

Sürdürülebilir Geopolimer Harçların Yaşam Döngüsü ve Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi: Farklı Senaryolar Üzerine Bir Çalışma

Ezgi Örklemes^{1*}, Brial Asif Hayi Paka¹, Ahmet Ceylan², Serhan İlkentapar¹, Uğur Durak¹, Okan Karahan¹, Cengiz Duran Atış¹

¹ Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, KAYSERİ

² Kayseri Şeker Fabrikası A.Ş., KAYSERİ

* Sorumlu Yazar : Ezgi Örklemes

(Alınış / Received: 16.12.2024, Kabul / Accepted: 07.01.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 31.01.2025)

Anahtar Kelimeler

Geopolimer
Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
Uçucu Kül
Diatomit
Sürdürülebilirlik

Öz: Uçucu kül esaslı geopolimer bağlayıcıların mekanik özellikleri inşaat ve yapı sektöründe kullanımı için önem arz etmektedir. Ayrıca inşaat ve yapıda kullanılacak malzemelerin mekanik özelliklerinin yanı sıra iklim değişikliği ile mücadelede Avrupa Yeşil Mutabakatı'nda (European Green Deal) yer alan çevresel hedefler inşaat sektöründe yakından ilgilendirmektedir. Bu kapsamda bu çalışmada, bağlayıcı olarak F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer numunelerin mekanik özellikleri ve çevresel etkileri üzerinde diatomit ikamesinin etkisi araştırılmıştır. Karışımlarda, bağlayıcı malzeme ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında diatomit ile ikame edilerek geopolimer harçlar üretilmiştir. Geopolimer numunelere 90°C'de 24, 48 ve 72 saat ısıtma uygulanmıştır. Geopolimer numuneler üzerinde farklı kür sürelerinde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca numunelerin mikro yapısını incelemek için diatomit ikameli geopolimer hamurların FESEM görüntüleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre %1, %2 ve %3 oranlarında diatomit içeren harçların eğilme ve basınç dayanımlarında artış olduğu görülmüştür. En yüksek mekanik dayanım sonucu %3 diatomit içeren harçlarda gözlenmiştir. FESEM görüntüleri sonucunda %3 diatomit ikamesi ile üretilen geopolimerin daha yoğun ve kompakt bir mikro yapı sunduğu belirlenmiştir. Ayrıca farklı senaryolara göre diatomit ikameli ve diatomit ikamesiz geopolimer harçların olumlu ve olumsuz çevresel etkileri belirlenmiştir. Sonuç olarak çevreci üretilmek istenen geopolimer harçlara çevresel çıktı olarak etki eden diatomit oranı, aktivatör oranı, aktivatör türü, kür süresi, kür sıcaklıkları ve hammaddeye ulaşım mesafesi gibi faktörlerin görece olumlu ve olumsuz sonuçları irdelenmiştir.

Assessment of Life Cycle and Mechanical Properties of Sustainable Geopolymer Mortars: A Study on Different Scenarios

Keywords

Geopolymer
Life Cycle Assessment
Fly Ash
Diatomite
Sustainability

Abstract: The mechanical properties of fly ash-based geopolymer binders are significant importance for their application in the construction and building sectors. Moreover, in addition to the mechanical properties of materials used in construction, environmental goals outlined in the European Green Deal, aimed at combating climate change, are also highly relevant to the construction industry. Within this scope, this study investigates the effects of diatomite substitution on the mechanical properties and environmental impacts of geopolymer samples produced using Class F fly ash as the binder. Geopolymer mortars were prepared by substituting the binder material with diatomite at ratios of 1%, 2%, 3%, 4%, and 5% by weight. The geopolymer samples were subjected to heat curing at 90°C for 24, 48, and 72 hours. Flexural and compressive strength tests were conducted on the geopolymer samples at different curing durations. Additionally, the microstructure of the diatomite-substituted geopolymer pastes was examined using FESEM imaging. The results showed that mortars containing 1%, 2%, and 3% diatomite exhibited improvements in flexural and compressive strength. The highest mechanical strength was observed in mortars with 3% diatomite. FESEM

images revealed that the geopolymer produced with 3% diatomite substitution exhibited a denser and more compact microstructure. Furthermore, the positive and negative environmental impacts of diatomite-substituted and non-substituted geopolymer mortars were identified under different scenarios. In conclusion, factors such as the diatomite ratio, activator ratio, activator type, curing duration, curing temperature, and raw material transportation distance, which influence the environmental footprint of geopolymer mortars, were evaluated for their relatively positive and negative effects on producing environmentally friendly geopolymer mortars.

