarla çarpılarak hesaplanmıştır. Değerler Pound/billion Btu olarak verildiği için kg/ 1 kWh birimine çevrilmiştir.

Çizelge 4.7’de ısıtma enerjisi sağlamak için tüketilen kWh cinsinden emisyon katsayıları gösterilmiştir. Doğal gaz tüketimi sonucu oluşan emisyonlar karbon dioksit (CO₂), karbon monoksit (CO), nitrojen oksit (NO), sülfür dioksit (SO₂) ve partiküllerdir.

Çizelge 4.7 : 1 kWh ısıtma enerjisi için doğal gaz tüketimi başına düşen emisyon miktarı (Url-35).

Doğal gaz tüketimi kaynaklı emisyonlar	Pounds / billion Btu	Kg / 1 kWh
Karbon dioksit - CO ₂	117.000	181.127,1809
Karbon monoksit - CO	40	61,92382253
Nitrojen oksit - NO	92	142,4247918
Sülfür dioksit- SO ₂	1	1,548095563
Partiküller	7	10,83666894

Çizelge 4.8’de oluşturulmuş 8 alternatifin doğal gaz tüketimi sonucu ortaya çıkan karbon dioksit (CO₂), karbon monoksit (CO), nitrojen oksit (NO), sülfür dioksit (SO₂) ve partikül emisyon miktarları verilmiştir. Emisyonların birimi kg/kWh’tir.

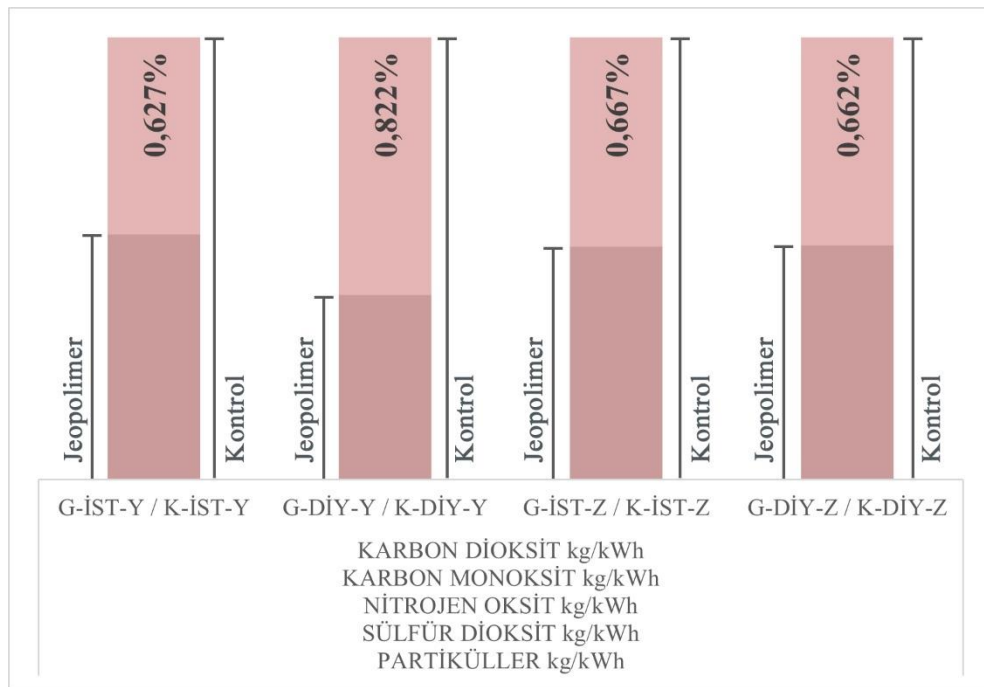
Çizelge 4.8 : Doğal gaz tüketimi sonucu ortaya çıkan emisyon miktarı.

ALTERNATİFLER	KARBON DİOKSİT kg/kWh	KARBON MONOKSİT kg/kWh	NİTROJEN OKSİT kg/kWh	SÜLFÜR DİOKSİT kg/kWh	PARTİKÜLLER kg/kWh
G-İST-Y	2.887.167.263,34	987.065,73	2.270.251,18	24.676,64	172.736,50
G-İST-Z	9.782.679.039,73	3.344.505,65	7.692.363,01	83.612,64	585.288,49
G-DİY-Y	1.101.253.259,80	376.496,84	865.942,73	9.412,42	65.886,95
G-DİY-Z	6.565.860.307,17	2.244.738,57	5.162.898,70	56.118,46	392.829,25
K-İST-Y	2.905.279.981,43	993.258,11	2.284.493,66	24.831,45	173.820,17
K-İST-Z	9.847.884.824,85	3.366.798,23	7.743.635,93	84.169,96	589.189,69
K-DİY-Y	1.110.309.618,84	379.593,03	873.063,97	9.489,83	66.428,78
K-DİY-Z	6.609.330.830,58	2.259.600,28	5.197.080,65	56.490,01	395.430,05

Isıtma enerjisi miktarını her alternatifin referansına göre düşüren jeopolimer katmanlaşması, oluşan emisyonların hepsinde referans grubuna göre atmosfere daha az emisyon salmıştır.

Doğal gaz kullanımı sonucu atmosfere salınan karbon dioksit (CO₂), karbon monoksit (CO), nitrojen oksit (NO), sülfür dioksit (SO₂) ve partikül emisyonu miktarı azdan çoğa doğru sırasıyla; G-DİY-Y, K-DİY-Y, G-İST-Y, K-İST-Y, G-DİY-Z, K-DİY-Z, G-İST-Z ve K-İST-Z'dir. Doğal gaz tüketimi en az olan G-DİY-Y alternatifi en düşük emisyon salınımı yapan alternatif olmuştur. Jeopolimer beton cephe kaplaması olan alternatifler kontrol gruplarına göre daha az emisyon oluşumuna sahiptirler. Emisyon miktarlarının sütun grafikleri Eklerde bulunan Şekil A.4.1–A.4.2–A.4.3–A.4.4–A.4.5'de verilmiştir.

Şekil 4.18'de oluşturulan 4 tane ikili grubun yıllık emisyon miktarları gösterilmiştir. G-İST-Y katmanlaşması %0,627, G-DİY-Y katmanlaşması %0,822, G-İST-Z katmanlaşması %0,667 ve G-DİY-Z katmanlaşması %0,662 oranında kontrol katmanlaşmasından daha az emisyon oluşturmıştır. Diyarbakır'da jeopolimer katmanlaşması en yüksek emisyon azalımı sağlamıştır. Jeopolimer İstanbul katmanlaşması yalıtımlı, jeopolimer İstanbul yalıtımsız ve jeopolimer Diyarbakır yalıtımsız alternatiflerinde birbirine yakın %0,627 - %0,667 oranında düşüşler görülmüştür.



Şekil 4.18 : Alternatiflerin cephe kaplamalarına göre yıllık emisyon kıyaslaması.

CML karakterizasyon kısmında da bahsedildiği gibi oluşan emisyonlar, etki yöntemine göre değişen karakterizasyon faktörleriyle çarpılarak çevresel etki değerleri hesaplanmaktadır. Tez kapsamında doğal gaz kaynaklı tüketim 3 adet çevresel etkiye neden olduğu için hesaplamalar bu başlıklar altında incelenmiştir. Bunlar; Küresel Isınma Potansiyeli (GWP - birimi: kg.CO₂.eq), Asitleşme Potansiyeli (AP - birimi: kg.SO₂.eq) ve Ötrofikasyon Potansiyeli (EP - birimi: kg.PO₄.eq)'dir.(Çizelge 4.9)

Çizelge 4.9 : Doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların 1kWh başına düşen çevresel etki katsayıları (CML, 2008).

Doğal gaz tüketimi kaynaklı çevresel etki	Kg / 1 kWh	Katsayı
Küresel Isınma Potansiyeli	Karbon dioksit	1
Asitleşme Potansiyeli	Nitrojen oksit	0,5
	Sülfür dioksit	1,2
Ötrofikasyon Potansiyeli	Nitrojen oksit	0,13

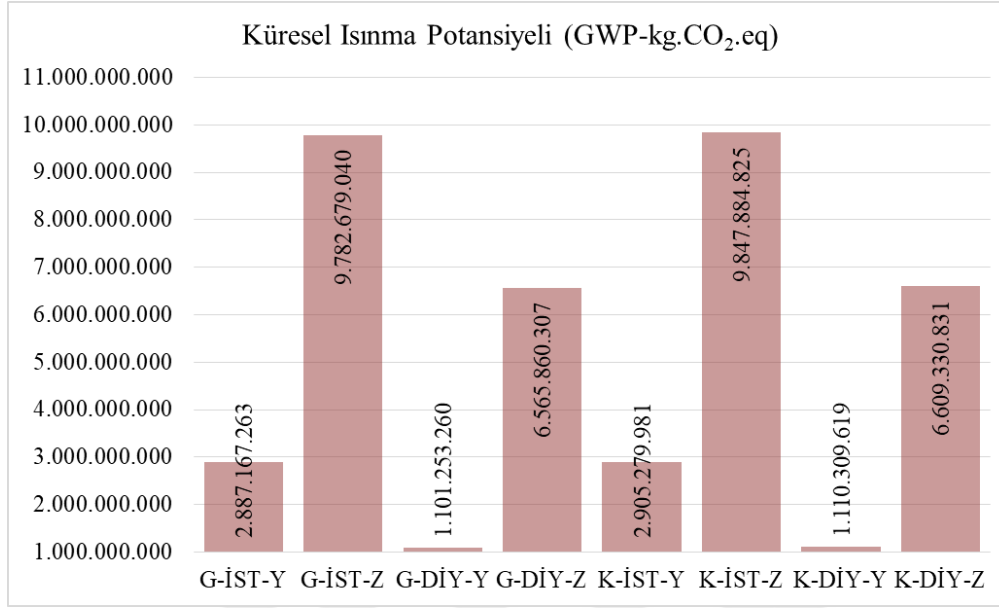
8 alternatifin emisyon miktarı hesapları ve hesapların sonucu alınarak hesaplanmış çevresel etki hesap çizelgeleri eklerde bulunan Çizelge A.4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.10'da oluşturulmuş alternatiflerin tamamı için hesaplanmış çevre etkileri hesaplarının sonuçları bulunmaktadır.

Daha önce de bahsedildiği gibi jeopolimer katmanlaşmasına sahip katmanlaşma ısıtma için kullanılan enerji tüketimini düşürdüğü için jeopolimer katmanlaşmasına sahip alternatifler kontrol alternatiflerine göre daha az çevresel emisyonu sahiptir. Jeopolimer beton fiziksel ve mekanik yeterliliği beton cephe kaplamasına denk sayılabileceği gibi özellikleri daha iyidir. Toplam yıllık enerji tüketimi 4 karşılaştırmalı alternatifin 3'ünde iyi olan ve ısıtma enerjisinden kaynaklı emisyon üretimi tüm referans alternatiflerinden iyi olan jeopolimer beton cephe kaplaması geliştirilmiş bir ürün olarak beton cephe kaplaması yerine geçme potansiyeline sahiptir. Aşağıda bahsedilen emisyon kıyaslamalarında jeopolimer katmanlaşma alternatifleri kontrol grubuna göre her zaman daha düşük sonuç vermiştir. En yüksek toplam enerji tüketimine sahip G-DİY-Y alternatifi yıllık ısıtma enerjisi tüketiminde de en az tüketime sahip alternatif olduğu için çevresel etkisi en az alternatiftir.

Çizelge 4.10 : Alternatiflerin doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu çevresel etkiler.

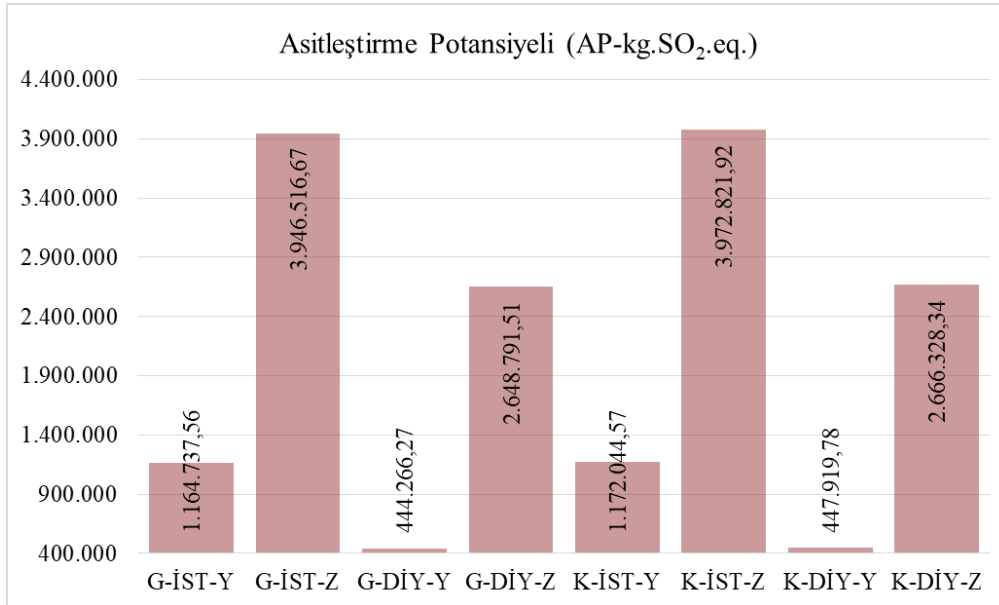
ALTERNATİFLER	Küresel Isınma Potansiyeli (GWP-kg.CO ₂ .eq)	Asitleştirme Potansiyeli (AP-kg.SO ₂ .eq.)	Ötrofikasyon Potansiyeli (EP- kg.PO ₄ .eq.)
G-İST-Y	2.887.167.263,34	1.164.737,56	295.132,65
G-İST-Z	9.782.679.039,73	3.946.516,67	1.000.007,19
G-DİY-Y	1.101.253.259,80	444.266,27	112.572,56
G-DİY-Z	6.565.860.307,17	2.648.791,51	671.176,83
K-İST-Y	2.905.279.981,43	1.172.044,57	296.984,18
K-İST-Z	9.847.884.824,85	3.972.821,92	1.006.672,67
K-DİY-Y	1.110.309.618,84	447.919,78	113.498,32
K-DİY-Z	6.609.330.830,58	2.666.328,34	675.620,48

Alternatiflerin doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu küresel ısınma potansiyeli azdan çoğa doğru sırasıyla; G-DİY-Y, K-DİY-Y, G-İST-Y, K-İST-Y, G-DİY-Z, K-DİY-Z, G-İST-Z ve K-İST-Z'dir. (Şekil 4.19)



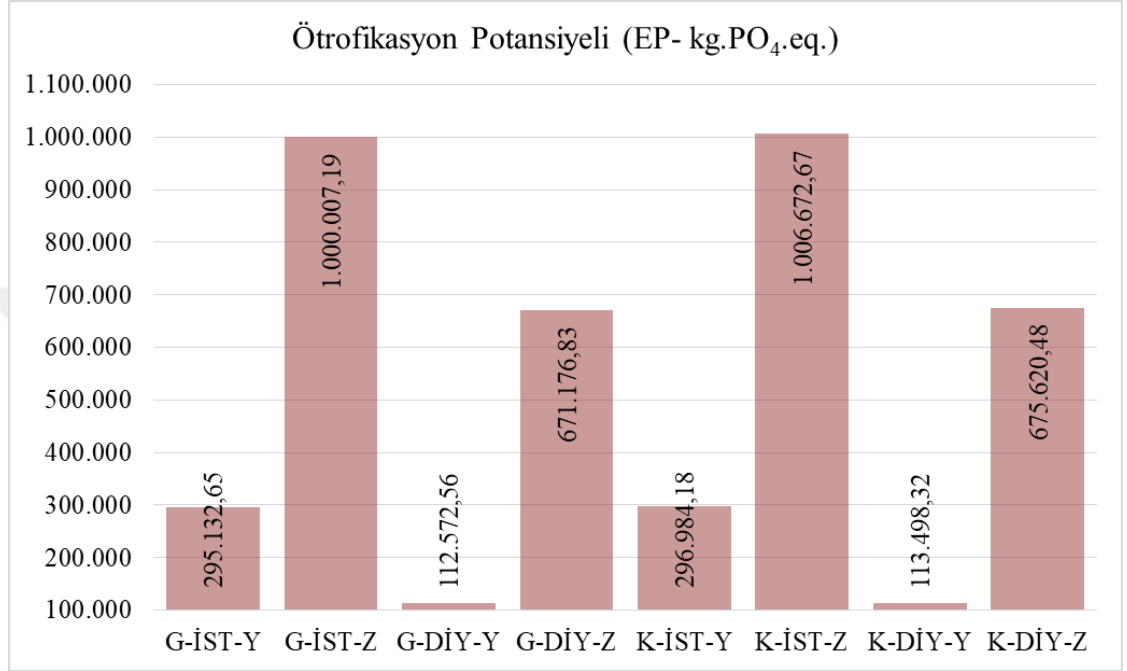
Şekil 4.19 : Alternatiflerin doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu küresel ısınma potansiyeli.

Alternatiflerin doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu asitleşme potansiyeli azdan çoğa doğru sırasıyla; G-DİY-Y, K-DİY-Y, G-İST-Y, K-İST-Y, G-DİY-Z, K-DİY-Z, G-İST-Z ve K-İST-Z'dir. (Şekil 4.20)



Şekil 4.20 : Alternatiflerin doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu asitleşme potansiyeli.

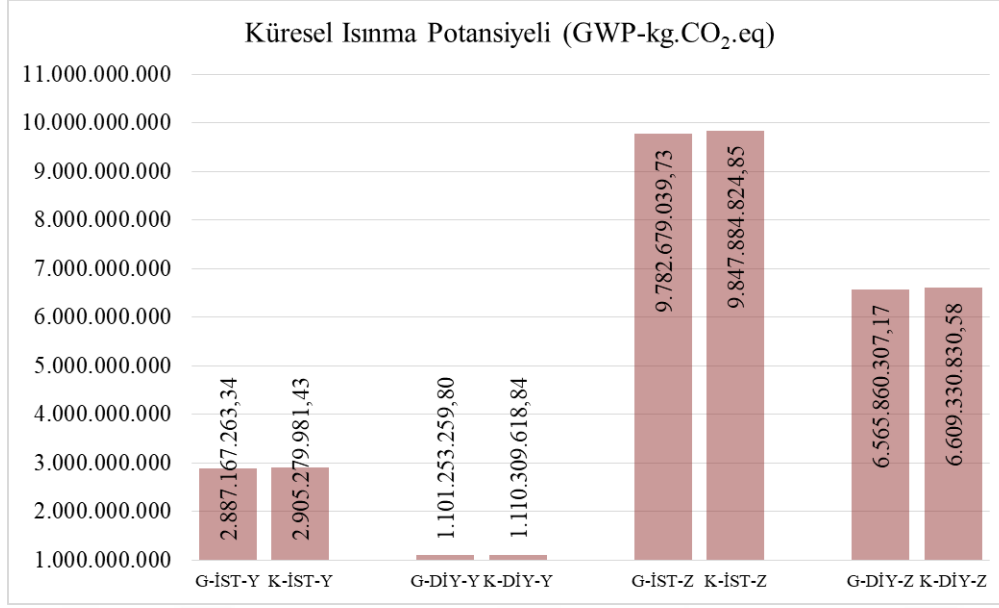
Alternatiflerin doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu ötrofikasyon potansiyeli azdan çoğa doğru sırasıyla; G-DİY-Y, K-DİY-Y, G-İST-Y, K-İST-Y, G-DİY-Z, K-DİY-Z, G-İST-Z ve K-İST-Z'dir. (Şekil 4.21)



Şekil 4.21 : Alternatiflerin doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu ötrofikasyon potansiyeli.

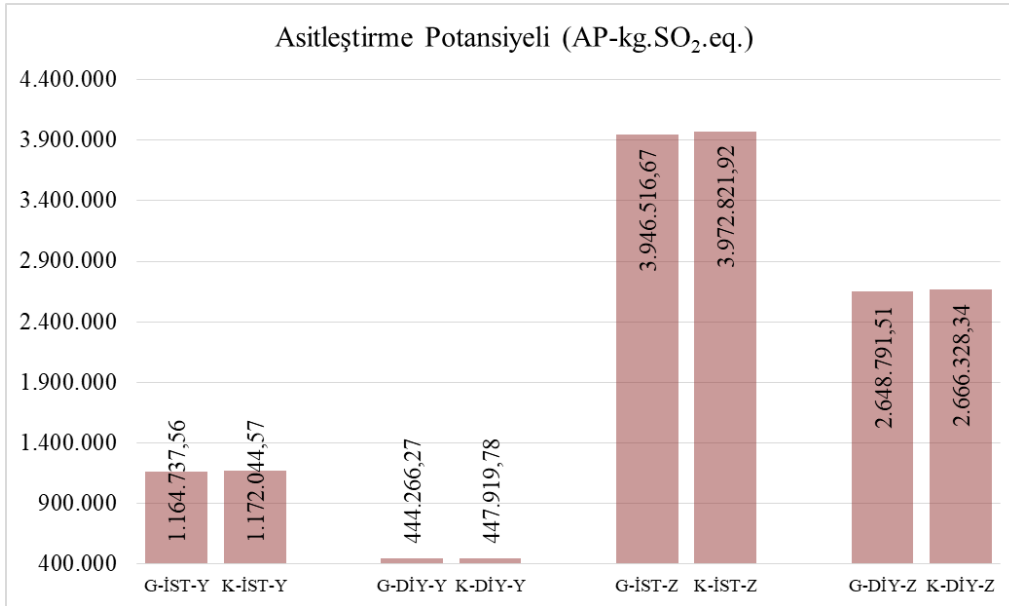
Kaplama Ürününe Göre Bina Alternatiflerinin Çevresel Etkilerinin Karşılaştırılması

Kaplama ürününün değişimine göre oluşan çevresel etkiler Şekil 4.22- 4.23 -4.24'de karşılaştırılmıştır. Çizelge 10.4'e bakıldığı zaman jeopolimer alternatifler her zaman en düşük çevresel etkiye sahiptir. Kontrol katmanlaşmasıyla kıyaslandığı zaman oluşan küresel ısınma potansiyeli en düşük fark G-DİY-Y ve K-DİY-Y alternatifleri arasında 9.056.359,04 kgCO₂.eq'dir. Bu iki alternatif arasındaki %0,822 fark kullanılan ürünle birlikte en yüksek küresel ısınma potansiyeli düşüştür. En yüksek fark G-İST-Z ve K-İST-Z alternatifleri arasında 65.205.785,12 kgCO₂.eq'dir. İki alternatif arasında %0,667 oranında küresel ısınma potansiyeli düşüşü yaşanmıştır.



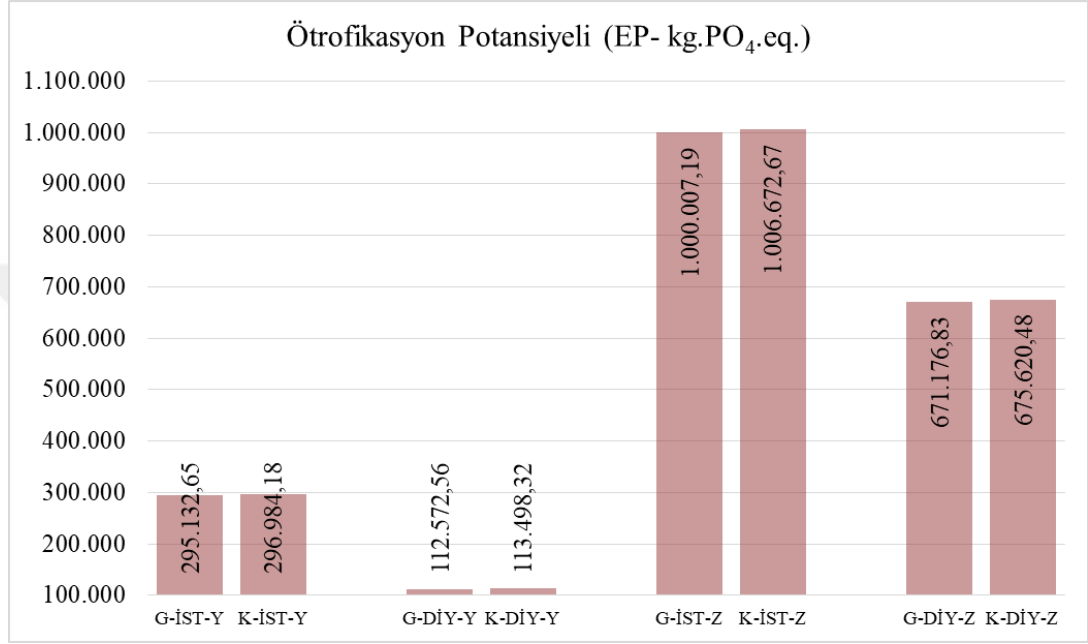
Şekil 4.22 : Kaplama ürününe göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu küresel ısınma potansiyeli.

Jeopolimer katmanlaşması referans grubu kontrol katmanlaşmasıyla kıyaslandığı zaman oluşan asitleşme potansiyeli en düşük fark G-DİY-Y ve K-DİY-Y alternatifleri arasında 3.653,51 kgSO₂.eq'dir. Bu iki alternatif arasındaki %0,822 fark kullanılan ürünle birlikte en yüksek asitleşme potansiyeli düşüştür. En yüksek fark G-İST-Z ve K-İST-Z alternatifleri arasında 26.305,25 kgSO₂.eq'dir. İki alternatif arasında %0,667 oranında asitleşme potansiyeli düşüşü yaşanmıştır.



Şekil 4.23 : Kaplama ürününe göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu asitleşme potansiyeli.

Jeopolimer katmanlaşması referans grubu kontrol katmanlaşmasıyla kıyaslandığı zaman oluşan ötrofikasyon potansiyeli en düşük fark G-DİY-Y ve K-DİY-Y alternatifleri arasında 925,76 kgPO₄.eq'dir. Bu iki alternatif arasındaki %0,822 fark kullanılan ürünle birlikte en yüksek ötrofikasyon potansiyeli düşüştür. En yüksek fark G-İST-Z ve K-İST-Z alternatifleri arasında 6.665,48 kgPO₄.eq'dir. İki alternatif arasında %0,667 oranında ötrofikasyon potansiyeli düşüşü yaşanmıştır.



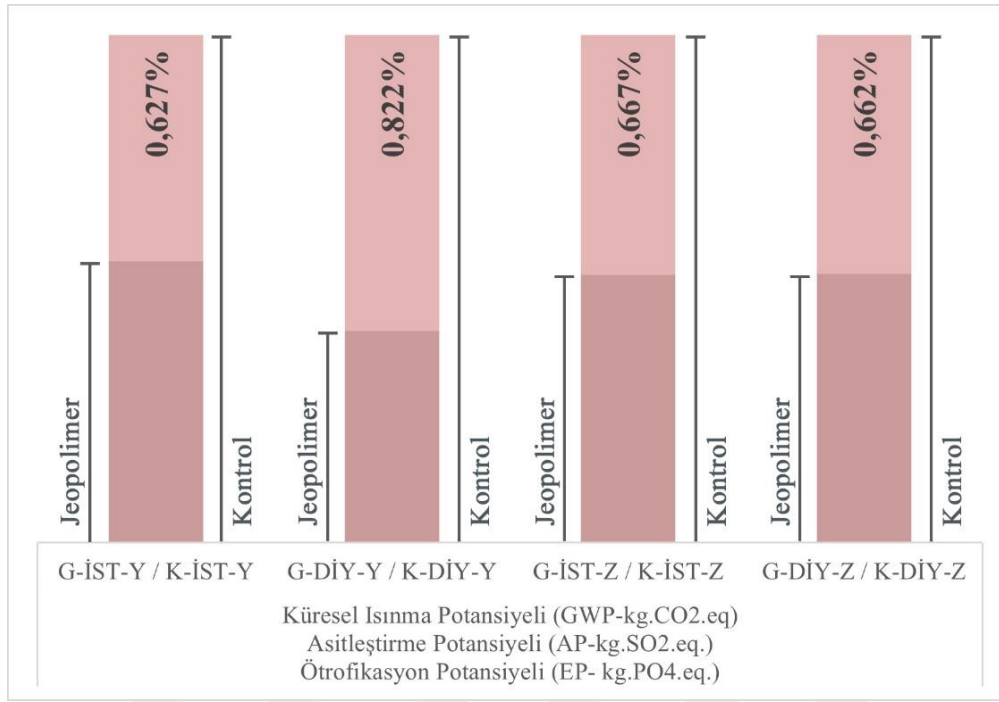
Şekil 4.24 : Kaplama ürününe göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu ötrofikasyon potansiyeli.

Kaplama ürününe göre çevresel etki değişimleri %0,627 ile %0,822 arasındadır. İstanbul'da yalıtımlı bir ofis binasında jeopolimer beton cephe kaplaması kullanılması yıllık küresel ısınma, asitleşme ve ötrofikasyon potansiyellerini %0,627 düşürmektedir. (Şekil 4.25)

Diyarbakır'da yalıtımlı bir ofis binasında jeopolimer beton cephe kaplaması kullanılması yıllık küresel ısınma, asitleşme ve ötrofikasyon potansiyellerini %0,822 düşürmektedir.

İstanbul'da yalıtımsız bir ofis binasında jeopolimer beton cephe kaplaması kullanılması yıllık küresel ısınma, asitleşme ve ötrofikasyon potansiyellerini %0,667 düşürmektedir.

Diyarbakır'da yalıtımsız bir ofis binasında jeopolimer beton cephe kaplaması kullanılması yıllık küresel ısınma, asitleşme ve ötrofikasyon potansiyellerini %0,662 düşürmektedir.

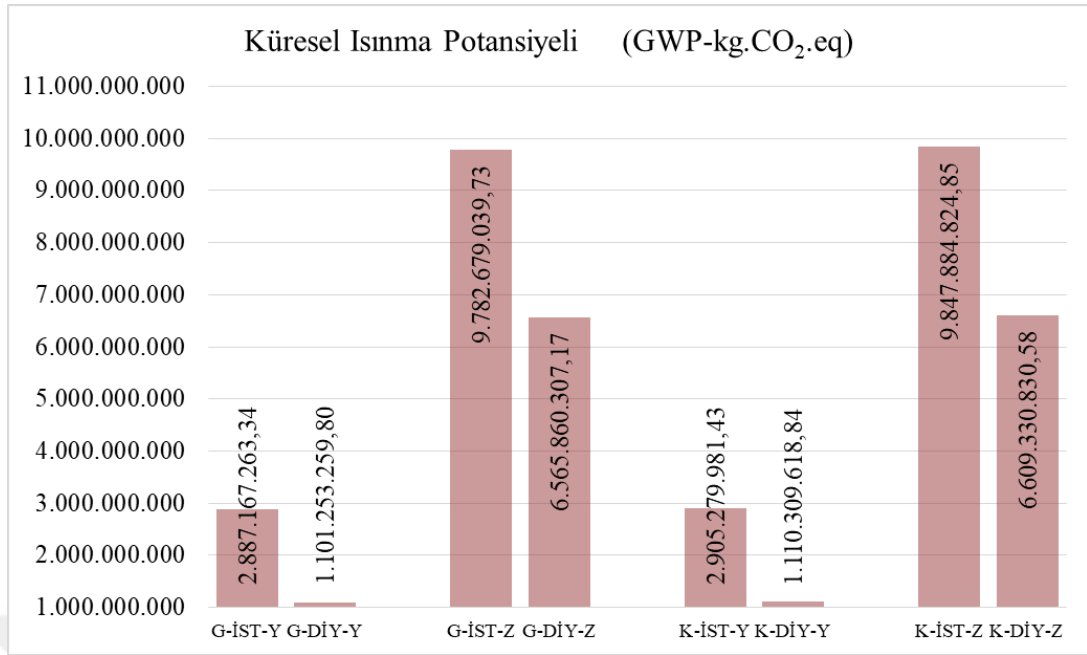


Şekil 4.25 : Kaplama ürününe göre çevresel etki değişim yüzdesi.

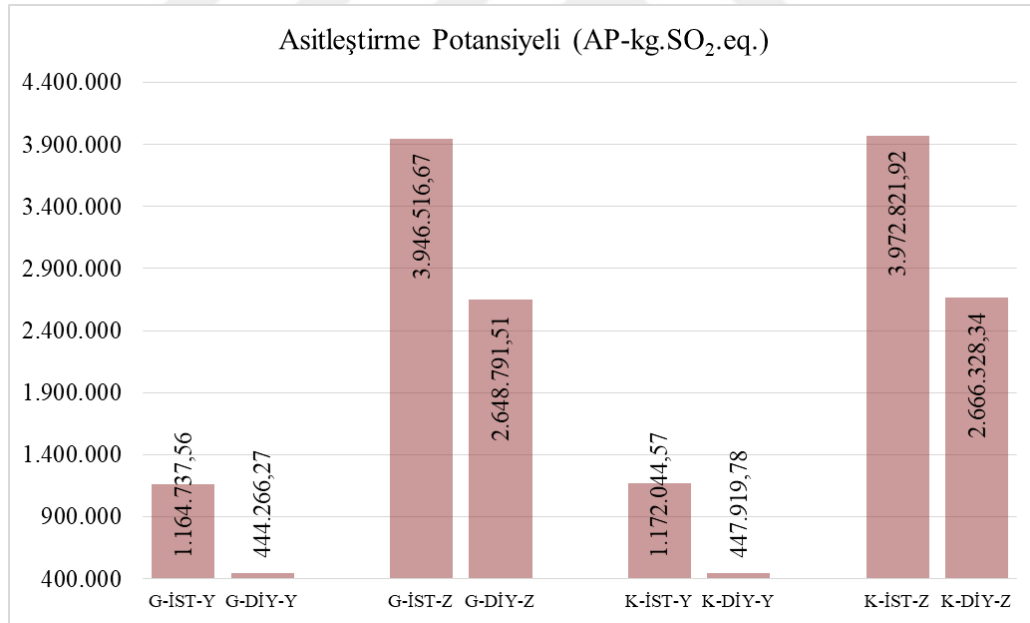
Şehre Göre Bina Alternatiflerinin Çevresel Etkilerinin Karşılaştırılması

Şehre göre doğal gaz tüketimi sonucu oluşan çevresel etkiler şekil 4.26-4.27-4.28’de karşılaştırılmıştır. Çizelge 10.4’e bakıldığı zaman jeopolimer alternatifler her zaman en düşük çevresel etkiye sahiptir. Geopolimerler kendi içerilerinde Diyarbakır ilinde daha az etkiye sebep olmuştur. Bunun nedeni şehrin sıcak-kuru bir iklime sahip olması olarak düşünülmektedir. Kontrol katmanlaşmasıyla kıyaslandığı zaman oluşan küresel ısınma potansiyeli en düşük fark G-İST-Y ve G-DİY-Y alternatifleri arasında 1.785.914.003,54 kgCO₂.eq’dır. G-DİY-Y alternatifi G-İST-Y alternatifinden %162,171 daha az küresel ısınma potansiyeline sahiptir. En yüksek fark K-İST-Z ve K-DİY-Z alternatifleri arasında 3.238.553.994,27 kgCO₂.eq’dır. K-DİY-Z alternatifi K-İST-Z alternatifinden %49 daha az küresel ısınma potansiyeline sahiptir.

Jeopolimer katmanlaşması şehre göre referans grubuyla kıyaslandığı zaman oluşan asitleşme potansiyeli en düşük fark G-İST-Y ve G-DİY-Y alternatifleri arasında 720.471,29 kgSO₂.eq’dır. G-DİY-Y alternatifi G-İST-Y alternatifinden %162,171 daha az asitleşme potansiyeline sahiptir. En yüksek fark K-İST-Z ve K-DİY-Z alternatifleri arasında 1.306.493,58 kgSO₂.eq’dır. K-DİY-Z alternatifi K-İST-Z alternatifinden %49 daha az asitleşme potansiyeline sahiptir.



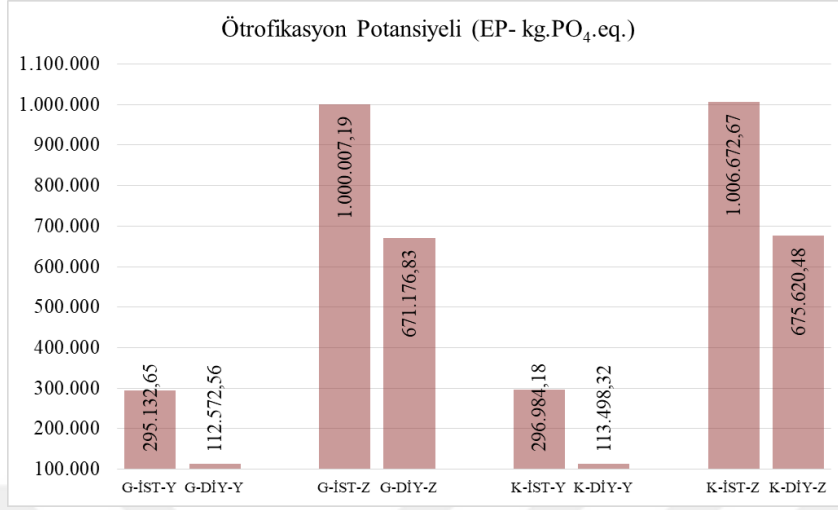
Şekil 4.26 : Şehre göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu küresel ısınma potansiyeli.



Şekil 4.27 : Şehre göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu asitleşme potansiyeli.

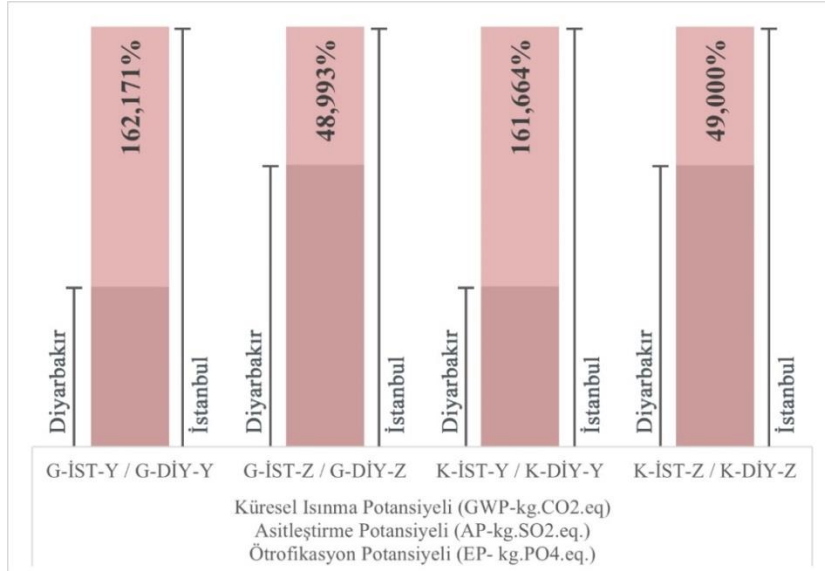
Jeopolimer katmanlaşması şehre göre referans grubuyla kıyaslandığı zaman oluşan ötrofikasyon potansiyeli en düşük fark G-İST-Y ve G-DİY-Y alternatifleri arasında 182.560,09 kgPO₄.eq'dir. G-DİY-Y alternatifi G-İST-Y alternatifinden %162,171 daha az ötrofikasyon potansiyeline sahiptir. En yüksek fark K-İST-Z ve K-DİY-Z

alternatifleri arasında 331.052,19 kgPO₄.eq'dir. K-DİY-Z alternatifi K-İST-Z alternatifinden %49 daha az ötrofikasyon potansiyeline sahiptir.



Şekil 4.28 : Şehre göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu ötrofikasyon potansiyeli.

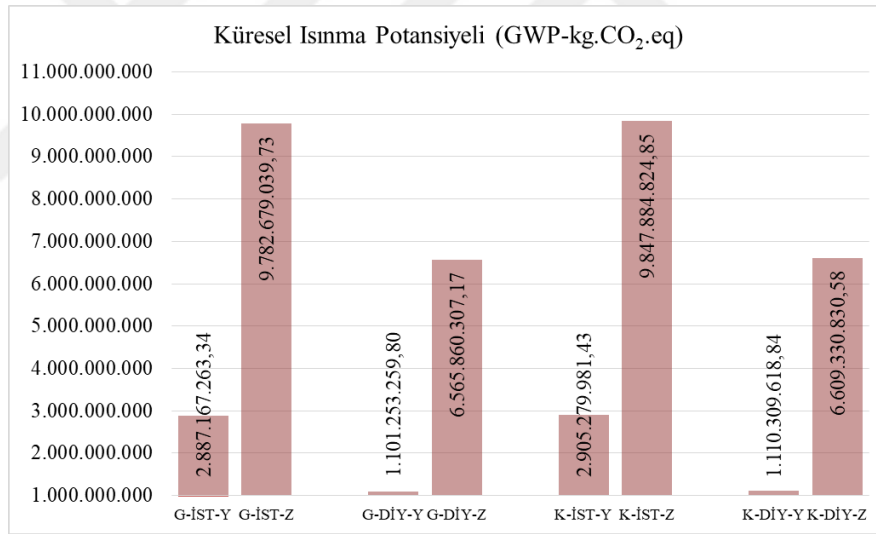
Şehre göre çevresel etki değişimleri %48,993 ile %162,171 arasındadır. Diyarbakır'da yalıtımlı bir ofis binasında jeopolimer beton cephe kaplaması kullanılması İstanbul'a göre %162,171 oranında yıllık küresel ısınma, asitleşme ve ötrofikasyon potansiyellerini düşürmüştür. (Şekil 4.29)



Şekil 4.29 : Şehre göre çevresel etki değişim yüzdesi.

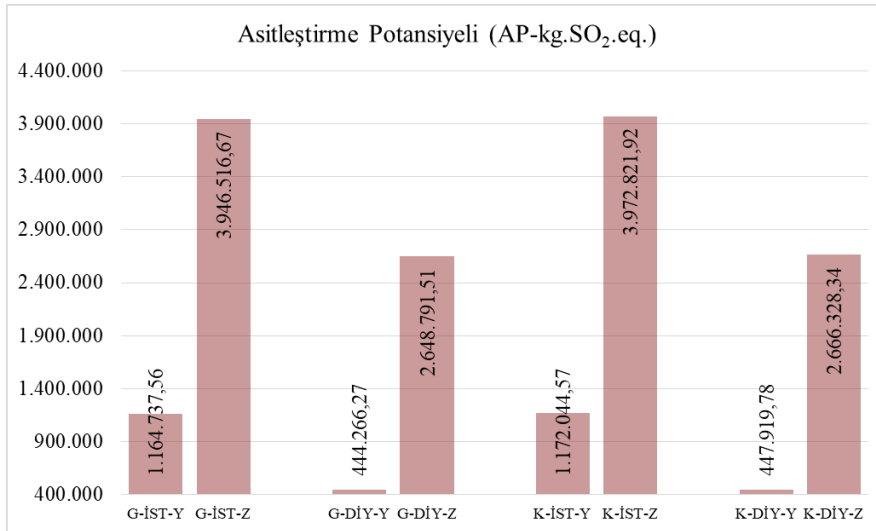
Yalıtıma Göre Bina Alternatiflerinin Çevresel Etkilerinin Karşılaştırılması

Yalıtıma göre doğal gaz tüketimi sonucu oluşan çevresel etkiler Şekil 4.30-4.31-4.32’de karşılaştırılmıştır. Yalıtımlı alternatifler TSE 825’e de göre U değerleri sağlaması gereken aralıkta olan örneklerken yalıtımsızlarda bu değer şartı sağlanmadığı için sonuçların birbirinden çok farklı çıkması beklenen bir sonuçtur. Yalıtımlı alternatifler yalıtımsız alternatiflere göre daha iyi çıkmıştır. Jeopolimer yalıtımlı alternatifler de kontrol gruplarına göre iyi çıkmıştır. Yalıtım durumuna göre jeopolimer alternatifler kontrol katmanlaşmasıyla kıyaslandığı zaman oluşan küresel ısıma potansiyeli en düşük fark G-Dİ-Y ve G-Dİ-Y-Z alternatifleri arasında 5.464.607.047,37 kgCO₂.eq’dir. G-Dİ-Y-Z alternatifi G-Dİ-Y alternatifinin %496,217 oranında daha fazla küresel ısınma potansiyeline sahiptir. En yüksek fark K-İST-Z ve K-İST-Y alternatifleri arasında 6.942.604.843,42 kgCO₂.eq’dir. K-İST-Z alternatifi K-İST-Y alternatifinden %238,965 oranında daha fazla küresel ısınma potansiyeline sahiptir.