1. Giriş

Beton; su, çimento, agrega ve/veya katkı maddelerinden oluşan en yaygın yapı malzemelerinden birisidir. Beton üretiminde kullanılan çimento ise temel bir bağlayıcı malzeme olmasına rağmen, çimento üretimi atmosfere yüksek oranda CO₂ emisyonuna sebebiyet vermektedir. Bu emisyonun bir sebebi çimento üretiminin yoğun enerji gerektiren bir süreç olmasıdır [1]–[3]. Beton ve çimento sistemlerinin mevcut olan bu çevresel etkileri araştırmacıları daha çevreci yapı malzemelerine yönlendirmiştir. Bu çevreci olan yapı malzemelerinden birisi olan geopolimerlerin sentezinde cüruf, silis dumanı ve uçucu kül bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Geopolimer sentezinde tek tip bağlayıcının tek başına bir aktivatör ile kullanılması mümkün olduğu gibi farklı bağlayıcı grupları ve farklı aktivatörlerin birlikte kullanımını da mümkündür [4]–[9].

Çevreci geopolimer malzemeleri üretmek için kullanılan bağlayıcılardan birisi de uçucu küllerdir. Uçucu kül yapısında amorf bir yapıda bol miktarda reaktif alümina ve silika içerdiğinden yüksek puzolanik özellik göstermektedir [10]. Geopolimer bağlayıcıların sentezlenmesinde aktivatörler ve kür süreçleri önemli bir yer tutmaktadır. Öyle ki alkali aktivatörler, bağlayıcı yapıdaki katı alüminyum oksit ve silisyum oksidi çözmek için çok önemli bir rol oynamaktadır. Geopolimer sentezinde mekanik mukavemeti etkileyen diğer önemli faktör ise kürlenme sıcaklığıdır [11]–[17]. Kürlenme sıcaklıkları bağlayıcı ve aktivatör türüne bağlı olarak uygulanmakta olup oda sıcaklığından yüksek sıcaklıklara kadar değişebilmektedir. Kürlenme sıcaklıklarına ek olarak, kürlenme süreleri mekanik mukavemeti etkileyen başka bir faktör olarak belirlenmiştir [14], [18]–[20].

Uçucu kül tabanlı üretilen geopolimerin oda ısısında aktivasyonu uzun sürmekte ve mekanik dayanımının gelişimi çok zaman almaktadır [21], [22]. En düşük aktivasyon enerjisinin NaOH ile ayrı ayrı aktive edilen metakaolin, cüruf ve uçucu kül bazlı geopolimer bağlayıcı sistemlerde olduğu 20°C sıcaklıkta izotermal kalorimetre ile yapılan çalışmalarda açıklanmıştır [23].

Geopolimer üretiminde doğal puzolanların katkı olarak kullanılması son yıllarda yaygın hale gelmiştir. Bu doğal puzolanlardan birisi olan diatomit, amorf silisli fosilleşmiş tortulardan meydana gelmektedir. Amorf silika içeriğine ek olarak, diatomit genellikle karbonatlı ve killi mineraller, düşük kuvars ve feldispatlar içermektedir. Geniş yüzey alanları (geniş yüzey/yüksek hacim oranı), yüksek su emme veya tutma kapasiteleri gibi farklı özelliklere sahiptirler. Gözenekli mikro yapısı, hafifliği ve düşük ısı iletkenliği nedeniyle genellikle yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadır [24]. Diatomitin amorf silika içeriği sayesinde, diatomitlerin geopolimer bağlayıcıların üretilmesinde iyi bir doğal kaynak olarak alternatif olacağı düşünülmektedir.

Literatürde yapılan önceki çalışmalarda geopolimer üretiminde silika dumanı yerine diatomitin kullanıldığı [25] bununla birlikte %100 oranına kadar diatomit ile geopolimer üretildiği ve burada aktivatör olarak Na₂SiO₃ ve NaOH kullanıldığı belirtilmiştir [26], [27]. Hafif agrega ile üretilen geopolimer sistemlerde diatomit ikamesi ile ısı iletkenlik katsayılarının düşürüldüğü rapor edilmiştir [28].

Gerek geopolimer sistemlerde gerekse geleneksel bağlayıcılarda sürdürülebilirlik gün geçtikçe daha önemli hale gelmektedir. Gerçek dünya verilerine dayalı sürdürülebilirlik faktörlerinin ölçülmesi, çeşitli çevresel etki kategorilerinde farkındalığın artırılması için son derece önem arz etmektedir. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD)-Life Cycle Assessment (LCA), inşaat sektöründe yapı malzemelerinin de faydalandığı tüm yaşam döngüsü veya belirtilen dönem boyunca çevresel etkilerini ölçmek ve değerlendirmek için kullanılan kritik bir metodolojidir. YDD verilerinin önemi, Çevresel Ürün Beyanları- Environmental Product Declaration (EPD'ler) gibi bilgi tabanlı belgeler oluşturmada da karşımıza çıkmaktadır. YDD'nın EPD'lerle ve ISO standartlarına uyumla birleştirilmesi, inşaat sektöründe sürdürülebilir uygulamaları teşvik etmektedir. Öyle ki önceki araştırmalarda, alkali ile aktive edilmiş ve geopolimer sistemler geleneksel çimentolu sistemlere kıyasla daha iyi çevresel performans sergilediği rapor edilmiştir. Buna ek olarak, bu çevreci sistemlerin geleneksel sistemlere göre %28 ile %80 daha az sera gazı emisyonuna sebebiyet verdiği belirtilmiştir [29]–[35].