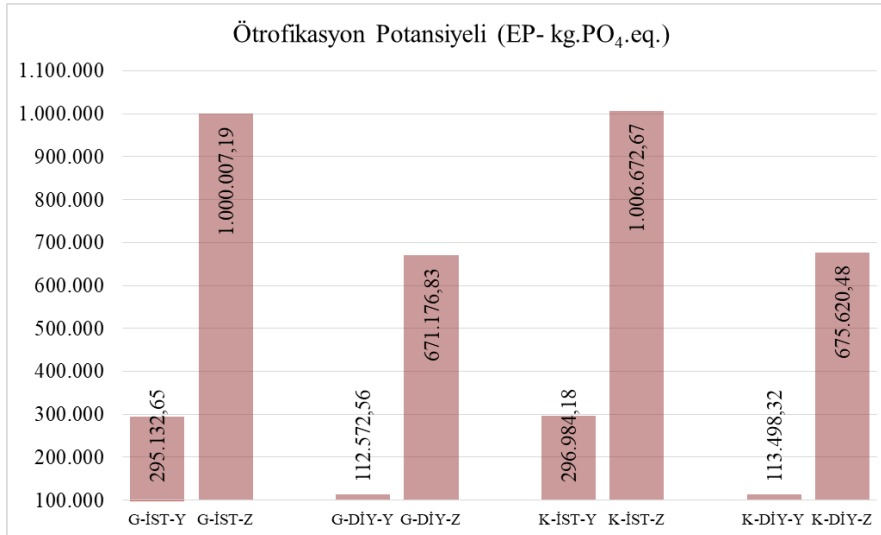
Şekil 4.30 : Yalıtıma göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu küresel ısınma potansiyeli.

Jeopolimer katmanlaşması yalıtım durumuna göre referans grubuyla kıyaslandığı zaman oluşan asitleşme potansiyeli en düşük fark G-Dİ-Y ve G-Dİ-Y-Z alternatifleri arasında 2.204.525,24 kgSO₂.eq’dir. G-Dİ-Y-Z alternatifi G-Dİ-Y alternatifinden %496,217 oranında daha fazla asitleşme potansiyeline sahiptir. En yüksek fark K-İST-Z ve K-İST-Y alternatifleri arasında 2.800.777,35 kgSO₂.eq’dir. K-İST-Z alternatifi K-İST-Y alternatifinden %238,965 oranında daha fazla asitleşme potansiyeline sahiptir.



Şekil 4.31 : Yalıtıma göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu asitleşme potansiyeli.

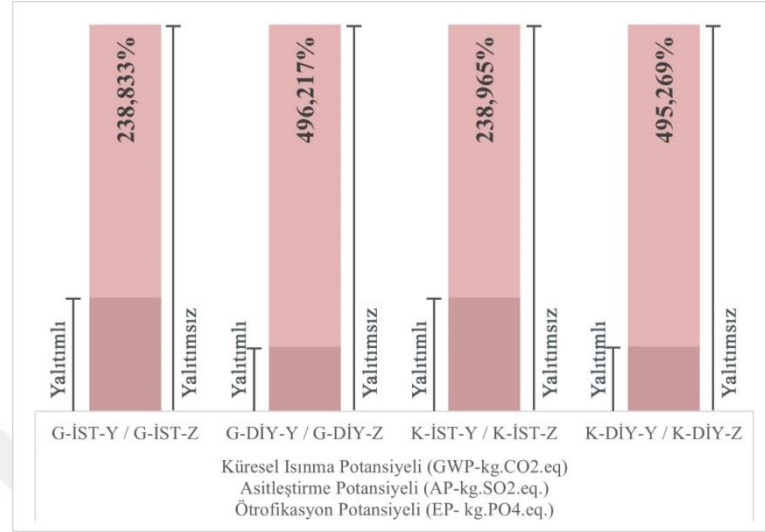
Jeopolimer katmanlaşması yalıtım durumuna göre referans grubuyla kıyaslandığı zaman oluşan ötrofikasyon potansiyeli en düşük fark G-DİY-Y ve G-DİY-Z alternatifleri arasında 558.604,27 kgPO₄.eq'dir. G-DİY-Z alternatifi G-DİY-Y alternatifinden %496,217 oranında daha fazla ötrofikasyon potansiyeline sahiptir. En yüksek fark K-İST-Z ve K-İST-Y alternatifleri arasında 709.688,49 kgPO₄.eq'dir. K-İST-Z alternatifi K-İST-Y alternatifinden %238,965 oranında daha fazla ötrofikasyon potansiyeline sahiptir.



Şekil 4.32 : Yalıtıma göre doğal gaz kullanımı sonucu oluşan emisyonların neden olduğu ötrofikasyon potansiyeli.

İstanbul'da jeopolimer cephe kaplaması olan yalıtımlı bir ofis binası yalıtımsız alternatifine göre %238,833 daha az küresel ısınma, asitleşme ve ötrofikasyon potansiyeline sahiptir.

Diyarbakır'da jeopolimer cephe kaplaması olan yalıtımlı bir ofis binası yalıtımsız alternatifine göre %496,217 daha az küresel ısınma, asitleşme ve ötrofikasyon potansiyeline sahiptir. (Şekil 4.33)



Şekil 4.33 : Yalıtıma göre çevresel etki değişim yüzdesi.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yenilikçi ve üçüncü nesil bağlayıcı olduğu düşünülen gömülü enerjisi düşük jeopolimer beton, konvansiyonel beton yerine geçebilir olduğu öngörüldüğü için gerçekleştirilen bu çalışmada, iki yapı ürününün cephe malzemesi olarak kullanıldığı varsayımsal bina modellerinde, cephe ürünü değişiminin yıllık enerji yükleri ve doğal gaz kaynaklı yıllık çevresel etkiler üzerindeki etkisi benzetim yöntemiyle araştırılmıştır.

Seri üretimi olmayan ve özel üretim şeklinde üretilerek müşteriye sunulan jeopolimer beton piyasada yaygın olarak kullanılsa da yapı sektörüne çıkmış bir malzemedir. Kullanım potansiyeli fazla olan jeopolimer beton hakkında laboratuvar çalışmaları devam etmektedir. Müşteri isteğine göre özel hazırlanan içeriğe sahiptir. Henüz standartları oluşturulmamış olan bu ürün hakkında 343 çalışma derlenerek malzemenin birim hacim ağırlık, ısı iletkenlik, öz ısı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme, tuz ve asitlere karşı davranışı, yüksek sıcaklık dayanımı ve donma-çözülme deneylerindeki davranışı gibi özellikleri tayin edilmiştir. Buna göre;

- Çoğunluğu hafif beton özelliğinde çıkan sonuçların büyük bir kısmı da normal beton aralığında çıkmıştır. Sonuçlardan görüldüğü üzere jeopolimer beton, kullanılmak istendiği yere göre -hafif beton veya taşıyıcı beton-karışım tasarımı yapılabilir.
- Literatürde 0,24-0,3 W/mK civarında (Swanepoel ve Strydom, 2002) verilen ısı iletkenlik derlenen çalışmalarda ortalama 0,49 W/mK değerinde çıkmıştır. Piyasada bulunan hafif betonların ısı iletkenlikleri 0,87 W/mK'dır (Url-27). Piyasadaki betonların ısı iletkenlik değerine göre jeopolimer beton düşük ısı iletkenlik değerine sahiptir.
- Çalışmalardaki öz ısı değerlerinin ortalaması 1.139 J/kg-K'dır. Betondan yüksek olan bu değer jeopolimer betonun ısı yalıtım kapasitesinin yüksek olduğunu göstermektedir.

- Jeopolimer betonda deney sonuçlarına bakıldığında 2,98 km/sn ses geçişi vardır. Mikro gözenekli yapısından dolayı betona göre daha düşük ses geçişine sahip olduğu düşünülmektedir.
- 1,0 - 120,0 MPa arasında büyük bir farka sahip basınç dayanımı sonuçları 15,01 - 45,0 MPa arasında kümelenme yapmıştır. Bu aralıktaki betonlar düşey ve yatay kaplama için yeterli dayanıma sahip olduğu gibi taşıyıcı olarak da kullanılabilir.
- Eğilme dayanımları 4,01 - 8,0 MPa arasında çıkmıştır.
- Su emme eğilimi ağırlıklı olarak %10'dan az çıkmıştır.
- Yüksek sıcaklıklara karşı basınç dayanımı düşüşü %50 ile %100 arasında değişmektedir. Bazı örneklerde yüksek sıcaklıklar jeopolimer betonun basınç dayanımını arttırmıştır. Yüksek sıcaklığın ağırlığa etkisi 800°C kadar %40'a veren düşüş yaşarken 1000°C'de %91,71 oranındadır.
- HCl ve H₂SO₄ asitlerine ve Na₂SO₄ ve MgSO₄ tuzlarına karşı jeopolimer betonun davranışı deneylerin azlığı ve farklılıklarından dolayı yorumlanamamıştır.
- Donma-Çözünme deneylerinde en fazla basınç dayanımı kaybı %34,02'dir. Sonuçlar ortalama %5 - %15 aralığındadır.

Tayin edilen özelliklerden yararlanılarak jeopolimer beton cephe kaplama ürünü özellikleri belirlenmiştir ve benzetim yöntemi için modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan varsayımsal bina modelleri; cephe kaplaması, bulunduğu şehir ve yalıtım durumu olmak üzere 3 farklı parametre değiştirilerek gözlemlenmiştir. Buna göre;

- U değeri düşük, yalıtım özelliği beton cephe kaplamasından yüksek jeopolimer beton cephe kaplaması tüm alternatiflerde ısıtma tüketimini azaltmıştır. Bununla beraber, yalıtım özelliği artan kabuk soğutma yüklerini göz ardı edilecek düzeyde arttırmış. Ancak, G-Dİ-Y ismiyle geçen Diyarbakır- yalıtımlı jeopolimer alternatif dışındaki alternatiflerde toplam enerji tüketimi kontrol grubunun altında kalmıştır. Sonuçlar, ilk somutlaşma enerjisi daha düşük olan jeopolimerin beton cephe kaplaması yerine kullanılabilirliğini destekler durumdadır.

- Toplam enerji tüketimleri verilen jeopolimer ve kontrol katmanlaşmaları karşılaştırılmıştır. G-DİY-Y alternatifi K-İST-Y'ye göre %0,008 daha fazla enerji harcamıştır. Diğer sonuçlarda %0,004 - %0,040 oranında jeopolimer katmanlaşmalarında toplam enerjide düşüş yaşanmıştır. Değişim oranları kayda değer değildir fakat jeopolimer beton cephe kaplamasının oluşum enerjisi beton cephe kaplamasından daha düşük olduğu için tercih edilmelidir. Ayrıca düşük değişim oranları logaritmik bir şekilde çevresel etkiyi etkilemektedir.
- Jeopolimer beton kullanılan örneklerinde ısıtma ihtiyacını düşürken soğutma yüklerini göz ardı edilecek düzeyde arttırdığı gözlemlenmiştir. Sıcak-Kuru iklim bölgesini temsil eden Diyarbakır için yalıtım özelliği bulunan jeopolimer kaplama uygulamalarında yapı elemanındaki yalıtım katmanının azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.
- Diyarbakır alternatifleri sonuçlarında yalıtımlı yalıtımsız örnekler incelendiği zaman Diyarbakır'da ısıtma yükünün soğutma yüküne göre daha büyük oranda değiştiği görülmüştür. Diyarbakır'da ısıtma yükü soğutma yükünden daha önemlidir.
- Jeopolimer kaplamanın oluşturulan katmanlaşmalar arasında ılımlı-nemli iklimde daha iyi performans sağladığı görülmüştür.
- Kaplama farklılaşması %0,627 - %0,822 arasında gaz kullanımını düşürmüştür. %0,017 - %0,36 oranında soğutma yükünü arttırmıştır.
- Isıtma enerjisi miktarını her alternatifin referansına göre düşüren jeopolimer katmanlaşması, oluşan emisyonların hepsinde referans grubuna göre atmosfere daha az emisyon salmıştır.
- Modellerin yıllık karbon dioksit, karbon monoksit, nitrojen oksit, sülfür dioksit ve partikül emisyonları incelenmiştir. G-İST-Y katmanlaşması %0,627 oranında kontrol grubuna göre en az emisyon miktarı azalan modeldir. G-DİY-Y katmanlaşması %0,822 oranında kontrol grubuna göre en fazla emisyon miktarı azalan modeldir.

- Jeopolimer alternatifler her zaman en düşük çevresel etkiye (küresel ısınma, asitleşme ve ötrofikasyon) sahiptir. Kaplama ürününe göre çevresel etki değişimleri %0,627 ile %0,822 arasındadır.
- En yüksek toplam enerji tüketimine sahip G-DİY-Y alternatifi yıllık ısıtma enerjisi tüketiminde de en az tüketime sahip alternatif olduğu için çevresel etkisi en az alternatiftir.
- Kaplama ürününe göre çevresel etki değişimleri %0,627 ile %0,822 arasındadır. İstanbul'da yalıtımlı bir ofis binasında jeopolimer beton cephe kaplaması kullanılması yıllık küresel ısınma, asitleşme ve ötrofikasyon potansiyellerini %0,627 düşürmektedir.
- Diyarbakır'da yalıtımlı bir ofis binasında jeopolimer beton cephe kaplaması kullanılması yıllık küresel ısınma, asitleşme ve ötrofikasyon potansiyellerini %0,822 düşürmektedir.
- Şehre göre çevresel etki değişimleri %48,993 ile %162,171 arasındadır. Diyarbakır'da yalıtımlı bir ofis binasında jeopolimer beton cephe kaplaması kullanılması İstanbul'a göre %162,171 oranında yıllık küresel ısınma, asitleşme ve ötrofikasyon potansiyellerini düşürmüştür.
- İstanbul'da jeopolimer cephe kaplaması olan yalıtımlı bir ofis binası yalıtımsız alternatifine göre %238,833 daha az küresel ısınma, asitleşme ve ötrofikasyon potansiyeline sahiptir.
- Diyarbakır'da jeopolimer cephe kaplaması olan yalıtımlı bir ofis binası yalıtımsız alternatifine göre %496,217 daha az küresel ısınma, asitleşme ve ötrofikasyon potansiyeline sahiptir.

İçeriğinde çimento yerine puzolan kullanan ve yapay puzolan olarak atık küllerin kullanılmasıyla oluşturulan jeopolimer betonlar yapılan araştırmalarda fiziksel, mekanik, dayanıklılık, termal ve akustik deneylerde betondan beklenen performansı sağlamış ve daha iyi performans göstermiştir. Göstermiş olduğu performansa bakılarak yapı ürünü ve malzemesi olarak kullanılabilir fakat her yapı elemanı için bu durum teker teker test edilmeli, şartnameler ve standartlara bağlı kalınarak detaylıca değerlendirilmeli ve araştırılmalıdır.

Tez kapsamında jeopolimer beton cephe ürünü kullanılan bir ofis binasıyla, kontrol grubu bir ofis binası benzetim yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmanın amacı jeopolimer betonun kullanım ömrü boyunca çevresel etkilerini değerlendirmektir. Jeopolimer beton çalışma kapsamında beton kontrol grubuna göre düşük çevresel etki sağlamıştır fakat çevresel etki farkları büyük oranda değildir. İhtiyaca göre içeriği değiştirilebilen ve özellikleri iyileştirilebilen jeopolimer beton için bu sonuçlar az gibi gözükse de ürün özelleştirilerek daha iyi sonuçlar verebilir. Ayrıca, çevresel etkiler logaritmik olarak artmaktadır küçük farklar her yıl büyük farklara neden olacaktır. Benzetim yöntemi için belirlenmiş ürün özellikleri cephe özelinde yapılacak araştırmalarla desteklenerek iyileştirilmiş sonuçlar elde edilebilir.

Atıkların depolanması ve depolama sonucu kullanılan alan günümüzde sorun teşkil etmektedir. Jeopolimer beton oluşumunda atık malzemeler bulundurmaktadır. Yapma çevrede en çok tercih ettiğimiz beton yerine jeopolimer beton kullanılması atık depolama sorununa önemli derecede katkıda bulunacaktır.

Puzolan olarak atık malzeme kullanan jeopolimer betonun içerdiği malzemelere bakıldığı zaman gömülü enerjisi ve ilk somutlaşma enerjisi betondan düşüktür. Jeopolimer beton ürün pazarında istenilen özellikleri sağlamasından ve beşikten-kapıya yaklaşımına göre daha avantajlı bir ürün olduğundan dolayı yapı sektöründe tercih edilebilir.



KAYNAKLAR

- Akın, G.** (2006). Küresel Isınma, Nedenleri ve Sonuçları. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 46 (2), 29-43. <https://dergipark.org.tr/en/pub/dtcfdergisi/issue/66772/1044205>
- Akman, A.** (1999). Ekolojik ve Biyolojik Yapı Uygulamaları. *Yapı Dergisi*, 213(8), 91-102.
- Aldred, J. ve Day, J.** (2012). Is geopolymer concrete a suitable alternative to traditional concrete. *The 37th Conference on Our World in Concrete & Structures*, (s.29-31). Singapore.
- Alkan, İ. B.** (2018). *Yüksek Dayanımlı Betonlarda Kullanılan Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu ve Çelik Liflerin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkileri.* (Yüksek lisans tezi). 19 Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Alnkaa, A. A.** (2019). *Farklı Kür Koşullarının Geopolimer Harçların Özelliklerine Etkisi.* (Doktora tezi). Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.
- Anderson, B.** (1988). Energy assessment for dwellings using BREDEM worksheets. *Energy Management*, 27.
- Andini, S., Cioffi, R., Colangelo, F., Grieco, T., Montagnaro, F. ve Santoro, L.** (2008). Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products. *Waste Management*, 28(2), 416–423. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2007.02.001>
- Annakoa, M. A. I.** (2019). *Geopolimer Betonda Cam Tozu Kullanımının Araştırılması.* (Yüksek lisans tezi). Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.
- Arioğlu, N.** (1993). *Yapı Ürünlerini Seçim için Bir Yöntem.* (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arslan, A.** (2016). *Hazır Beton Tesislerinde Oluşan Taze Atık Betonun Kaynaklarının Belirlenmesi.* (Yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.
- Aruntaş, H. Y.** (2006). Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 193-203.
- Ashby, M. F.** (2009). *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*, UK:Elseiver.
- Aydın, S.** (2010). *Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcılı Lifli Kompozit Geliştirilmesi.* (Doktora tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

- Aydın, T. ve Pehlivanlı, Z. O.** (2017). Jeopolimer esaslı gözenekli hafif yapı malzemelerinin geliştirilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(1), 227-236.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G. ve Cheng, Y. B.** (1999). Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 29(10), 1619–1625. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00143-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00143-X)
- Bakharev, T.** (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 658–670. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.06.005>
- Bakos, G. C.** (2000). Insulation protection studies for energy saving in residential and tertiary sector. *Energy and Buildings*, 31(3), 251–259. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00016-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00016-X)
- Balanlı, A.** (1997). *Yapıda Ürün Seçimi*. İstanbul:YÜMFED Yayınları.
- Balçıkanlı, M.** (2016). *Alkalilerle Aktive Edilmiş Çimentosuz Cürufllu Betonların Mekanik ve Geçirimsizlik Özellikleri*. (Yüksek lisans tezi). İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İskenderun.
- Baradan, A., Yazıcı, H. ve Aydın, S.** (2012). *Beton*, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Bare, J. C., Hofstetter, P., Pennington, D. W. ve de Haes, Helias A. Udo.** (2000). Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(6), 319-326. <https://doi.org/10.1007/BF02978665>
- Barsoum, M. W., Ganguly, A. ve Hug, G.** (2006). Microstructural evidence of reconstituted limestone blocks in the great pyramids of egypt. *Journal of the American Ceramic Society*, 89(12), 3788-3796. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01308.x>
- Başarır, B.** (2013). *Binalarda Cephe Yenileme Gereksinimleri ve Çözüm Teknikleri*. (Yüksek lisans tezi). Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bedirhanoglu, İ.** (2011). *Beton Tasarımı* [Ders Notu]. <https://www.yumpu.com/tr/document/view/6734966/29032011-yrddoc-dr-idris-bedirhanoglu-7> adresinden alındı
- Bekker, P. C. F.** (1982). A life-cycle approach in building. *Building and Environment*, 17(1), 55–61. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(82\)90009-9](https://doi.org/10.1016/0360-1323(82)90009-9)
- Benli Yıldız, N.** (2017). *Cam Elyaf Takviyeli Beton (GFRC) Cephe Panelleri İçin Yaşam Döngü Değerlendirmesi (YDD) Yöntemiyle Bir Sürdürülebilirlik Çerçevesi Geliştirilmesi*. (Doktora tezi). Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- Berber, F.** (2012). *Ekolojik Malzemenin Tasarımdaki Yeri Ve Ekolojik Malzemeyle Mimari Konut Tasarımı*. (Yüksek lisans tezi). Haliç Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Bilgici, Z.** (2014). Yeşil Binalar. *TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*, 66-71.
- Brew, D.R.M. ve MacKenzie, K.J.D.** (2007). Geopolymer synthesis using silica fume and sodium aluminate. *Journal of Materials Science*, 42, 3990–3993.
<https://doi.org/10.1007/s10853-006-0376-1>
- Buyle, M., Braet, J. ve Audenaert, A.** (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 379–388.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.05.001>
- Cheng, T. W. ve Chiu, J. P.** (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*, 16(3), 205–210.
[https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00008-6)
- CML (Version 3.4) [Bilgisayar Yazılımı].** Hollanda: Leiden University Institute of Environmental Sciences.
- Coşkun, İ., Tandırcı, E. ve Kurt, S.** (2017). Geri dönüşüm suyu ikamesinin beton üretimine etkileri. *Hazır Beton Dergisi*, 144, 73-80.
- Coşkun, Ö.** (2011). İyonize Radyasyonun Biyolojik Etkileri. *Teknik Bilimler Dergisi*, 1(2), 13-17.
- Croft, C.** (2004). *Concrete Architecture*. Utah: Gibbs Smith.
- Çakır, M.** (1999). *Uçucu Külün Zemin Stabilizasyonu*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çetin, Ş., Alyüz, B. ve Ayberk, S.** (2008). Troposferik ozon oluşumu, olumsuz etkileri ve Kocaeli ili'ndeki mevcut durum, *Çevre Sorunları Sempozyumu* (s.311-314), Kocaeli.
- Davidovits, J. ve Comrie, D.** (1988). Long term durability of hazardous toxic and nuclear waste disposals. *In Proceedings of Geopolymer*, (88).
- Davidovits, J.** (1991). Geopolymers. *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633–1656.
<https://doi.org/10.1007/BF01912193>
- Davidovits, J.** (2002). 30 Years of Successes and Failuresin Jeopolimer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs, *Jeopolimer 2002 Conference*, (28), 29.
- Davidovits, J.** (2008). *Geopolymer Chemistry and Applications* (2. Basım). Saint-Quentin:Institut Géopolymère.
- Davidovits, J.** (2015). *Geopolymer Chemistry and Applications* (4. Basım). Saint-Quentin:Institut Géopolymère.
- De Haes, H. A. U. ve Jolliet, O.** (1999). How does iso/dis 14042 on life cycle impact assessment accommodate current best available practice?. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 4(2), 75-80.

- De Vargas, A. S., Dal Molin, D. C. C., Vilela, A. C. F., Silva, F. J. da, Pavão, B. ve Veit, H.** (2011). The effects of $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Composites*, 33(6), 653–660.
<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2011.03.006>
- Delmas B. M. A., Nairn-birch N. ve Balzarova M.** (2013). Choosing The Right Eco-Label For Your Product Eco-Label. *MIT Sloan Management Review*, 54(4), 10.
- Demirer G. N.** (2011). *Yaşam Döngüsü Analizi*. Ankara: Türkiye: Bölgesel Çevre Merkezi- REC.
- Demkin, J. A.** (1996). *Environmental resource guide*. New York: John Wiley and Sons.
- Dimas, D., Giannopoulou, I. ve Panias, D.** (2009). Polymerization in sodium silicate solutions: a fundamental process in geopolymerization technology. *Journal of Material Science*, 44, 3719–3730.
<https://doi.org/10.1007/s10853-009-3497-5>
- Dinçer, A.** (2013). *Pomza, Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Durabilite Özellikleri*. (Yüksek lisans tezi). Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Dombrowski, K., Weil, M., ve Buchwald, A.** (2008). Geopolymer binders. Part 2: Development and optimization of geopolymerconcrete mixtures for strong and durable external Wall units. *Zkg International*, 61(3), 70–80.
- Domone, P. ve Illston, J.** (2010). *Construction Materials; Their nature and behaviour*. New York: Spon Press.
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A. ve van Deventer, J S J.** (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917-2933.
<https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C. ve van Deventer, J. S. J.** (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’. *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1590-1597.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>
- Duxson, P., Mallicoat, S. W., Lukey, G. C., Kriven, W. M. ve van Deventer, J. S. J.** (2007). The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids and Surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects*, 292(1), 8-20.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.05.044>

- Ecetoc, Task Force On Freshwater Ecotoxicity As An Impact Category In Life Cycle Assessment**, Otte, N., Claessens, M., Cooper, C., Hoke, R., King, H., L Haridon, J., Palais, F., Schmidt, F., Schowanek, D., Wolf, T. ve Cummings, I. (2016). *TR127: Freshwater ecotoxicity as an impact category in life cycle assessment*. European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals (ECETOC). <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.30606.56640>
- Erdoğan, T.** (2003). *Beton*, 1. Baskı, Ankara:ODTÜ Geliştirme Vakfı.
- Erdoğan, T.** (2010). *Beton*, 3. Baskı, Ankara:ODTÜ Yayıncılık.
- Eriç, M. ve Ersoy, H.Y.** (1995). Yapı Biyolojisi, Ekolojik Denge ve Yapı Malzemesi ilişkisi. *Yapı Dergisi*, (163), 84.
- Eriç, M.** (2010). *Yapı Fiziği ve Malzemesi*. İstanbul: Literatür Yayınevi.
- Ersoy, U., ve Özcebe, G.** (2004). *Betonarme*, 5. baskı, İstanbul: Evrim Yayınevi.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, J. G., Puertas, F. ve CSIC, M.** (1999). Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1313-1321. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00154-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00154-4)
- Fernández Pereira, C., Luna, Y., Querol, X., Antenucci, D. ve Vale, J.** (2009). Waste stabilization/solidification of an electric arc furnace dust using fly ash-based geopolymers. *Fuel (Guildford)*, 88(7), 1185-1193. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.01.021>
- Foster, N.** (2007). Mimarlık ve Sürdürülebilirlik. *Yapıda Ekoloji: Ekolojik Tasarım ve Sürdürülebilirlik Eki Yapı Dergisi*, 24-28.
- Gallego, A., Rodríguez, L., Hospido, A., Moreira, M. T. ve Feijoo, G.** (2010). Development of regional characterization factors for aquatic eutrophication. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(1), 32-43. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0122-4>
- Gholampour, A., Ozbakkaloglu, T. ve Ng, C.** (2019). Ambient- and oven-cured geopolymer concretes under active confinement. *Construction & Building Materials*, 228, 116722. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116722>
- Gorhan, G. ve Kurklu, G.** (2014). The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites. Part B, Engineering*, 58, 371-377. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.082>
- Görür, E.B.** (2015). *Alkali ile Aktifleştirilmiş Jeopolimer Betonun Dayanım ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması*. (Doktora tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Gu, L., Lin, B., Gu, D. ve Zhu, Y.** (2008). An endpoint damage oriented model for life cycle environmental impact assessment of buildings in china. *Chinese Science Bulletin*, 53(23), 3762-3769. <https://doi.org/10.1007/s11434-008-0512-1>

- Gülnar, F.** (2019). *Geopolimer yapı malzemesi üretiminde atık döküm kumu kullanımı*. (Yüksek lisans tezi). Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Gümüş, A.** (2016). *Jeopolimer beton özelliklerine termal k r prosesinin etkisi*. (Yüksek lisans tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Günaydın, G.** (2011). *Sürdürülebilirlik Kapsamında  evresel  r n Bildirgelerinin Yapı Sektöründe Uygulanması: Türkiye İçin  neri*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hamalı, Y.** (2007). *Metakolin ve Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların  zellikleri*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J. ve Rangan, B. V.** (2005) Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Australian Journal of Structural Engineering*, 6(1), 77-86.
DOI: 10.1080/13287982.2005.11464946
- He, J., Zhang, J., Yu, Y. ve Zhang, G.** (2012). The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study. *Construction & Building Materials*, 30(1), 80-91.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.011>
- Heijungs, R., Guinée, J. B., Huppes, G., Lankreijer, R. M., Udo Haes, H. A., Wegener Sleeswijk, A., Ansems, A. M. M. ve Eggels, P. G.** (1992). *Environmental life cycle assessment of products: Guide and backgrounds*. Leiden:Centre of Environmental Science.
- Hlavacek, P.** (2014). *Engineering properties of alkali activated composites*. (Doktora tezi). Czech Technical University, Prague.
- Hosan, A., Haque, S. ve Shaikh, F.** (2016). Compressive behaviour of sodium and potassium activators synthesized fly ash geopolymer at elevated temperatures: A comparative study. *Journal of Building Engineering*, 8, 123-130.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.10.005>
- ISO 14040.** (2006). Environmental management – Life cycle assessment – principles and framework, ISO, Cenevre.
- ISO 14042.** (2000). Environmental management—Life cycle assessment—Life cycle impact assessment. Management environnemental, ISO, Cenevre.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G. ve Rosenbaum, R.** (2003;2018;). IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6), 324-324.
<https://doi.org/10.1007/BF02978505>
- Jonker, A.** (2006). *Insulating Refractory Materials from Inorganic Waste Resources*. (Doktora tezi). Tshwane University of Technology, Faculty of Science, Pretoria.
- Kahn, I. L.** (1965). Remarks. *The Yale Architectural Kournal*, (9-10), 305.

- Kayhan, A. ve Özgünler Acun, S.** (2021). Sürdürülebilir Beton Çalışmaları Kapsamında Jeopolimer Betonun İncelenmesi. A., Gül, Ö., Demirel, S., Seydoşoğlu S. (Editör), *1st International Architectural Sciences and Application Symposium*, (s. 1395-1409). Isparta.
- Keyte, L. M., Lukey, G. C. ve Van Deventer, J. S. J.**, (2004). The effect of coal ash composition on properties of waste based geopolymers, *International Symposium Of Research Students On Material Science And Engineering*, 1-13.
- Khale D. ve Chaudhary R.** (2007). Mechanism of jeopolimerization and factors influencing its development: a review. *Materials Science*, 42(3), 729-746.
- Kim, D., Lai, H., Chilingar, G. V. ve Yen, T. F.** (2006). Geopolymer formation and its unique properties. *Environmental Geology (Berlin)*, 51(1), 103-111. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0308-z>
- Kılıç E.** (2010). *Deri Endüstrisi artıma çamurlarından kromun oksidatif yöntemle geri kazanılması ve çevresel etkisinin yaşam döngüsü analizi ile değerlendirilmesi.* (Doktora tezi). Ege Üniversitesi, Deri Mühendisliği, İzmir.
- Kılıç, İ.** (2014). Atık Betonların Geri Dönüşümünde Süper Akışkanlaştırıcı Katkı Kullanımı. *Electronic Journal of Vocational Colleges*, 4(4).
- Klöpffer, W. ve Grahl, B.** (2014). *Life cycle assessment (LCA): A guide to best practice.* Amerika:John Wiley & Sons.
- Komnitsas, K. ve Zaharaki, D.** (2007). Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. *Minerals Engineering*, 20(14), 1261-1277. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.07.011>
- Kong, D. L. Y. ve Sanjayan, J. G.** (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(2), 334-339. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.017>
- Köker, T.Ş.** (2019). *Hafif agrega katkılı jeopolimer harçların mekanik ve durabilite özellikler.* (Yüksek lisans tezi). Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Kriven, M. S. E.** (2004). Composite Cold Ceramic Geopolymers in a Refractory Application. *Researchgate*. https://www.researchgate.net/publication/284682579_Composite_Cold_Ceramic_Geopolymer_in_a_Refractory_Application 16.07.2021 tarihinde alındı.
- Li, C., Gong, X., Cui, S., Wang, Z., Zheng, Y. ve Chi, B.** (2011). CO₂ Emissions due to Cement Manufacture, *Material Science Forum*, ISSN: 1662-9752 (685), 181-187.
- Maras, M.M.** (2019). *Geogrid Jeopolimer Panellerle Güçlendirilmiş Yığma Duvarların Yapısal Davranışının İncelenmesi.* (Doktora tezi). Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.

- McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., van Riessen, A. ve Corder, G. D.** (2011). Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 19(9), 1080-1090.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>
- Memişoğulları, M.** (2019). *Prefabrik Beton Yapı Malzemelerinin Geri Dönüşüm Agregası Olarak Beton Parke Yapımında Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. (Yüksek lisans tezi). Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- MPA.** (2008a). Sheet P2 - Embodied CO₂ of Factory Made Cements and Combinations, mpa – The Concrete Centre.
- MPA.** (2008b). Sheet C1 - Embodied CO₂ of Concrete and Reinforced Concrete, mpa – The Concrete Centre.
- Nazari, A. ve Sanjayan, J. G.** (2015). Synthesis of geopolymer from industrial wastes. *Journal of Cleaner Production*, 99, 297–304.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.03.003>
- Nowak, R.** (2008). Geopolymer concrete opens to reduce CO₂ emissions. *The New Scientist*, 197(2640), 28–29.
- Nuriddin, M. F., Malkawi, A. F., Fauzi, A., Mohammed, B. S. ve Al-Mattameh, H. M.** (2016). Effects of alkaline solution on the microstructure of HCFA geopolimers, *Engineering challenges for sustainable future: proceedings of the 3rd international conference on civil, offshore and environmental engineering*, (s.505). London.
- Orhon, A. V.** (2013). Mimarlıkta Betonun Sürdürülebilirliği. *Ege Mimarlık Dergisi*.
- Ortiz, O., Castells, F. ve Sonnemann, G.** (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction & Building Materials*, 23(1), 28-39.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012>
- Ölmez, G.** (2011). *Comparison of sub-processes and final products of iron and steel production with life cycle assessment*. (Yüksek lisans tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Önel, H.** (1978). *Yapılarda Alınacak Önlemlerle Hava Kirliliğinin Azaltılması Üzerine Bir İnceleme*. (Doktora tezi). İstanbul Devlet Mühendislik Mimarlık Akademisi, İstanbul.
- Özkan, E.** (1976). *Yapım Sistemleri'nin Seçimi için Bir Yöntem*. (Doktora tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Özkul, H., Tasdemir, M., Uyan, M. ve Tokyay, M.** (1999). *Meslek Liseleri İçin Her Yönüyle Beton*. İstanbul: THBB.
- Özodabaş, A.** (2014). *Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Harçlarının Performansının Geliştirilmesi*. (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Öztaş S. K.** (2014). *Türk Yapı Malzemesi Sektörü İçin Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesine Yönelik Bir Model Önerisi*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Pacheco, C., Lahiri, S., Ernst, M. ve Ball, T.** (2007). Feedback-directed random test generation. *29th International Conference on Software Engineering*, (s.75-84). <https://doi.org/10.1109/ICSE.2007.37>
- Pacheco-Torgal, F.** (2015). 1 - introduction to handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. (s. 1-16). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1533/9781782422884.1>
- Paçin, E.** (2019). *İzmit Ömerli Köyü Kırsal Mimarisinin Çevresel Sürdürülebilirlik Bağlamında İncelenmesi Ve Koruma Önerisi Geliştirilmesi*. (Yüksek lisans tezi). Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. v. ve Tashima, M. M.** (2015). Reuse of aluminosilicate industrial waste materials in the production of alkali-activated concrete binders. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, 487–518. <https://doi.org/10.1533/9781782422884.4.487>
- Postacioğlu, B.** (1987). *Agregalar, Beton*. İstanbul:Teknik Kitaplar Yayınevi.
- Provis, J. L. ve van Deventer, J. S. J.** (2009). Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications. *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications* içinde. UK. <https://doi.org/10.1533/9781845696382>
- Provis, J.L.** (2009). Activating Solution Chemistry for Geopolymers, *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications* içinde (50-71). UK.
- Rahim, A. A., Musa, S. N., Ramesh, S. ve Lim, M. K.** (2020). A systematic review on material selection methods. *Journal of Materials: Design and Application*, 234 (7), 1032-1059. <https://doi.org/10.1177/1464420720916765>
- Raisman S. ve Murphy D. T.** (2013). *Ocean Acidification: Elements and Considerations*. New York:Nova Science Publishers.
- Ravanat, J. L. ve Douki, T.** (2016). UV and ionizing radiations induced DNA damage, differences and similarities. *Radiation Physics and Chemistry*, 128, 92–102. <https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSICHEM.2016.07.007>
- Rovnaník, P.** (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1176–1183. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.12.023>
- Ruiz-Santaquiteria, C., Skibsted, J., Fernández-Jiménez, A. ve Palomo, A.** (2012). Alkaline solution/binder ratio as a determining factor in the alkaline activation of aluminosilicates. *Cement and Concrete Research*, 42(9), 1242–1251. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2012.05.019>

- Sagoe-Crentsil, K. ve Weng, L.** (2007). Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part II. High Si/Al ratio systems. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3007–3014. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0818-9>
- Sağlam, S. S.** (2021). Tarihi Yapıların Restorasyon Çalışmalarında Malzeme Seçimi için Model Önerisi ve Modelin BIM’e Entegrasyonu, *CKY 533 Proje 1 Raporu*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Sanjayan, J.G. ve Stocks, L.J.** (1993). Spalling of high-strength silica fume concrete in fire. *ACI Materials Journal*, 90 (2), 170–173.
- Sanni, P., Shankar H. ve Khadiranaikar, R. B.** (2013). Performance of Alkaline Solutions on Grades of Geopolymer Concrete. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*.
- Sarkaz, A. M. H.** (2020). *Atık Lastik Katkılı Geopolimer Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.
- Schemeling, R. ve Schemeling W. K.** (2014). *Decorative and Architectural Geopolymer Panels* [PowerPoint slaytları]. <https://www.geopolymer.org/conference/gpcamp/gpcamp-2014/> adresinden alındı
- Schoen, M. E., Xue, X., Wood, A., Hawkins, T. R., Garland, J. ve Ashbolt, N. J.** (2017). Cost, energy, global warming, eutrophication and local human health impacts of community water and sanitation service options. *Water Research*, 109, 186–195. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2016.11.044>
- Selici T., Utlu, Z. ve İlten, N.** (2005). Enerji Kullanımının Çevresel Etkileri Ve Sürdürülebilir Gelişme Açısından Değerlendirilmesi, *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*. Türkiye.
- Shah, T., Shah, P. ve Pujara, H.** (2017). *Eco-friendly Concrete* [Powerpoint slaytları]. <https://pt.slideshare.net/HariyaliPujara/eco-friendly-concrete-or-geopolymer-concrete> adresinden alındı
- Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., Shree, V. ve Varun.** (2011). Life cycle assessment of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 871–875. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.09.008>
- Shi, C., Roy, D. ve Krivenko, P.** (2006). *Alkali-activated cements and concretes*. London:Taylor & Francis Group.
- Simonen K.** (2014). *Pocket Architect: Technic Design Series Life Cycle Assessment*, New York: Routledge.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M. ve Bhattacharyya, S. K.** (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, 85, 78–90. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.03.036>
- Smith, P. F.** (2006). *Architecture in a climate of change: A guide to sustainable design*. UK: Architectural Press.

- Socolof, M. L., Kincaid, L. E. ve Geibig, J. R.** (2001). *Desktop computer displays: a life cycle assessment*. Knoxville:University of Tennessee Center for Clean Products and Clen Tehnologies.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. ve Chindaprasirt, P.** (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, 90(6), 2118–2124.
<https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2011.01.018>
- SpringerLink (Online service).** (2014). In Provis J. L., van Deventer, Jannie S. J(Eds.), *Alkali activated materials: State-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM*. Springer Netherlands.
- Swanepoel, J. C. ve Strydom, C. A.** (2002). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *Applied Geochemistry*, 17(8), 1143–1148.
[https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00005-7)
- Şaşı, H. ve Yabanlı, M.** (2015). Bafa Gölü'nün Biyo-Çeşitliliği Ve Çevresel Sorunları. *Bafa Gölü Havzasında Toplum Destekli Ekoturizm Faatliyetlerini Belirlenmesi Proje Raporu*, 96-132.
- Şinik, O.** (2019). *Geopolimer Betonlarda Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması*. (Yüksek lisans tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Tanaçan, L.** (2002). Ekolojik Yapı Malzemelerinin Tanımlanmasındaki Sorunlar. *1.Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi*, (2), 720.
- Taygun, G. T.** (2005). *Yapı ürünlerinin yaşam döngüsü değerlendirmesine yönelik bir model önerisi*. (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Topçu, İ.B. ve Toprak, M.U.** (2009). Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Hafif Harç Üretimi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22 (2), 153-164.
- Toprak, M. U.** (2011). *Termik Santral Taban Küllerinden Alkali Aktivasyonu ile Geopolimer Üretilmesi*. (Doktora tezi). Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Toydemir, N., Gürdal, E. ve Tanaçan, L.** (2000). *Yapı Elemanı Tasarımında Malzeme*. İstanbul: Literatür Yayıncılık.
- TS 802.** (2016). Beton karışım tasarımı hesap esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 197-1.** (2012). Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Tufan, M. Z. ve Özel, C.** (2018). Sürdürülebilirlik Kavramı ve Yapı Malzemeleri İçin Sürdürülebilirlik Kriterleri. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 2 (1), 6-13.
- Türkçü, H. Ç.** (2010). *Yapım İlkeler-Malzemeler-Yöntemler-Çözümler*. İstanbul: Birsan Yayınevi.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğinoğlu, A.** (2009). *Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri*. Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.

- Vermishev V. I. ve Danilov-Danilyan M. K.** (2014). Ozone layer depletion. Pollmann, S. ve Gorbachev, M. Gay, W. C., Mazour I. I. and Chumakov, A. N.(Der.). *Global studies encyclopedic dictionary* içinde (362). New York.
- Weidema, B. P., Bauer, C., Hischier, R., Mutel, C., Nemecek, T., Reinhard, J., Vadenbo, C. O. ve Wernet, G.** (2013). *Overview and methodology:Data quality guideline for the ecoinvent database version 3*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- World Commission on Environment and Development.** (1987). *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press.
- Xu, H. ve van Deventer, J. S. J.** (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247–266. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5)
- Yazıcı, H.** (2016). *Beton Karışım Hesabı* [PowerPoint slaytları]. <https://docplayer.biz.tr/13793889-Beton-karisim-im-hesabi-doc-dr-halit-yazici-ins2024-yapi-malzemesi-ii-http-kisi-deu-edu-tr-halit-yazici.html> adresinden alındı
- Yeşilyurt, E.** (2013). *Isıl İşlem Görmüş Ham Perlit ile Yeni Nesil Yapı Malzemesi Geliştirilmesi*. (Doktora tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yılmaz, Z.** (2006). Akıllı binalar ve yenilenebilir enerji. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, (91), 7-15.
- Yiğit S.** (2002). Göllerde Ötrofikasyon Problemleri ve Çözüm Yolları. *Mavi Gezegen Dergisi*, (10), 32-35.
- Yorgancıoğlu, P.** (2004). *Sürdürülebilir Yapım Kavramının Uygulamaya Aktarılmasındaki Araç, Yöntem ve Yaklaşımlara İlişkin Bir Değerlendirme*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zaharaki, D., Komnitsas, K. ve Perdikatsis, V.** (2010). Use of analytical techniques for identification of inorganic polymer gel composition. *Journal of Materials Science*, 45, 2715–2724 <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4257-2>.
- Zeynek, O.** (2009). *Uçucu Kül Esaslı Jeopolimer Tuğla Üretimi*. (Yüksek lisans tezi). Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Zhang, J., Provis, J. L., Feng, D., ve van Deventer, J. S. J.** (2008). Geopolymers for immobilization of Cr^{6+} , Cd^{2+} , and Pb^{2+} . *Journal of Hazardous Materials*, 157(2–3), 587–598. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2008.01.053>
- Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., Yu, W. H. ve Wang, H.** (2016). Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253–267. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.03.019>

- Url-1** < https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/11670/mod_resource/content/1/Mimarlar%C4%B1k%C4%B1Bilgisi%201.1.%20Hafta%20Ekolojik%20Tasar%C4%B1m.pdf >, erişim tarihi 16.07.2020.
- Url-2** < www.beton.com/pdf/portland_cimentosunun_icadi.pdf >, erişim tarihi 16.07.2020.
- Url-3** < www.teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/yapi_malzemesi/beton/2.HTM >, erişim tarihi 16.07.2020.
- Url-4** < <https://www.betonvecimento.com/cimento/turkiye-cimento-istatistikleri-2019#:~:text=Kapasite%20Kullan%C4%B1m%C4%B1,ile%2091.6%20milyon%20ton%20olmu%C5%9Ftur> >, erişim tarihi 02.01.2021.
- Url-5** < <http://www.thbb.org/engine.php?ID=4> >, erişim tarihi 16.07.2020.
- Url-6** < <http://www.thbb.org/Content.aspx?ID=31> >, erişim tarihi 16.07.2020.
- Url-7** < <http://www.thbb.org/media/490740/thbb-%C4%B0statistikler-2019.pdf> >, erişim tarihi 03.01.2020.
- Url-8** < <https://www.geopolymer.org/science/chemical-structure-and-applications/> >, erişim tarihi 14.03.2022.
- Url-9** < <https://malzemebilimi.net/polimer-nedir-polimer-cesitleri-nelerdir.html> >, erişim tarihi 11.07.2020.
- Url-10** < <https://www.jeopolimer.org/> >, erişim tarihi 10.07.2020.
- Url-11** < <http://www.teknomin.com.tr/ucucu-kul/ucucu-kul-nedir/> >, erişim tarihi 03.01.2020.
- Url-12** < <https://www.solechem.com/u/sodyum-silikat/#:~:text=n%C3%B6tr%20olarak%20tan%C4%B1mlan%C4%B1r.,Sodyum%20Silikat%20nas%C4%B1l%20%C3%BCretilir%3F,kar%C4%B1%C5%9F%C4%B1m%C4%B1n%C4%B1n%20s%C4%B1cak%20buharla%20i%C5%9Flenmesiyle%20%C3%BCretilebilir.> >, erişim tarihi 12.03.2022.
- Url-13** < <https://www.greelane.com/tr/bilim-teknoloji-matematik/bilim/definition-of-concentration-605844/#:~:text=Kimyada%20konsantrasyon%20tan%C4%B1mlanan%20bo%C5%9Fluk%20ba%C5%9F%C4%B1na,edilir%20k%C3%BCtle%20birimi%20ba%C5%9F%C4%B1na%20hacim%20> >, erişim tarihi 12.03.2022.
- Url-14** < <https://silo.tips/download/dokuz-eyl-niversitesi-naat-mhendislii-blm-alternatif-yap-malzemeleri-5> >, erişim tarihi 23.02.2022.
- Url-15** < <https://www.jeopolimer.org/applications/jeopolimer-cement/> >, erişim tarihi 10.07.2020.
- Url-16** < <https://www.archdaily.com/461298/university-of-queensland-global-change-institute-hassell> >, erişim tarihi 10.07.2020.
- Url-17** < <https://www.arup.com/projects/global-change-institute> >, erişim tarihi 10.07.2020.
- Url-18** < <https://gci.uq.edu.au/world-first-structural-use-of-earth-friendly-concrete> >, erişim tarihi 10.07.2020.

- Url-19** <<https://www.wagner.com.au/main/our-projects/global-change-institute-gci-building/?division=5655>>, erişim tarihi 10.07.2020.
- Url-20** <<https://www.jeopolimer.org/news/worlds-first-public-building-with-structural-jeopolimer-concrete/>>, erişim tarihi 10.07.2020.
- Url-21** <<http://www.akcansa.com.tr/downloads/surdurebilirlik/AKC-surdurulebilirlikRapor-261118.pdf>>, erişim tarihi 10.07.2020.
- Url-22** < <https://www.mgm.gov.tr/FILES/genel/arsiv/23mart/2010/sunu/ilk10/14.pdf> >, erişim tarihi 11.07.2020.
- Url-23** <<https://www.betonvecimento.com/cimento/sifir-karbonlu-cimento-yolunda-atilacak-adimlar>>, erişim tarihi 03.01.2020.
- Url-24** <<https://www.betonvecimento.com/beton-2/hazir-beton-veriler>>, erişim tarihi 15.07.2020.
- Url-25** <<https://www.yesilodak.com/yesil-ve-surdurulebilirlik-kavramlari-arasindaki-fark-nedir-#:~:text=Do%20ve%20dayan%20B1kl%C4%B1%20olmas%C4%B1%20nedeniyle,edilir%20ise%20elbette%20s%C3%BCrd%C3%BCr%C3%BClebilir%20de%C4%9Fildir./>>>, erişim tarihi 03.05.2022.
- Url-26** <<https://www.qsi.com.tr/hizmetler/lca-yasam-dongusu-analizi/>>, erişim tarihi 17.05.2022.
- Url-27** <<https://insapedia.com/betonun-isil-ozellikleri-isi-iletim-katsayisi-ozgul-isisi/#:~:text=Hafif%20betonlardan%20birim%20a%C4%9F%C4%B1l%C4%B1%C4%9F%C4%B1%20600,mh%C2%B0C%20aral%C4%B1%C4%9F%C4%B1nda%20olmaktad%C4%B1r.> >, erişim tarihi 20.05.2022.
- Url-28** <www.stac.org>, erişim tarihi 02.01.2020.
- Url-29** < <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2004/12/20041231.htm> >, erişim tarihi 14.03.2022.
- Url-30** <www.cevreorman.gov.tr/hava_02.htm>, erişim tarihi 02.01.2020.
- Url-31** <<http://www.webarsiv.hurriyet.com.tr>>, erişim tarihi 02.01.2020.
- Url-32** <www.meteoroloji.org.tr>, erişim tarihi 02.01.2020.
- Url-33** <https://tr.wikipedia.org/wiki/%C3%96trofikasyon#cite_note-2.>, erişim tarihi 04.05.2022.
- Url-34** < http://www.gabisoftware.com/fileadmin/GaBi_Manual/GaBi_Paperclip_tutorial_Part1.pdf >, erişim tarihi 04.05.2022.
- Url-35** <<http://naturalgas.org/environment/naturalgas/>>, erişim tarihi 04.05.2022.

EKLER

EK A.1: Çimento Tipleri ve Özellikleri.

EK A.2: Jeopolimer Araştırmaları Sonuç Verileri.

EK A.3: Jeopolimer Cephe Kaplaması ve Kontrol Katmanlaşması Alternatifleri.

EK A.4: Cephe Kaplama Alternatiflerinin Oluşturduğu Emisyonlar ve Çevresel Etki Hesap Çizelgesi.

EK A.5: Designbuilder Programı Ara Yüz



EK A.1: Çimento Tipleri ve Özellikleri**Çizelge A.1.1** Genel çimento tipleri ve özellikleri (TS EN 197-1, Memişoğulları, 2019).

Ana Tipler	Genel Çimento Tipleri (27 Ürün)		Bileşim (Kütlece ^a % olarak)										Açıklama	
			Klinker	Yüksek Fırın Cürufu	Silis Dumanı	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş Şist	Kalker			Minör İlave Bileşen
						Doğal	Doğal Kalsine Edilmiş	Silissi	Kalkersi		L	LL		
			K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L	LL		
CEM I	Portland Çimentosu	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	Klinkerin, Kalsiyumsülfat ve mineral katkı (minör bileşen olarak ağırlıkça en fazla %0-5 arası) ile öğütülmesi ile elde edilmektedir.
CEM II	Portland Cürüflu Çimento	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	Katkı Türüne bağlı olarak bu tipte bulunan çimentolar; cürüflü, puzolanlı gibi isimler almaktadır. Mineral katkı oranı %6-35'dir.
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland Silis Dumanlı Çimento	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland Puzolanik Çimento	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
	Portland Uçucu Küllü Çimento	CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5	

Çizelge A.1.1 (Devam) Genel çimento tipleri ve özellikleri (TS EN 197-1, Memişoğulları, 2019).

Ana Tipler	Genel Çimento Tipleri (27 Ürün)	Bileşim (Kütlece ^a % olarak)											Açıklama
		Klinker	Yüksek Fırın Cürufu	Silis Dumanı	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş Şist	Kalker		Minör İlave Bileşen	
					Doğal	Doğal Kalsine Edilmiş	Silissi	Kalkersi					
		K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L	LL		
CEM II	Portland Pişmiş Şistli Çimento	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Portland Kalkerli Çimento	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portland Kompoze Çimento ^{c)}	CEM II/A-M	80-88			<-----12-20----->							0-5
		CEM II/B-M	65-79			<-----21-35----->							0-5

Çizelge A.1.1 (Devam) Genel çimento tipleri ve özellikleri (TS EN 197-1, Memişoğulları, 2019).

Ana Tipler	Genel Çimento Tipleri (27 Ürün)		Bileşim (Kütlece ^a % olarak)										Açıklama	
			Klinker	Yüksek Fırın Cürufu	Silis Dumanı	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş Şist	Kalker			Minör İlave Bileşen
						Doğal	Doğal Kalsine Edilmiş	Silissi	Kalkersi					
			K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L	LL		
CEM III	Yüksek Fırın Cürufu Çimento	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	Katkı miktarı %36-95 arasındadır.
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Puzolanik Çimento ^{c)}	CEM IV/A	65-89	-	<-----11-35----->					-	-	-	0-5	Katkı miktarı , puzolan ve uçucu kül katkıları ile beraber %11-55 oranında değişim göstermektedir. Bu tipteki çimentolarda cüruf veya kalker katkı maddesi olarak kullanılmamaktadır.
		CEM IV/B	45-64	-	<-----36-55----->					-	-	-	0-5	
CEM V	Kompoze Çimento ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	<-----18-30----->			-	-	-	-	0-5	Bu tip çimentolar kompoze şeklindedir. Bu tipteki çimentolarda; puzolan ve uçucu külün toptan miktarı (%18-50) ile cüruf (%18-50) miktarı klinker oranı %20-64 arasında kalacak şekilde birlikte katılır.
		CEM V/B	20-38	31-49	-	<-----31-49----->			-	-	-	-	0-5	
^a	Çizelgedeki değerler ana ve minör ilave bileşenlerin toplamı ile ilgilidir. ^b Silis dumanının oranı % 10'la sınırlanmıştır ^c Portland kompoze çimento CEM II/A-M ve CEM II/B-M'de, Puzolanik çimento CEM IV/A ve CEM IV/B'de, Kompoze çimento CEM V/A ve CEM V/B'de klinkerin dışındaki diğer ana bileşenler çimentoya ait işaretle beyan edilmelidir (Örneğin, Madde 8'e bakılmalıdır).													

EK A.2: Jeopolimer Araştırmaları Sonuç Verileri.

Çizelge A.2.1 Jeopolimer araştırmaları sonuç verileri.

NO	Çalışma Adı	Yazar	Karışım İçeriği	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Öz Isı (J/kg-K)	Ses Geçiş (km/sn)	Görünür Yoğunluk (kg/m ³)	Basınç Dayanımı Mpa	Eğilme Dayanımı MPa	Su Emme (%)	Görünen Porozite (%)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık - % Basınç Kaybı)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık-% Ağırlık Kaybı)	Asit Dayanımı		Tuz Dayanımı		Donma Çözünme (Döngü Sayısı - Basınç Dayanım Kaybı %)	
															Gün- % Basınç Kaybı	HCl	H ₂ SO ₄	Gün- % Basınç Kaybı		Na ₂ SO ₄
1	Termik Santral Taban Küllerinden Alkali Aktivasyon ile Geopolimer Üretilmesi	Mehmet Uğur Toprak	Atıklar ve Uçucu Küller	Taban Külü	1510-1760		1,87-4,43	1,87-4,43	24,14	0,53-2,88			200 - 2,24/1,82 400 - 6,95/4,63 800 - 27,25/23,64	200 - 8,43/9,08 400 - 10,92/12,67 800 - 12,33/14,15		HCl	H ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	25 - 4,79/5,65 50 - 13,17/14,43 100 - 17,48/19,33
			Agrega	Kum																
			Su	Su																
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃																
			Diğer Katkı	SiO ₂ - Na ₂ O																
2	Fire Resistance Properties of Waste Glass Incorporated Geopolymer Mortar	Dr, Binyu Zhang Prof, Chi-Sun Poon	Atıklar ve Uçucu Küller	Cam Tozu - Diğer Puzolan					55,8 (Precast)	24 (Taşıyıcı olmayan uygulama)			800 - (+316,5)/ (+182,17)/ (+117,1)/ (+84,66)							
			Agrega	Kum																
			Su	-																
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃																
			Diğer Katkı	İri Cam																
3	Geopolymer a New Concrete Binder	Dr, Marianne Saba Dr, Georges Aouad	Atıklar ve Uçucu Küller	Metakaolin					40-55											
			Agrega	Kum																
			Su	-																
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃																
			Diğer Katkı	-																
4	On the Effects of Water Content on the Structure and Thermo-Mechanical Properties of Geopolymers	Miladin Radovic Matthew Wetwick Maricela Lizcano	Atıklar ve Uçucu Küller	Metakaolin	1100-1600	0,15-0,43			10,0-90,0			17-55								
			Agrega	-																
			Su	-																
			Alkali Aktivatör	KOH - NaOH																
			Diğer Katkı	SiO ₂																
5	Alkali Tuz İçeriğinin Geopolimer Cephe Kaplama Malzemesi Özelliklerine Etkisi	Doç, Dr, Gökhan Görhan Doç,Dr, Gökhan Kürklü	Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül	1688-1707			1688-1707		0,6-2,7	12,09,2015	21,8-25,7								30 - 1,5-4
			Agrega	Kum																
			Su	-																
			Alkali Aktivatör	KOH - NaOH																
			Diğer Katkı	-																
6	NaOH ile Aktifleştirilmiş Metakaolin Katkılı Geopolimer Malzeme Özelliklerinin Araştırılması	Samet Girgin	Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül - Metakaolin	2006,5-2060,6			2472,3	41	9,12,2006	7,5-8,6	15,5-17,5								
			Agrega	-																
			Su	Su																
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃																
			Diğer Katkı	-																
7	Alkali ile Aktifleştirilmiş Uçucu Kül Geopolimer Betonun Dayanım ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması	Ela Bahşude Görür	Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül	2180-2280				70	13	0,98-4,69		200 - (+ 8,37) 400 - 32,85 600 - 37,57 800 - 39,28 1000 - 91,71						100 - 32,14	
			Agrega	Kum																
			Su	Su																
			Alkali Aktivatör	NaOH																
			Diğer Katkı	-																
			Sıcaklık	45-55-65-75-85-95-105-115																

Çizelge A.2.1 (Devam) Jeopolimer araştırmaları sonuç verileri.

NO	Çalışma Adı	Yazar	Karışım İçeriği	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Öz Isı (J/kg-K)	Ses Geçiş (km/sn)	Görünür Yoğunlu k (kg/m ³)	Basınç Dayanımı Mpa	Eğilme Dayanımı MPa	Su Emme (%)	Görünen Porozite (%)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık - % Basınç Kaybı)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık-% Ağırlık Kaybı)	Asit Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı		Tuz Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı		Donma Çözünme (Döngü Sayısı - Basınç Dayanım Kaybı %)
															HCl	H ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	
8	Geopolimer Harç Üretiminde Elazığ Ferrokróm Cürufu Kullanımının İncelenmesi	Oğuz Mahmut	Atıklar ve Uçucu Küller	Yüksek Fırın Cürufu	1630- 1800				3,72-16,76										
			Agrega	Kum															
			Su	Su															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
9	Farklı Tür Uçucu Küller Kullanılarak Üretilen Alkali Aktive Edilmiş Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi	Mehmet Kaya	Sıcaklık	40-65-90	1570-2050		1,93-2,66		28,75-56,44	7,22-10,27	0,39-6,91		200 - (+21,21) 400 - 42,42 600 - 48,13 800 - (+14,44)	200 - 1,83 400 - 5,67 600 - 6,2 800 - 6,71			30-66,27 90-63,95 180-69,63	30- 70,4 90- 71,33 180- 78,12	56 - 34,02
			Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül															
			Agrega	Kum															
			Su	Su															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
10	Alkali ile Aktifleştirilmiş Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması	Şinasi Bingöl	Atıklar ve Uçucu Küller	Yüksek Fırın Cürufu	2087-2136			2515-2604	21,56-72,29	3,04-8,07	8,68-8,98	18,39-18,6	300 - (+29,86, +9,22, -34,27) 600 - (+4,21, - 14,92, -10,62) 900 - (-61,15, - 68,27, -75,36)	300 - 7,89 - 8,08 600 - 9,89 -10,00 - 10,62 900 - 13,33, -13,49, -13,54	1 yıl - 6,12 - (+7) - 9	1 yıl - 27 - 10 - 8			
			Agrega	Kum															
			Su	Su															
			Alkali Aktivatör	Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
11	Doğal ve Atık Malzemelerle Geopolimer Harç ve Beton Geliştirilmesi	Murat Tuyan	Sıcaklık	75															
			Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül - Taban Külli - Tras - Zeolit - Atık Tuğla Tozu															
			Agrega	Kum															
			Su	Su															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
12	Kolemanit Atığı ve Silis Dumanı Katkılı Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harcın Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi	Yurdakul Aygörmez	Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül - Metakaolin - Yüksek Fırın Cürufu - Kolemanit - Silis Dumanı	2240-2390		3,16-3,67		30,64-67,3	9,02-14,03	7,19-9,93	14,78-17,72	300 - 31,07 - 34,82 600 - 50,37 - 56,84 900 - 82,4 - 86,54	300 - 1,92 - 2,15 - 2,44 - 2,58 - 2,81 600 - 2,93 - 3,56 - 4,36 - 4,57 - 4,84 900 - 4,78 - 5,25 - 5,45 - 5,74 - 6,01	1 yıl - 73,61 - 72,53 - 72,31 - 72,77 - 79,05	1 yıl - 87,92 - 84,46 - 84,14 - 87,44 - 88,21	1 yıl - 15,28 - 12,32 - 12 - 12,92 - 15,56	1 yıl - 18,28 - 15,06 - 14,63 - 15,37 - 21,02	56 - (+4,78) - 1,23
			Agrega	Kum															
			Su	Su															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	Polipropilen Lif - Hava Sürükleyici Katkı															

Çizelge A.2.1 (Devam) Jeopolimer araştırmaları sonuç verileri.

NO	Çalışma Adı	Yazar	Karışım İçeriği	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Öz Isı (J/kg-K)	Ses Geçişi (km/sn)	Görünür Yoğunluk (kg/m ³)	Basınç Dayanımı Mpa	Eğilme Dayanımı MPa	Su Emme (%)	Görünen Porozite (%)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık - % Basınç Kaybı)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık-% Ağırlık Kaybı)	Asit Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı		Tuz Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı		Donma Çözünme (Döngü Sayısı - Basınç Dayanım Kaybı %)
															HCl	H ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	
13	Alkallerle Aktive Edilmiş Çimento-suz Cürufu Betonların Mekanik ve Geçirimsizlik Özellikleri ve Üretim Optimizasyonu	Müzeyyen Balçıkıncı	Atıklar ve Uçucu Küller	Yüksek Fırın Cürufu	0,59-0,96		2,02-3,8		29,8-58,4		3,2-6,12								
			Agrega	Dolomitik Kireçtaşı															
			Su	Orijinli Agregası															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
14	Geopolimer Elde Edilmesi ve Katyon, pH ve Işıl İşlemin Geopolimer Üzerine Etkisi	Evren Anöz	Sıcaklık	26-40-60-80-94					8,19-59,95										
			Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül															
			Agrega	-															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	Na ₂ SiO ₃ - KOH - NaOH															
15	Development of a New Type of Fly Ash Based Geopolymer Concrete	Peshkavt Yaseen Saleh Dolamary	Diğer Katkı	-					21,04-51,27										
			Sıcaklık	40-80-120															
			Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül															
			Agrega	Agrega - Kum															
			Su	Su															
16	Vermikülit ve Uçucu Kül Katkılı Geopolimer Harç Üretimi	Hayrettin Tokay	Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃	1190-1550	0,37-0,79	1,84-3		1,4-4,61			30,19-39,5							
			Diğer Katkı	Vermikülit															
			Sıcaklık	105															
			Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül															
			Agrega	Silis Kumu															
17	Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Betonların Mekanik Özellik ve Yüksek Sıcaklık Dirençlerinin Araştırılması	Murat Tuyan Onur Can Boyacı Özge Andıç Çakır Kambiz Ramyar	Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃					25,1-40,3	4,0-6,0									
			Diğer Katkı	-															
			Sıcaklık	70															
			Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül															
			Agrega	Agrega															
18	Uçucu Kül Tabanlı Geopolimer Harçlarda Diatomit İkametinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkilerinin Araştırılması	Ezgi Örklemez	Alkali Aktivatör	NaOH	1900-2270				4-56,7	1,5-8,5 3,7-10,5 3,9-9,2	4,98-8,25	10,05-15,71	300 - 25,63 - 43,63 - 32,46 600 - 38,32 - 46,28 - 43,11 900 - 41,87 - 54,77 - 46,49						
			Diğer Katkı	-															
			Sıcaklık	60-75-90															
			Atıklar ve Uçucu Küller	Diatomit - Uçucu Kül															
			Agrega	Kum															

Çizelge A.2.1 (Devam) Jeopolimer araştırmaları sonuç verileri.

NO	Çalışma Adı	Yazar	Karışım İçeriği	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Öz Isı (J/kg-K)	Ses Geçiş (km/sn)	Görünür Yoğunlu k (kg/m ³)	Basınç Dayanımı Mpa	Eğilme Dayanımı MPa	Su Emme (%)	Görünen Porozite (%)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık - % Basınç Kaybı)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık-% Ağırlık Kaybı)	Asit Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı		Tuz Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı		Donma Çözünme (Döngü Sayısı - Basınç Dayanım Kaybı (%))
															HCl	H ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	
19	Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimento Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması	Fatih Kantarcı	Atıklar ve Uçucu Küller	Yüksek Fırın Cürufu	2414-2441				25,18-35,10		4,9-5,14		100 - (+3,93 , +6,87)						
			Agrega	Agrega									200 - 6,32, (+20,92)						
			Su	Su									300 - (+5,58, +32,96)						
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃									400 - 0,45 , (+7,62)						
			Diğer Katkı	-									500 - 21,93 - 42,57						
			Sıcaklık	75									600 - 42,59 - 43,92						
20	Jeopolimer Betonunun Basınç Dayanımı ve Ultrases Geçirgenliğine Kür Sıcaklığının Etkisi	Ahmet Coşkun Harun Tanyıldızı Murat Şahin	Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül			1,9-3,5		15,5-28										
			Agrega	Agrega															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
			Sıcaklık	20-30-40-50-60-70-80-90-100															
21	Jeopolimer Esaslı Gözenekli Hafif Yapı Malzemelerinin Geliştirilmesi	Tuna Aydın Zuhtu Onue Pehlivan	Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül - Metakaolin	1341-1393	0,11-0,26			8,75-11,86			53,39-54,69							
			Agrega	Kuvars															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH															
			Diğer Katkı	-															
			Sıcaklık	70															
22	Hafif Agregalı Katkılı Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özellikleri	Turan Şevki Köker	Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül	2009,8-2105,47		2,59-3,62		35,04-60,79	6,36-11,1	5,29-6,61	5,5-6,5							
			Agrega	Kuvars															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
			Sıcaklık	100															
23	Geopolimer Yapı Malzemesi Üretiminde Atık Döküm Kumu Kullanımı	Funda Yolcu	Atıklar ve Uçucu Küller	Atık Döküm Kumu	1400-1730				1,0-12,31		24-29	31-35							
			Agrega	-															
			Su	Su															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
			Sıcaklık	75-100-150-200															
24	Geopolimer Çimento ve Polivinil Alkol Fibrili Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı	Yavuz Yonar	Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül			1,0-4,2		10,0-45,0										
			Agrega	Agrega															
			Su	Su															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	Akışkanlaştırıcı															
			Sıcaklık	60-80-100															

Çizelge A.2.1 (Devam) Jeopolimer araştırmaları sonuç verileri.

NO	Çalışma Adı	Yazar	Karışım İçeriği	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Öz Isı (J/kg-K)	Ses Geçişi (km/sn)	Görünür Yoğunlu k (kg/m ³)	Basınç Dayanımı Mpa	Eğilme Dayanımı MPa	Su Emme (%)	Görünen Porozite (%)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık - % Basınç Kaybı)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık-% Ağırlık Kaybı)	Asit Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı		Tuz Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı		Donma Çözünme (Döngü Sayısı - Basınç Dayanım Kaybı %)
															HCl	H ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	
25	Geopolimer Betonlarda Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması	Osman Şinik	Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül	1951,6- 1985,6			2367,3- 2462,5	15,7-20,2		8,1-9,2	16-20					Kayda Değer Değişim Yok	Kayda Değer Değişim Yok	25 -4,3
			Agrega	Agrega															
			Su	Su															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
26	Geopolimer Vetonda Piriç Kabuğu Küllü ve Atık Seramik Tozu Kullanımının Araştırılması	Mohamed Ahmed Mohamed Bilal	Atıklar ve Uçucu Küller	Yüksek Fırın Cürufu - Piriç Kabuğu - Seramik Tozu	2016-2161				25,46-85,31		5,6-15,7	12,4-26,2	300 - 37,43 450 - 59,03 600 - 93,02						
			Agrega	Kum															
			Su	Su															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
27	Geopolimer Betonda Cam Tozu Kullanımının Araştırılması	Majed Ali İbrahim Annakoa	Atıklar ve Uçucu Küller	Yüksek Fırın Cürufu	2140-2390		3,1-4,1		49,45-58,81	2,12-4,02	6,38-9,27	19,17-26,38	300 - 56,61-6,66 600 - 71,84 - 46,9 900 - 92,83 - 91,72						
			Agrega	Agrega															
			Su	Su															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	Atık Cam															
28	F Sınıfı Uçucu Küllü Geopolimer Harcının Durabilite Özelliklerinin Araştırılması	İsmail İsa Atabey	Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül	1980-2320		2,98-4,58	2220-2340	29-97,6	7,2-16,9	1,4-6,5	3,2-13,2							60 - 0,6 - 7,2
			Agrega	Kum															
			Su	Su															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
29	Atık Lastik Katkılı Geopolimer Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi	Abdussalam M. Hasan Sarkaz	Atıklar ve Uçucu Küller	Yüksek Fırın Cürufu			3,08-3,95		15,64-56,18	1,59-4,07	7,53-15,35	19,64-25,76	900 - 100						
			Agrega	Agrega															
			Su	Su															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	Atık Lastik															
30	Atık Küllü Geopolimer Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanımı	Türkan Vural	Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül	910-2150				2,2-77	0,5-11	8,31-26,25	17-38,43							
			Agrega	Rilem Cembureau standart kumu															
			Su	Su															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
31	Atık Kazan Altı Küllü ve Pomza Elek Altı Atığından Geopolimer Yapı Malzemesi Üretimi	Neslihan Doğan- Sağtımur Ahmet Bilgili	Atıklar ve Uçucu Küller	Atık Kazan Altı Küllü - Pomza Elek Altı Atığı	1540-1710				6,2-17,1		26-38	36-45							
			Agrega	-															
			Su	Su															
			Alkali Aktivatör	NaOH															
			Diğer Katkı	-															

Çizelge A.2.1 (Devam) Jeopolimer araştırmaları sonuç verileri.

NO	Çalışma Adı	Yazar	Karışım İçeriği	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Öz Isı (J/kg-K)	Ses Geçişi (km/sn)	Görünür Yoğunluk (kg/m ³)	Basınç Dayanımı Mpa	Eğilme Dayanımı MPa	Su Emme (%)	Görünen Porozite (%)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık - % Basınç Kaybı)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık-% Ağırlık Kaybı)	Asit Dayanımı		Tuz Dayanımı		Donma Çözünme (Döngü Sayısı - Basınç Dayanım Kaybı %)
															HCl	H ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	
32	Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harçlara Farklı Kür Koşullarının Etkisinin İncelenmesi	Ahmet Ali Arslan	Atıklar ve Uçucu Kül	Metakaolin - Kolemanitin - Yüksek Fırın Cürufu	2400-2510				60,12-70,56	10,84-13,12	21,22-24,98	11,15-14,47	200 - 3,5 - 10,01 400 - 35,53 - 40,2 600 - 52,88 - 56,55	200 - 1,02 - 1,67 400 - 2,62 - 3,22 600 - 3,99 - 4,48					
			Agrega	Kum															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	Polivinil Alkol Lif - Bazalt Lif															
33	Measurement and Prediction of Thermal Properties of Alkaliactivated Fly Ash/Slag Binders at Elevated Temperatures	Zhu Pan Zhong Tao Yi-Fang Cao Richard Wuhrer	Atıklar ve Uçucu Kül	Yüksek Fırın Cürufu - Uçucu Kül	0,5-0,8	2,1 - 2,5 MJ/m ³ K (~1161-1382 J/kg-K)													
			Agrega	Agrega															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
34	Thermo-mechanical and microstructural characterisation of sodium-poly(sialate-siloxo) (Na-PSS) geopolymers	Subaer Arie Can Riessen	Atıklar ve Uçucu Kül	Metakaolin	1430-1890	0,55-0,91													
			Agrega	-															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
35	Thermal Conductivity of Metakaolin Geopolymers Used as a First Approximation for Determining Gel Interconnectivity	Peter Duxon Grant C. Lukey Jannie S. J. van Deventer	Atıklar ve Uçucu Kül	Metakaolin	0,3-0,52	1,5 - 3,5 MJ/m ³ K (~830 - 1936 J/kg-K)													
			Agrega	-															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	Na/(Na+K) SiO ₂ /M ₂ O H ₂ O/M ₂ O															
			Diğer Katkı	-															
36	Properties of Geopolymers from Conventional Fly Ash Activated at Increased Temperature with Sodium Hydroxide Containing Glass Powder Obtained from the Recycling of Waste Glass	Elzbieta Janowska-Renkas Agnieszka Kaliciak	Atıklar ve Uçucu Kül	Uçucu Kül	1916-2288				20-66			8,2-18,24							
			Agrega	-															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	Atık Cam															
37	The Study on Physical and Thermal Properties of Geopolymer Pastes	Pongsak Jittabut	Atıklar ve Uçucu Kül	Küspe Küllü - Pirinç Kabuğu Küllü -Uçucu Kül	1,11-1,67	1,68-1,95 MJ/m ³ K (~929-1079 J/kg-K)		2125-2040	8,27-6,8		1,1-2								
			Agrega	-															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
			Sıcaklık	Atmosfer Kürtü															

Çizelge A.2.1 (Devam) Jeopolimer araştırmaları sonuç verileri.

NO	Çalışma Adı	Yazar	Karışım İçeriği	Birim Hacim Ağırlık (kg/m³)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Öz Isı (J/kg-K)	Ses Geçiş (km/sn)	Görünür Yoğunluk (kg/m³)	Basınç Dayanımı Mpa	Eğilme Dayanımı MPa	Su Emme (%)	Görünen Porozite (%)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık - % Basınç Kaybı)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık-% Ağırlık Kaybı)	Asit Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı		Tuz Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı		Donma Çözünme (Döngü Sayısı - Basınç Basınç Dayanım Kaybı %)
															HCl	H ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	
38	Thermophysical Properties of Metakaolin Geopolymers Based on Na ₂ SiO ₃ /NaOH Ratio	NUR Ain Jaya LIEW Yun-Ming MOHD Mustafa Al Bakri Abdullah HEAH Cheng-Yong	Atıklar ve Uçucu Küller	Metakaolin	200-1800	0,44-0,92	1-3,7 MJ/m ² K (~553-2047 J/kg-K)		11,3-32										
			Agrega	-															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
39	Durability of Geopolymer Mortars (Fly Ash/Slag-Based) in Sulfate Environments	Prof. Charles C. Sorrell Assoc. Prof. Amaul Castet Dr. Pramod Koshy	Atıklar ve Uçucu Küller	Yüksek Fırın Çıruflu - Uçucu Kül													28 - 6,12	28 - 10,2	
			Agrega	-															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
40	Effect of FA and GGFS on the Properties of Geopolymer Mortar	Abdiquani Aden	Atıklar ve Uçucu Küller	Yüksek Fırın Çıruflu - Uçucu Kül					39,15-75,17										
			Agrega	-															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	Süper akışkanlaştırıcı															
41	The Effects of Replacement Fly Ash with Diatomite in Geopolymer Mortar	Theerawat Sinsiri Tanakorn Phon-ngernkham Vanchai Sata Prinya Chindaprasit	Atıklar ve Uçucu Küller	Diatomit - Uçucu Kül	2100-2250				22-42										
			Agrega	Kum															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
42	Geopolymer-based Decorative Stones - assessment of compatibility of various rocks with metakaolin-based matrix	Petr Sulovsky P. Niederle T. Opletal R. Smeky P. Dleštk V. Suchá M. Suková	Atıklar ve Uçucu Küller	Metakaolin					59- 66,1-72,2- 90,1-111,5										
			Agrega	Granit- Mermer - Çakıl															
			Su	-Kum															
			Alkali Aktivatör	?															
			Diğer Katkı	?															
43	Strength And Durability Characteristics of Pumice Based Geopolymer Paste	Zrar Safari Mahmood Mahmood	Atıklar ve Uçucu Küller	Ponza					30-76	0,1-2,7									
			Agrega	-															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	Su İlici															
44	Synthesis And Properties Of High Calcium Fly Ash Based Geopolymer For Concrete Applications (Geopolymer Block)	Parames Kamhangtironong	Atıklar ve Uçucu Küller	Pirinç Kabuğu Küli - Uçucu Kül					19,05-24,96		1,15-1,32								
			Agrega	Kum															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
45	Thermal Properties of Geopolymer Mortars (Fly Ash/Slag-Based) in Sulfate Environments	Prof. Charles C. Sorrell Assoc. Prof. Amaul Castet Dr. Pramod Koshy	Atıklar ve Uçucu Küller	Yüksek Fırın Çıruflu - Uçucu Kül					39,15-75,17								28 - 6,12	28 - 10,2	
			Agrega	-															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															

Çizelge A.2.1 (Devam) Jeopolimer araştırmaları sonuç verileri.

NO	Çalışma Adı	Yazar	Karışım İçeriği	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Öz Isı (J/kg·K)	Ses Geçiş (km/sn)	Görünür Yoğunlu k (kg/m ³)	Basınç Dayanımı Mpa	Eğilme Dayanımı MPa	Su Emme (%)	Görünen Porozite (%)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık - % Basınç Kaybı)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık-% Ağırlık Kaybı)	Asit Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı		Tuz Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı		Donma Çözünme (Döngü Sayısı - Basınç Dayanım Kaybı %)
															HCl	H ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	
45	Synthesis And Properties Of High Calcium Fly Ash Based Geopolymer For Concrete Applications (Geopolymer Tile)	Parames Kamhangritirong	Atıklar ve Uçucu Küller	Pirinç Kabuğu Küllü - Uçucu Kül	0,050- 0,079				4,71-5,89										
			Agrega	Kum															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
46	Engineering properties and microstructure of high calcium based geopolymer from Mae-moh power plant	Parames Kamhangritirong	Atıklar ve Uçucu Küller	Pirinç Kabuğu Küllü - Uçucu Kül	1720-1790				15,1-27,6										
			Agrega	-															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
47	Alkali-activated fly ash/slag cement Strength behaviour and hydration products	F. Puertas S. Martó-Áñez- Ramó-Árez S. Alonso, T. Vaázquez	Atıklar ve Uçucu Küller	Yüksek Fırın Cürufu - Uçucu Kül					15-66										
			Agrega	-															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH															
			Diğer Katkı	-															
48	Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator	A. Fernánde- Jime'nez A. Palomo	Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül					32-91,6	4,4-12,3									
			Agrega	Kum															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH															
			Diğer Katkı	-															
49	Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete	Daniel L.Y. Kong Jay G. Sanjayan	Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül	1940,4- 2575,8				19-29,3 70,5-72,3										
			Agrega	Agrega															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	Süper akışkanlaştırıcı															
50	Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar	Apma Sathonsaowaphak a Prinya Chindaprasit Kedsarin Pimraksa	Atıklar ve Uçucu Küller	Linyit Alt Küllü					40-60										
			Agrega	-															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
51	Durability of alkali-activated fly ash concrete: Chloride penetration in pastes and mortars	Huajun Zhu Zuhua Zhang Yingcan Zhu Liang Tian	Atıklar ve Uçucu Küller	Yüksek Fırın Cürufu - Uçucu Kül					78-50										
			Agrega	Kum															
			Su	-															
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃															
			Diğer Katkı	-															
			Sıcaklık	65															

Çizelge A.2.1 (Devam) Jeopolimer araştırmaları sonuç verileri.

NO	Çalışma Adı	Yazar	Karışım İçeriği	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Öz Isı (J/kg-K)	Ses Geçişi (km/sn)	Görünür Yoğunlu k (kg/m ³)	Basınç Dayanımı Mpa	Eğilme Dayanımı MPa	Su Emme (%)	Görünen Porozite (%)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık - % Basınç Kaybı)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık-% Ağırlık Kaybı)	Asit Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı	Tuz Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı	Donma Çözünme (Döngü Sayısı - Basınç Dayanım Kaybı %)
52	Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume	Francis N. Okoye Satya Prakash Nakshatra B. Singh	Atıklar ve Uçucu Küller Agrega Su Alkali Aktivatör Diğer Katkı Sıcaklık	Uçucu Kül Kum Su NaOH - Na ₂ SiO ₃ -					23-58								
53	Sustainable geopolymer concrete using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash: Strength and permeability properties	Ankur Mehta Rafat Siddique	Atıklar ve Uçucu Küller Agrega Su Alkali Aktivatör Diğer Katkı Sıcaklık	Yüksek Fırın Cürufu Agrega Su NaOH - Na ₂ SiO ₃ -					48-70								
54	Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method	Monita Olivia Hamid Nikraz	Atıklar ve Uçucu Küller Agrega Su Alkali Aktivatör Diğer Katkı Sıcaklık	Uçucu Kül Agrega -					37,92-69,81								
55	Production and characterization of lightweight vermiculite/geopolymer-based panels	V. Meunier E. Papa M. Mazzocchi L. Laghi M. Morganti J. Francisconi E. Landi	Atıklar ve Uçucu Küller Agrega Su Alkali Aktivatör Diğer Katkı Sıcaklık	Metakaolin Vermikülit -	723-841	0,17-0,25											
56	An Experimental Investigation on Flyash-based Geopolymer Mortar under different curing regime for Thermal Analysis	Anuja Narayanan Prabavathy Shanmugasundaram	Atıklar ve Uçucu Küller Agrega Su Alkali Aktivatör Diğer Katkı Sıcaklık	Uçucu Kül Kum Su NaOH - Na ₂ SiO ₃ -		0,36-0,91		1873-1958	20,01-29,27				900-65,86				
57	Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Hafif Harç Üretimi	İlker Bekir TOPÇU Mehmet Uğur TOPRAK	Atıklar ve Uçucu Küller Agrega Su Alkali Aktivatör Diğer Katkı Sıcaklık	Taban Küllü -	1550-1800		1,76-2,86		18,51		6,58						80- 4,3/11,5
58	Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer	Pavel Rovnanik	Atıklar ve Uçucu Küller Agrega Su Alkali Aktivatör Diğer Katkı Sıcaklık	Metakaolin Kum Su NaOH - Na ₂ SiO ₃ -					45-62	10,5-13							

Çizelge A.2.1 (Devam) Jeopolimer araştırmaları sonuç verileri.

NO	Çalışma Adı	Yazar	Karışım İçeriği	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Öz Isı (J/kg-K)	Ses Geçiş (km/sn)	Görünür Yoğunluk (kg/m ³)	Basınç Dayanımı Mpa	Eğilme Dayanımı Mpa	Su Emme (%)	Görünen Porozite (%)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık - % Basınç Kaybı)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık-% Ağırlık Kaybı)	Asit Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı	Tuz Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı	Donma Çözünme (Döngü Sayısı - Basınç Dayanım Kaybı %)
59	Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete	M.A.M. Ariffin M.A.R. Bhutta M.W. Hussin M. Mohd Tahir Nor Aziah	Atıklar ve Uçucu Küller Yakıt Küllü - Palmiye Yağı Yakıt Küllü Agrega Su Alkali Aktivatör Diğer Katkı Sıcaklık						30					200 - 6 400 - 7 600 - 7 800 - 10	540- 33,33		
60	The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators	Gum Sung Ryu Young Bok Lee Kyung Taek Koh Young Soo Chung	Atıklar ve Uçucu Küller Agrega Su Alkali Aktivatör Diğer Katkı Sıcaklık						15,2-47,5								
61	Development of metakaolin-fly ash based geopolymers for fire resistance applications	Hai Yan Zhang Venkatesh Kodur Shu Liang Qi Liang Cao Bo Wua	Atıklar ve Uçucu Küller Agrega Su Alkali Aktivatör Diğer Katkı Sıcaklık						15-59	5,0-15,0			500 - 63,79 / 100				
62	Effect of granulated lead smelter slag on strength of fly ash-based geopolymer concrete	M. Albitar M.S. Mohamed Ali P. Visintin M. Drechsler	Atıklar ve Uçucu Küller Agrega Su Alkali Aktivatör Diğer Katkı Sıcaklık	2350-2702					11,9-66,78								
63	Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration	C.D. Atiş E.B. Görür O. Karahan C. Bilin S. İlkentapar E. Luga	Atıklar ve Uçucu Küller Agrega Su Alkali Aktivatör Diğer Katkı Sıcaklık						10,5-120	0,6-14,9							
64	Design of geopolymer concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method	Muhammad N.S. Hadi Nabeel A. Farhan M. Neaz Sheikh	Atıklar ve Uçucu Küller Agrega Su Alkali Aktivatör Diğer Katkı Sıcaklık						34,4-61,15								

Çizelge A.2.1 (Devam) Jeopolimer araştırmaları sonuç verileri.

NO	Çalışma Adı	Yazar	Karışım İçeriği	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Öz Isı (J/kg-K)	Ses Geçişi (km/sn)	Görünür Yoğunlu k (kg/m ³)	Basınç Dayanımı Mpa	Eğilme Dayanımı MPa	Su Emme (%)	Görünen Porozite (%)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık - % Basınç Kaybı)	Yüksek Sıcaklık (Sıcaklık-% Ağırlık Kaybı)	Asit Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı	Tuz Dayanımı Gün- % Basınç Kaybı	Donma Çözünme (Döngü Sayısı - Basınç Dayanım Kaybı %)
65	Effect of using colemanite waste and silica fume as partial replacement on the performance of metakaolin-based geopolymer mortars	Mucteba Uysal Mukhlad M. Al- mashhadani Yurdakul Aygörmec Orhan Canpolat	Mikrosilika - Yüksek														
			Atıklar ve Uçucu Küller	Fırın Çürufu - Metakaolin													
			Agrega	Kum													
			Su	Su					30,64-67,30	9,02-13,51							
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃													
66	Performance of geopolymer concrete containing recycled rubber	Aly Muhammed Aly M.S. El-Feky Mohamed Kohail El-Sayed A.R. Nasr	Atıklar ve Uçucu Küller	Yüksek Fırın Çürufu													
			Agrega	Agrega - Kum													
			Su	-					37,4-53,13								
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃													
			Diğer Katkı	Kauçuk													
67	The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures	Gökhan Görhan Gökhan Kürklü	Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül													
			Agrega	Kum													
			Su	-	1552,9- 1622,7			2153,6- 2229,9	11,0-21,3	4,9-8,1	15,6-19,2	26,1-29,2					
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃													
			Diğer Katkı	-													
68	Kalsit İlaveli Jeopolimer Malzemeleri Sinterlemenin Gözenekliliğe Etkileri	Muhterem Koç M. Sadrettin Zeybek	Atıklar ve Uçucu Küller	Kalsit - Uçucu Kül													
			Agrega	-													
			Su	Su				500 - 1260- 1490			500 - 20/31,14						
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃				700 - 1380- 1530			700 - 16,4/24,17						
			Diğer Katkı	-				900 - 1310- 1620			900 - 7,58/22,29						
69	Self Compacting Geopolymer Concrete: Issues and Options	Muhd Fadhil Nuruddin	Atıklar ve Uçucu Küller	Uçucu Kül													
			Agrega	Agrega - Kum													
			Su	Su					24,18-56,29								
			Alkali Aktivatör	NaOH - Na ₂ SiO ₃													
			Diğer Katkı	Süper akışkanlaştırıcı													
70	Thermo-mechanical and microstructural characterisation of sodium-poly(silicate-siloxo) (Na-PSS) geopolymers	Subaer and van Riessen	Atıklar ve Uçucu Küller	?													
			Agrega	?	1430-1890	0,55-0,91											
			Su	?													
			Alkali Aktivatör	?													
			Diğer Katkı	?													

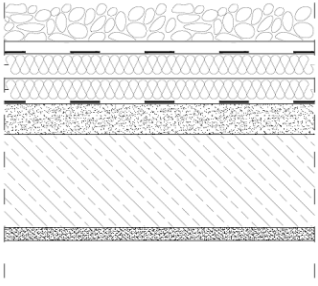
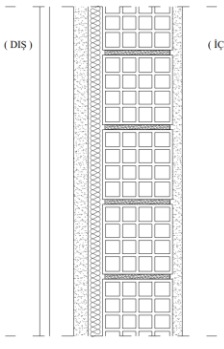
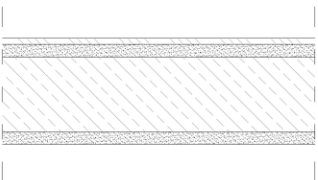
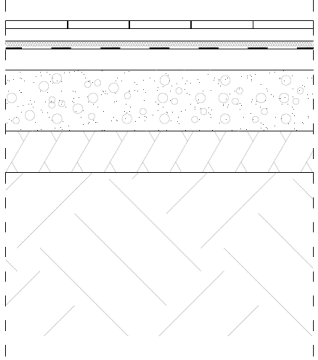
EK A.3: Jeopolimer Cephe Kaplaması ve Kontrol Katmanlaşması Alternatifleri.
Çizelge A.3.1 Kontrol katmanlaşması.

BİNA ELEMEN	TEKNİK DETAYLAR	KATMANLAŞMA	MALZEME KALINLIĞI (cm)	U (W/m ² -K)
ÇATI		ÇAKIL	5	0,306
		KEÇE	2	
		İKİ KAT SU YALITIMI	0,8	
		İKİ KAT ISI YALITIMI - XPS	8	
		BİTÜMEN	0,2	
		EĞİM BETONU	5	
		BETONARME DÖŞEME	15	
		SIVA	2	
DUVAR		BETON PANEL	2	0,467
		HAVA	5	
		SIVA	3	
		ISI YALITIMI - XPS	3	
		TUĞLA	19	
		SIVA	2	
		BOYA	0,013	
ARA KAT DÖŞEME		HALI	1	1,585
		ŞAP	5	
		BETONARME DÖŞEME	12	
		SIVA	2	
ZEMİN KAT DÖŞEME		AHŞAP KAPLAMA	2	0,537
		ŞAP	3	
		ISI YALITIMI - XPS	2	
		İKİ KAT SU YALITIMI	0,3	
		ŞAP	5	
		GROBETON	15	
		BLOKAJ	10	
		SIKIŞTIRILMIŞ TOPRAK	40	

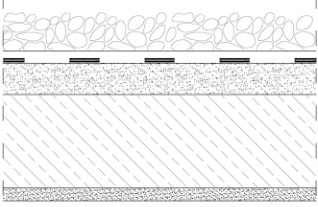
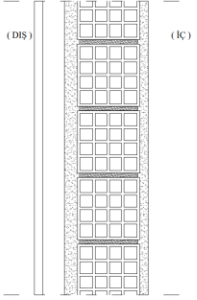
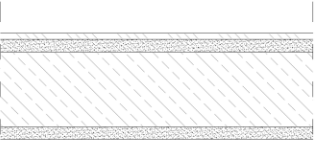
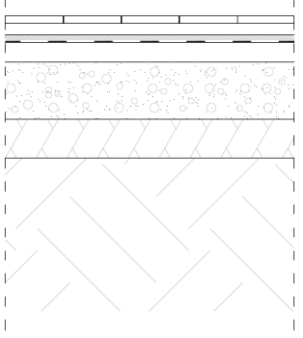
Çizelge A.3.2 Kontrol katmanlaşması – yalıtımsız.

BİNA ELEMEN	TEKNİK DETAYLAR	KATMANLAŞMA	MALZEME KALINLIĞI (cm)	U (W/m ² -K)
ÇATI		ÇAKIL	5	2,022
		KEÇE	2	
		BİTUMEN	0,2	
		EĞİM BETONU	5	
		BETONARME DÖŞEME	15	
		SIVA	2	
DUVAR		BETON PANEL	2	0,795
		HAVA	5	
		SIVA	3	
		TUĞLA	19	
		SIVA	2	
		BOYA	0,013	
ARA KAT DÖŞEME		HALI	1	1,585
		ŞAP	2	
		BETONARME DÖŞEME	12	
		SIVA	2	
ZEMİN KAT DÖŞEME		AHŞAP KAPLAMA	2	0,784
		ŞAP	3	
		İKİ KAT SU YALITIMI	0,3	
		ŞAP	5	
		GROBETON	15	
		BLOKAJ	10	
		SIKIŞTIRILMIŞ TOPRAK	40	

Çizelge A.3.3 Jeopolimer katmanlaşması.

BİNA ELEMEN	TEKNİK DETAYLAR	KATMANLAŞMA	MALZEME KALINLIĞI (cm)	U (W/m ² -K)
ÇATI		ÇAKIL	5	0,306
		KEÇE	2	
		İKİ KAT SU YALITIMI	0,8	
		İKİ KAT ISI YALITIMI - XPS	8	
		BİTÜMEN	0,2	
		EĞİM BETONU	5	
		BETONARME DÖŞEME	15	
		SIVA	2	
DUVAR		JEOPOLİMER	2	0,463
		HAVA	5	
		SIVA	3	
		ISI YALITIMI - XPS	3	
		TUĞLA	19	
		SIVA	2	
		BOYA	0,013	
ARA KAT DÖŞEME		HALI	1	1,585
		ŞAP	5	
		BETONARME DÖŞEME	12	
		SIVA	2	
ZEMİN KAT DÖŞEME		AHŞAP KAPLAMA	2	0,537
		ŞAP	3	
		ISI YALITIMI - XPS	2	
		İKİ KAT SU YALITIMI	0,3	
		ŞAP	5	
		GROBETON	15	
		BLOKAJ	10	
		SIKIŞTIRILMIŞ TOPRAK	40	

Çizelge A.3.4 Jeopolimer katmanlaşması – yalıtımsız.

BİNA ELEMEN	TEKNİK DETAYLAR	KATMANLAŞMA	MALZEME KALINLIĞI (cm)	U (W/m ² -K)
JEOPOLİMER KATMANLAŞMASI (YALITIMSIZ)		ÇAKIL	5	2,022
		KEÇE	2	
		BİTÜMEN	0,2	
		EĞİM BETONU	5	
		BETONARME DÖŞEME	15	
		SIVA	2	
		JEOPOLİMER	2	0,781
		HAVA	5	
		SIVA	3	
		TUĞLA	19	
		SIVA	2	
		BOYA	0,013	
		HALI	1	1,585
		ŞAP	2	
		BETONARME DÖŞEME	12	
		SIVA	2	
		AHŞAP KAPLAMA	2	0,784
		ŞAP	3	
		İKİ KAT SU YALITIMI	0,3	
		ŞAP	5	
		GROBETON	15	
		BLOKAJ	10	
		SIKIŞTIRILMIŞ TOPRAK	40	

EK A.4: Cephe Kaplama Alternatiflerinin Oluşturduğu Emisyonlar ve Çevresel Etki Hesap Çizelgesi.

Çizelge A.4.1 Alternatiflerin emisyon ve çevresel etki hesap çizelgeleri.

G-İST-Y

Emisyonlar	kg / 1 kWh	Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)	Enerji Tüketimi x Emisyon Miktarı
Karbon dioksit	181127,18	15940	2887167263,34
Karbon monoksit	61,92		987065,73
Nitrojen oksit	142,42		2270251,18
Sülfür dioksit	1,55		24676,64
Partiküller	10,84		172736,50

G-İST-Z

Emisyonlar	kg / 1 kWh	Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)	Enerji Tüketimi x Emisyon Miktarı
Karbon dioksit	181127,18	54010	9782679039,73
Karbon monoksit	61,92		3344505,65
Nitrojen oksit	142,42		7692363,01
Sülfür dioksit	1,55		83612,64
Partiküller	10,84		585288,49

G-Dİ-Y

Emisyonlar	kg / 1 kWh	Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)	Enerji Tüketimi x Emisyon Miktarı
Karbon dioksit	181127,18	6080	1101253259,80
Karbon monoksit	61,92		376496,84
Nitrojen oksit	142,42		865942,73
Sülfür dioksit	1,55		9412,42
Partiküller	10,84		65886,95

G-Dİ-Z

Emisyonlar	kg / 1 kWh	Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)	Enerji Tüketimi x Emisyon Miktarı
Karbon dioksit	181127,18	36250	6565860307,17
Karbon monoksit	61,92		2244738,57
Nitrojen oksit	142,42		5162898,70
Sülfür dioksit	1,55		56118,46
Partiküller	10,84		392829,25

G-İST-Y

Emisyonlar	Enerji Tüketimi x Emisyon Miktarı (kg)	Küresel Isınma Potansiyeli (GWP-kg.CO ₂ .eq)	Asitleştirme Potansiyeli (AP-kg.SO ₂ .eq.)	Ötrafikasyon Potansiyeli (EP- kg.PO ₄ .eq.)
Karbon dioksit	2887167263,34	2887167263,34	1164737,56	295132,65
Karbon monoksit	987065,73			
Nitrojen oksit	2270251,18			
Sülfür dioksit	24676,64			
Partiküller	172736,50			

G-İST-Z

Emisyonlar	Enerji Tüketimi x Emisyon Miktarı (kg)	Küresel Isınma Potansiyeli (GWP-kg.CO ₂ .eq)	Asitleştirme Potansiyeli (AP-kg.SO ₂ .eq.)	Ötrafikasyon Potansiyeli (EP- kg.PO ₄ .eq.)
Karbon dioksit	9782679039,73	9782679039,73	3946516,67	1000007,19
Karbon monoksit	3344505,65			
Nitrojen oksit	7692363,01			
Sülfür dioksit	83612,64			
Partiküller	585288,49			

G-Dİ-Y

Emisyonlar	Enerji Tüketimi x Emisyon Miktarı (kg)	Küresel Isınma Potansiyeli (GWP-kg.CO ₂ .eq)	Asitleştirme Potansiyeli (AP-kg.SO ₂ .eq.)	Ötrafikasyon Potansiyeli (EP- kg.PO ₄ .eq.)
Karbon dioksit	1101253259,80	1101253259,80	444266,27	112572,56
Karbon monoksit	376496,84			
Nitrojen oksit	865942,73			
Sülfür dioksit	9412,42			
Partiküller	65886,95			

G-Dİ-Z

Emisyonlar	Enerji Tüketimi x Emisyon Miktarı (kg)	Küresel Isınma Potansiyeli (GWP-kg.CO ₂ .eq)	Asitleştirme Potansiyeli (AP-kg.SO ₂ .eq.)	Ötrafikasyon Potansiyeli (EP- kg.PO ₄ .eq.)
Karbon dioksit	6565860307,17	6565860307,17	2648791,51	671176,83
Karbon monoksit	2244738,57			
Nitrojen oksit	5162898,70			
Sülfür dioksit	56118,46			
Partiküller	392829,25			

Çizelge A.4.1 (Devam) Alternatiflerin emisyon ve çevresel etki hesap çizelgeleri.

K-İST-Y			
Emisyonlar	kg / 1 kWh	Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)	Enerji Tüketimi x Emisyon Miktarı
Karbon dioksit	181127,18	16040	2905279981,43
Karbon monoksit	61,92		993258,11
Nitrojen oksit	142,42		2284493,66
Sülfür dioksit	1,55		24831,45
Partiküller	10,84		173820,17

K-İST-Z			
Emisyonlar	kg / 1 kWh	Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)	Enerji Tüketimi x Emisyon Miktarı
Karbon dioksit	181127,18	54370	9847884824,85
Karbon monoksit	61,92		3366798,23
Nitrojen oksit	142,42		7743635,93
Sülfür dioksit	1,55		84169,96
Partiküller	10,84		589189,69

K-DİY-Y			
Emisyonlar	kg / 1 kWh	Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)	Enerji Tüketimi x Emisyon Miktarı
Karbon dioksit	181127,18	6130	1110309618,84
Karbon monoksit	61,92		379593,03
Nitrojen oksit	142,42		873063,97
Sülfür dioksit	1,55		9489,83
Partiküller	10,84		66428,78

K-DİY-Z			
Emisyonlar	kg / 1 kWh	Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)	Enerji Tüketimi x Emisyon Miktarı
Karbon dioksit	181127,18	36490	6609330830,58
Karbon monoksit	61,92		2259600,28
Nitrojen oksit	142,42		5197080,65
Sülfür dioksit	1,55		56490,01
Partiküller	10,84		395430,05

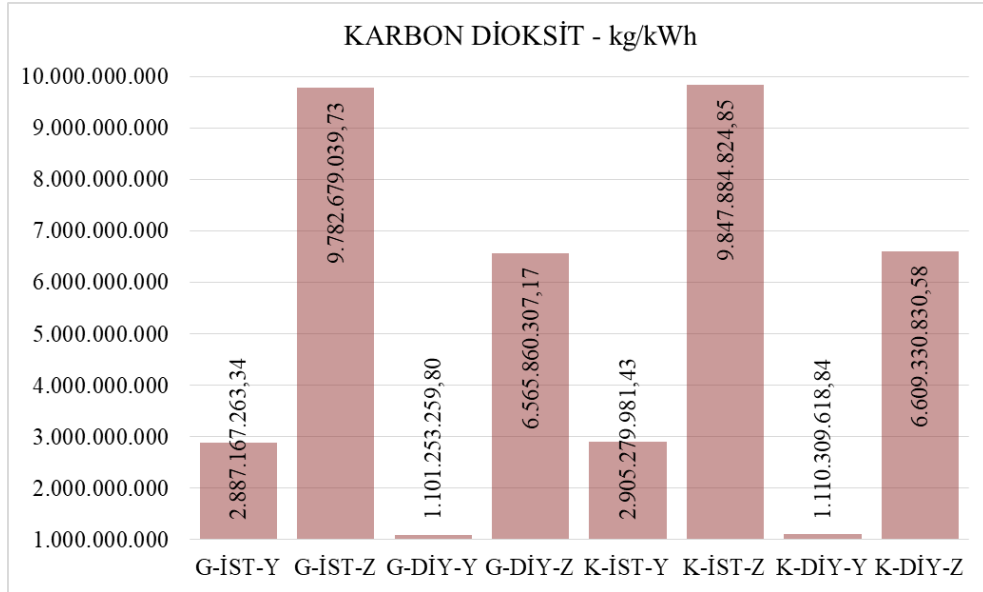
K-İST-Y				
Emisyonlar	Enerji Tüketimi x Emisyon Miktarı (kg)	Küresel Isınma Potansiyeli (GWP-kg.CO ₂ .eq)	Asitleştirme Potansiyeli (AP-kg.SO ₂ .eq.)	Ötrafikasyon Potansiyeli (EP- kg.PO ₄ .eq.)
Karbon dioksit	2905279981,43	2905279981,43	1172044,57	296984,18
Karbon monoksit	993258,11			
Nitrojen oksit	2284493,66			
Sülfür dioksit	24831,45			
Partiküller	173820,17			

K-İST-Z				
Emisyonlar	Enerji Tüketimi x Emisyon Miktarı (kg)	Küresel Isınma Potansiyeli (GWP-kg.CO ₂ .eq)	Asitleştirme Potansiyeli (AP-kg.SO ₂ .eq.)	Ötrafikasyon Potansiyeli (EP- kg.PO ₄ .eq.)
Karbon dioksit	9847884824,85	9847884824,85	3972821,92	1006672,67
Karbon monoksit	3366798,23			
Nitrojen oksit	7743635,93			
Sülfür dioksit	84169,96			
Partiküller	589189,69			

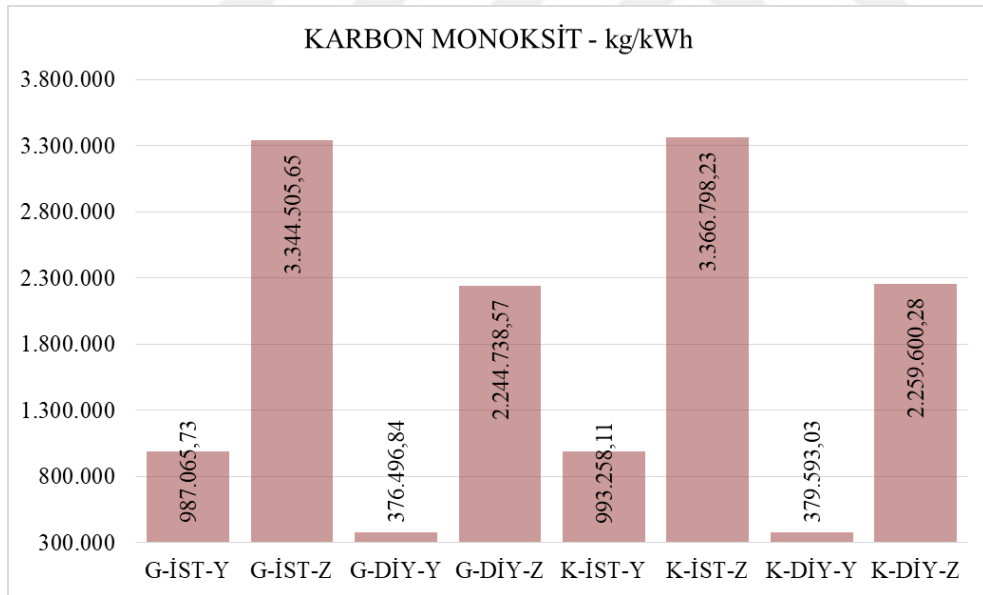
K-DİY-Y				
Emisyonlar	Enerji Tüketimi x Emisyon Miktarı (kg)	Küresel Isınma Potansiyeli (GWP-kg.CO ₂ .eq)	Asitleştirme Potansiyeli (AP-kg.SO ₂ .eq.)	Ötrafikasyon Potansiyeli (EP- kg.PO ₄ .eq.)
Karbon dioksit	1110309618,84	1110309618,84	447919,78	113498,32
Karbon monoksit	379593,03			
Nitrojen oksit	873063,97			
Sülfür dioksit	9489,83			
Partiküller	66428,78			

K-DİY-Z				
Emisyonlar	Enerji Tüketimi x Emisyon Miktarı (kg)	Küresel Isınma Potansiyeli (GWP-kg.CO ₂ .eq)	Asitleştirme Potansiyeli (AP-kg.SO ₂ .eq.)	Ötrafikasyon Potansiyeli (EP- kg.PO ₄ .eq.)
Karbon dioksit	6609330830,58	6609330830,58	2666328,34	675620,48
Karbon monoksit	2259600,28			
Nitrojen oksit	5197080,65			
Sülfür dioksit	56490,01			
Partiküller	395430,05			

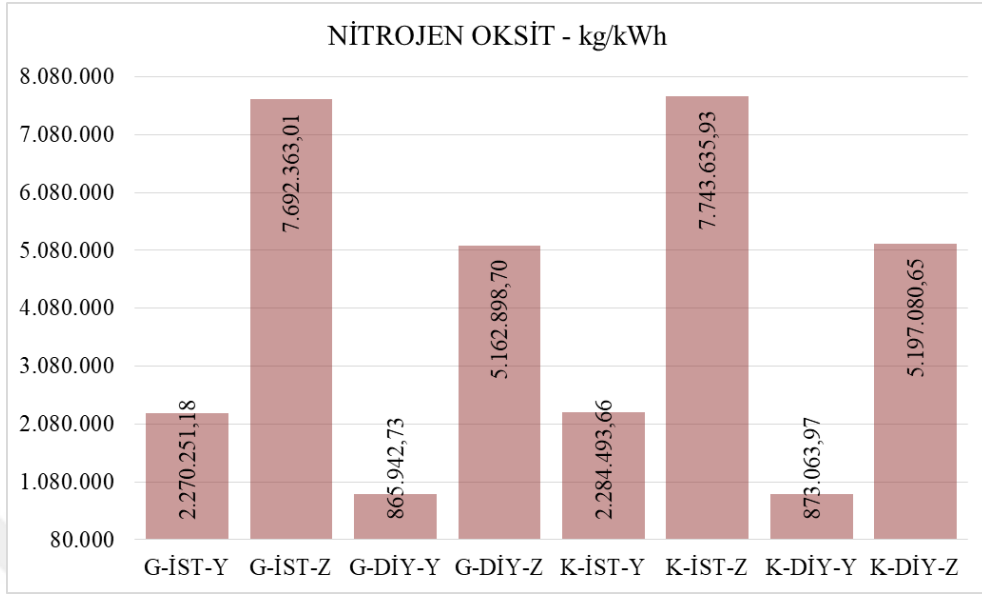
Şekil A.4.1 Alternatiflerin doğal gaz kullanımına bağlı olarak atmosfere salınan karbon dioksit emisyonu.



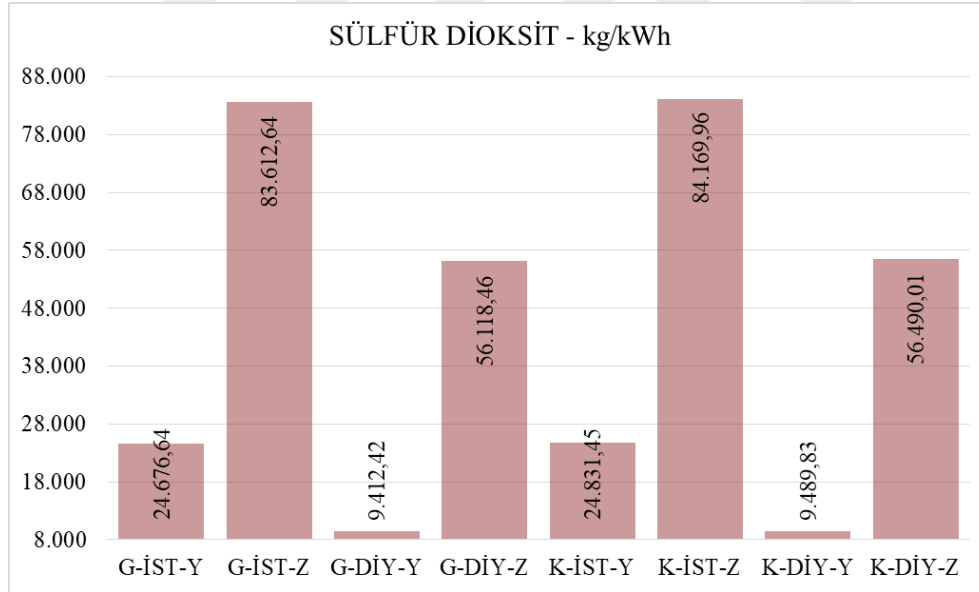
Şekil A.4.2 Alternatiflerin doğal gaz kullanımına bağlı olarak atmosfere salınan karbon monoksit emisyonu.



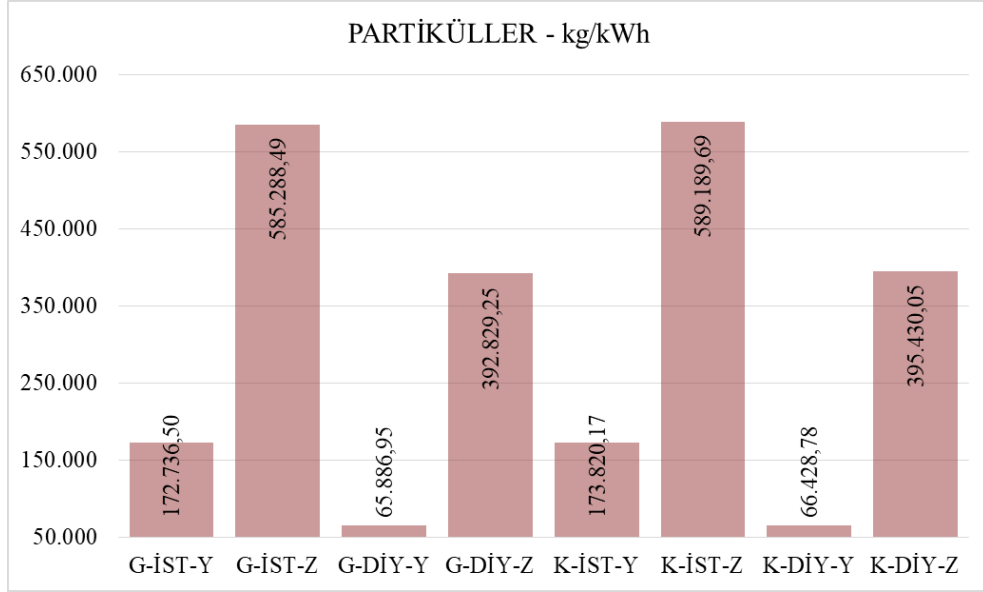
Şekil A.4.3 Alternatiflerin doğal gaz kullanımına bağlı olarak atmosfere salınan nitrojen oksit emisyonu.



Şekil A.4.4 Alternatiflerin doğal gaz kullanımına bağlı olarak atmosfere salınan sülfür dioksit emisyonu.

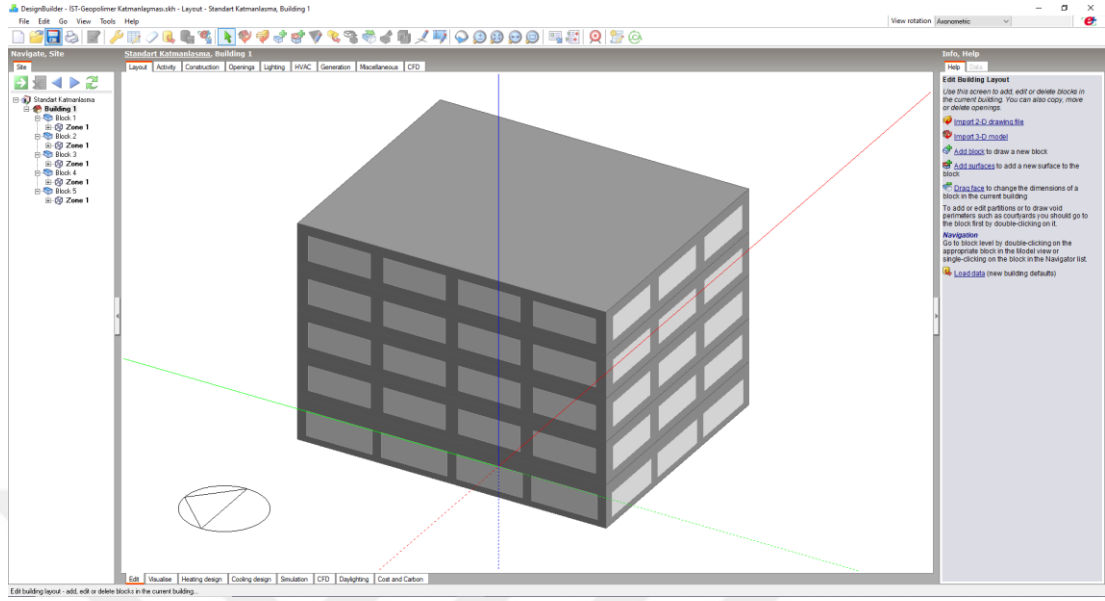


Şekil A.4.5 Alternatiflerin doğal gaz kullanımına bağlı olarak atmosfere salınan partikül emisyonu.

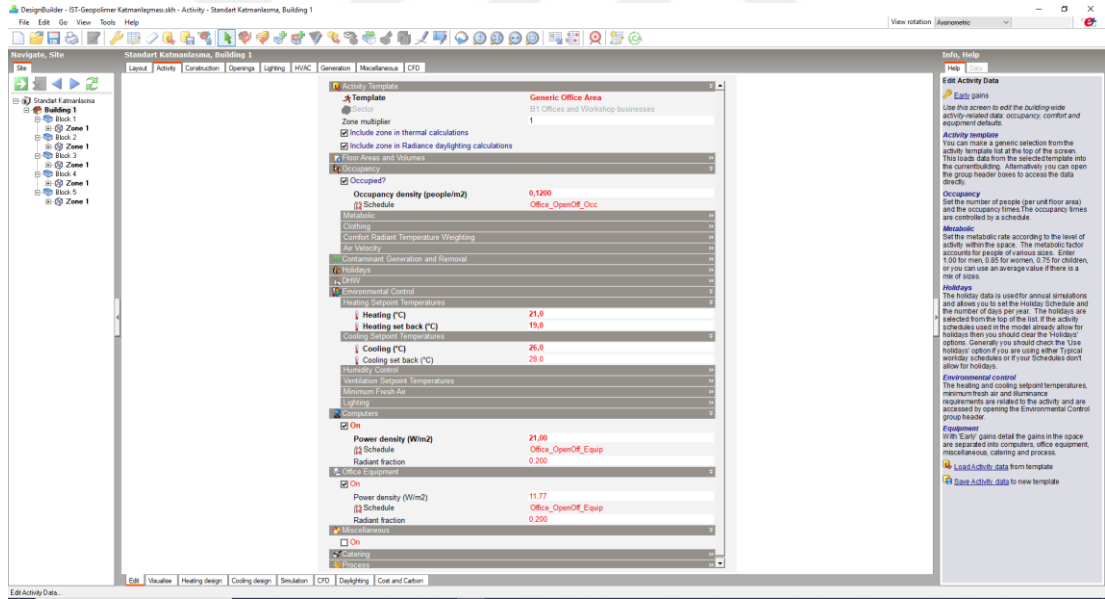


EK A.5: DesignBuilder Programı Ara Yüz.

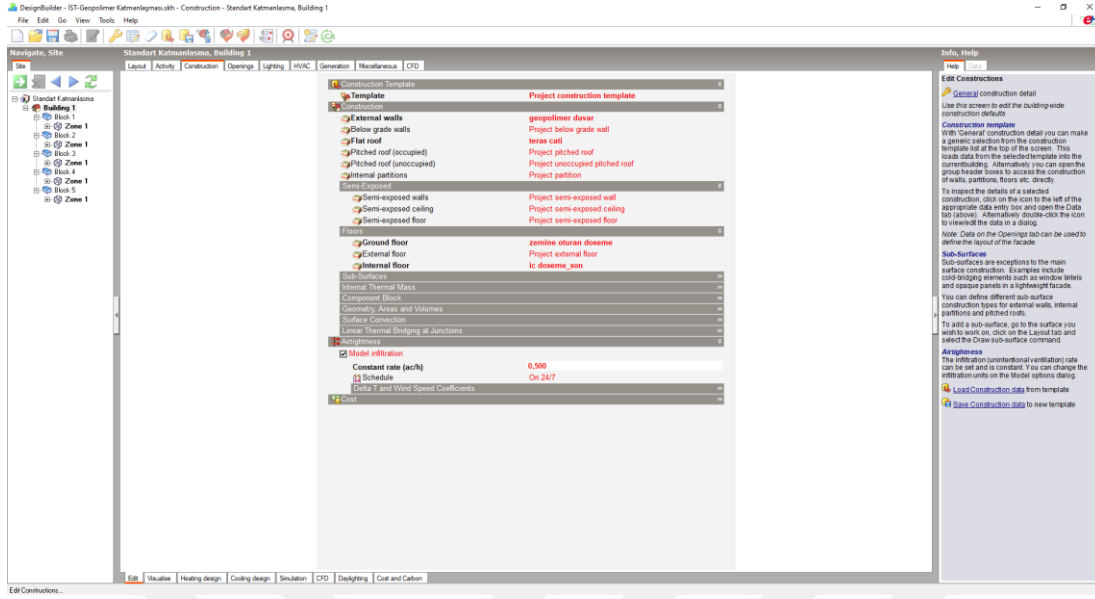
Şekil A.5.1 Giriş Ekranı



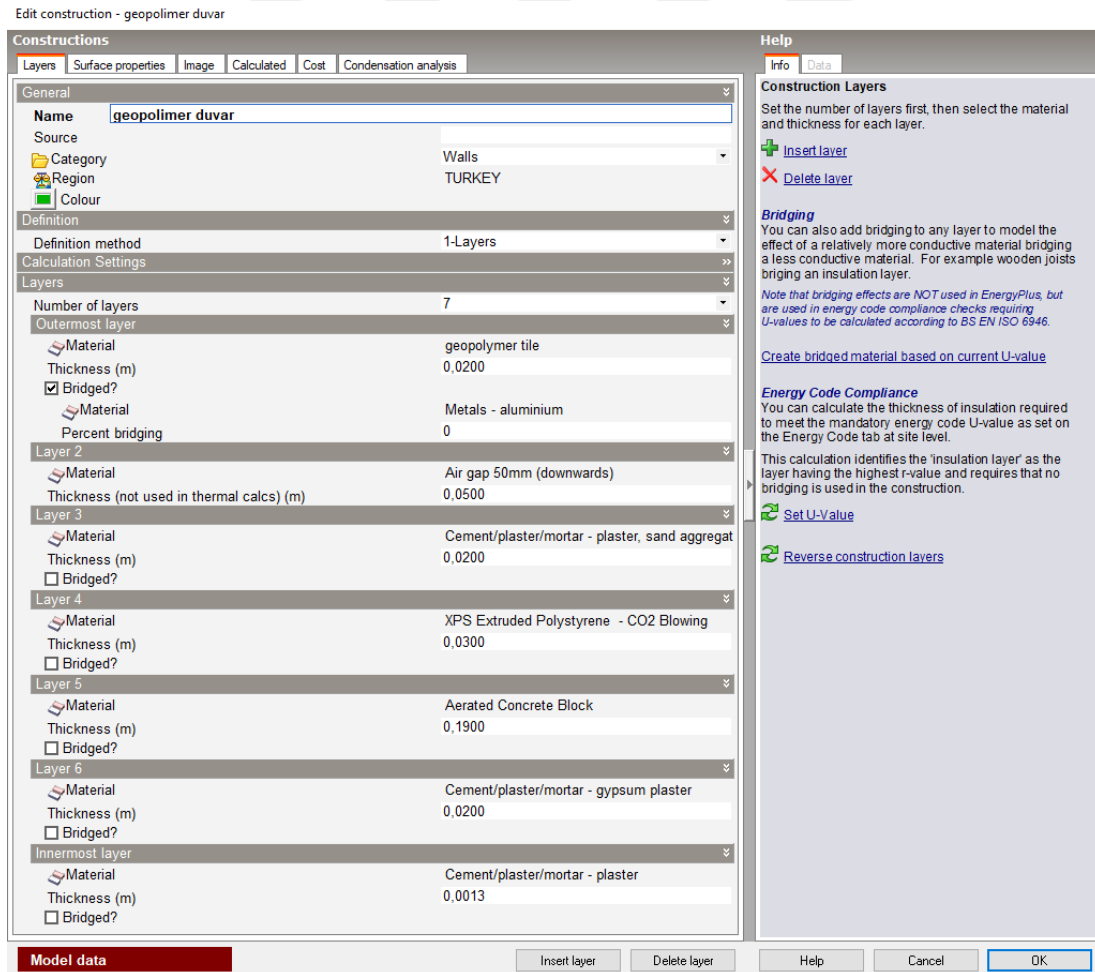
Şekil A.5.2 Activity Sekmesi



Şekil A.5.3 Construction Sekmesi



Şekil A.5.4 Jeopolimer Duvar Özellikleri



Şekil A.5.5 Jeopolimer Malzeme Özellikleri

Edit material - geopolymer tile

Materials

General Surface properties Green roof Embodied carbon Phase change Cost

General

Name: **geopolymer tile**

Description:

Source:

Category: Tiles

Region: General

Material Layer Thickness

☐ Force thickness

Thermal Properties

Detailed properties

Thermal Bulk Properties

Conductivity (W/m-K)	0,4900
Specific Heat (J/kg-K)	1139,00
Density (kg/m3)	1807,70

Resistance (R-value)

Vapour Resistance

Moisture Transfer

Help

Material Data

Materials are used to define the properties of construction layers. There are 2 types of material:

- Detailed properties** including the thermo-physical properties, surface properties and visual appearance for the material.
- Simple resistive material** with no thermal mass. This option will typically be used to model air gaps.

Model data

Help Cancel OK

Şekil A.5.6 Openings Sekmesi

DesignBuilder - IST-Geopolimer Katmanlasmasi.ksh - Openings - Standard Katmanlasma, Building 1

File Edit Go View Tools Help

Standard Katmanlasma, Building 1

Layout Activity Construction Openings Lighting HVAC Generation Miscellaneous CFD

Openings

Double glazing, clear, LoE, argon filled

External Windows

Glazing type: Old LoE (42+1) Cl 6mm13mm Arg

Layout: Preferred height 1.5m, 30% glazed

Dimensions

Type	3 Preferred height
Window to wall %	50.00
Window height (m)	2.00
Window spacing (m)	0.00
Sill height (m)	0.50
Outside reveal depth (m)	0.000

Frame and Dividers

Shading

Surface Control Windows

Free Apertures

Internal Windows

Shaped fixed windows/daylights

Doors

Vents

Help

Edit Glazing/Doors/Vents

Use this screen to edit the building-wide glazing, door, vent and shading defaults.

Glazing template

You can make a generic selection from the glazing template list at the top of the screen. This loads glazing and frame construction data from the selected template into the current building. You can also open the group header boxes to access the data directly.

Glazing

To inspect the details of the currently selected glazing type, click on the Glazing type icon. Alternatively, double click the icon to view the data in a dialog.

Facade types

There are a number of standard facade types:

- None - there is no glazing.
- Continuous horizontal - glazing is generated in a continuous horizontal strip using sill height and window to wall %.
- Fixed height - glazing is generated with a fixed height at the specified sill height, and width is calculated based on the window to wall %. This option uses Window to wall % but prioritises window height.
- Preferred height - glazing is generated using the window height data and the window to wall %, but the window height may be adjusted to achieve the required window to wall %. This option uses window and sill height but prioritises window to wall %.
- Fixed width and height - window frame fixed width and height. This option uses window to wall % but prioritises window width and height.
- Fill surface (100%) - the entire surface is fixed with glazing and there is no frame.

If the glazing does not have a frame, uncheck the 'Add a frame?' box.

Note that you can control the makeup of the building facade in greater detail by drawing individual windows, doors, vents, sub-surfaces and holes at the surface level.

Doors

DesignBuilder doors are opaque and are added to the model by manipulating the appropriate surface and checking the 'Auto generate' option. This adds a single door replacing one of the windows.

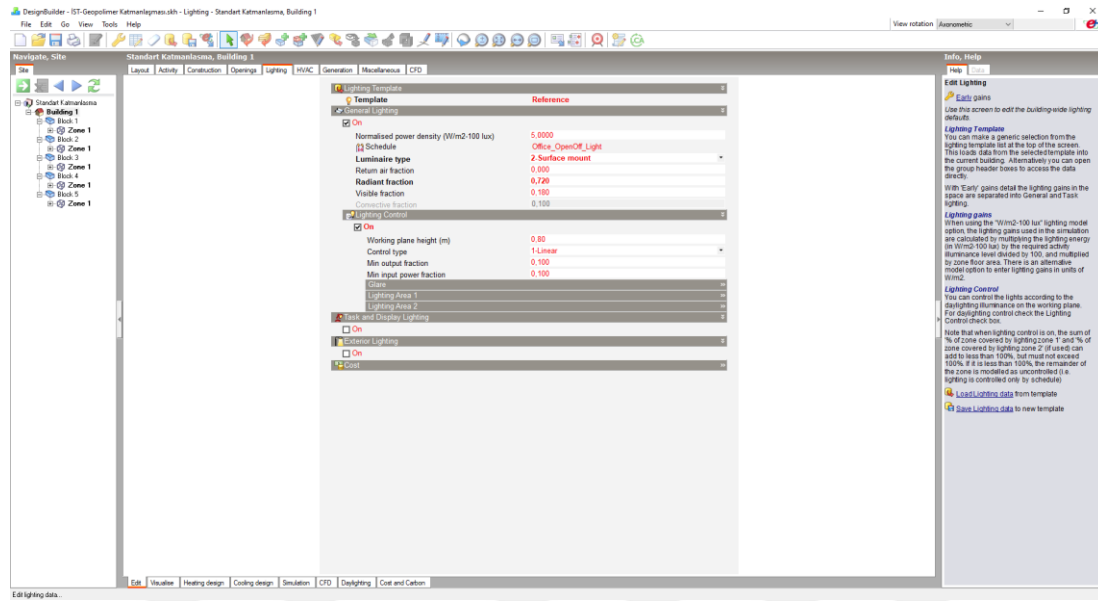
For more control over the placement position of the doors, you should go to surface level and draw the doors using the 'Draw door' command. You can inspect the door construction data in the same way as for the Glazing type (above).

Doors

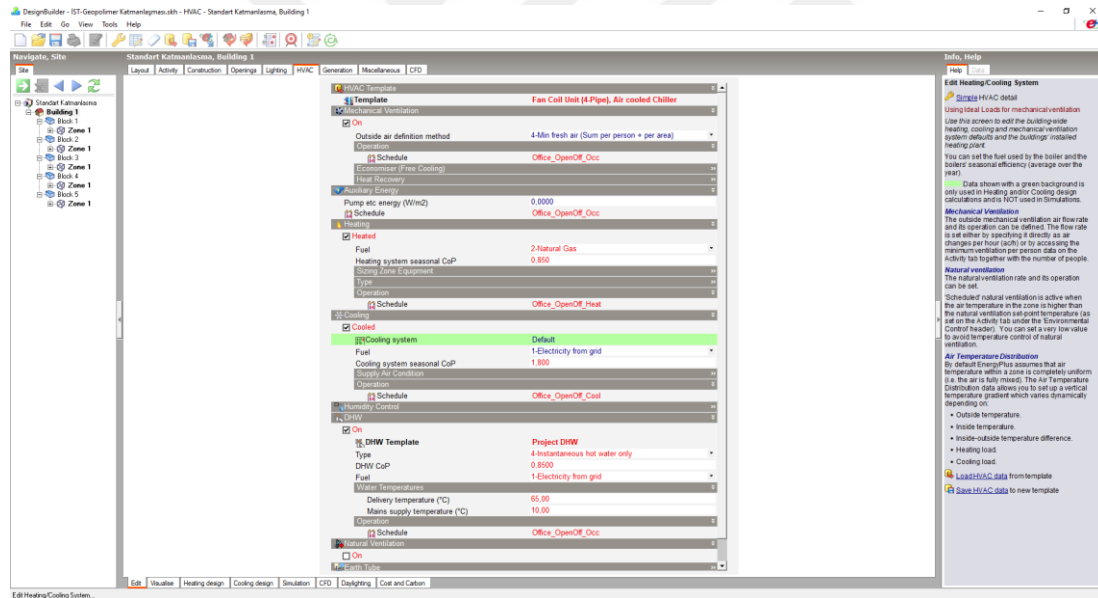
Ed Glazing/Doors/Vents.

Ed Visuals Heating design Cooling design Simulation CFD Daylighting Cost and Carbon

Şekil A.5.7 Lighting Sekmesi



Şekil A.5.8 HVAC Sekmesi



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Aslıhan KAYHAN

--

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, FMV Işık Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık (İngilizce-Tam Burslu)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019-2022 yılları arasında Has+Koen Mimarlık Şirketinde mimari ve iç mimari projelerde yer aldı.

TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kayhan, A. ve Özgünler Acun, S.** (2021). Sürdürülebilir Beton Çalışmaları Kapsamında Jeopolimer Betonun İncelenmesi. A., Gül, Ö., Demirel, S., Seydoşoğlu S. (Editör), *1st International Architectural Sciences and Application Symposium*, (s. 1395-1409). Isparta.