Literatürdeki birçok geopolimer karışım tasarımı küresel ısınma potansiyelini (GWP) azaltarak daha olumlu sonuçlar göstermesine rağmen, aktivatörlerin diğer konsantrasyon etkisi kategorileri üzerindeki etkisinin geleneksel çimentolu karışımlara göre daha belirgin olduğu belirtilmiştir. McLellan vd. (2011), [36] geopolimer sistemlerin iklim değişikliği ile mücadelede belirli bir potansiyele sahip olduğunu bunula birlikte kullanılan taşıma türü, malzeme kaynağı ve enerjinin sera gazı emisyonlarını azaltabileceğini bildirilmiştir. Geopolimer sistemler için uygun olmayan bir bileşen ve/veya süreç seçilmesinin iklim değişikliği üzerinde daha negatif etkiye neden olabileceği vurgulanmıştır. Geopolimer betonun CO₂ emisyonlarından sorumlu diğer faktörlerin ise geopolimerlerde kullanılan alkali aktivatörlerin (hammadde madenciliğinden üretim sürecine kadar) ve yüksek hızlı kütleme süreçlerinin olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada, yüksek karbon emisyonlarına neden olan çimento yerine daha ekonomik ve sürdürülebilir bir malzeme olan geopolimer bağlayıcı malzemelerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada uçucu kül ana bağlayıcı olarak, diatomit ise uçucu küle ikame edilen bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Diatomit katkılarının geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanımları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Buna ek olarak, geleneksel çimentolu harçların ve uçucu kül bazlı geopolimer harçların çevresel etkileri, yaşam döngüsü analizi yoluyla farklı senaryolar ile karşılaştırılmıştır.

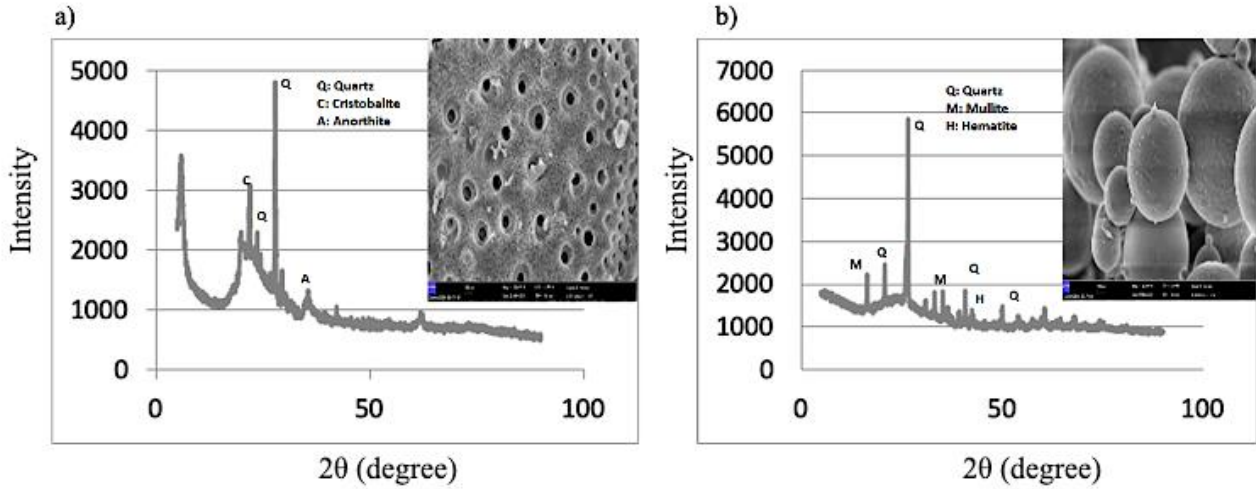
2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışma kapsamında kullanılan diatomit, Türkiye'nin Kayseri ili Hırka kasabasında bulunan diatomit yatağından elde edilmiştir. F sınıfı uçucu kül ise Zonguldak'taki Çatalağzı Termik Santralinden sağlanmıştır. **Tablo 1**'de diatomit ve uçucu külün kimyasal kompozisyonu verilmiş olup, **Şekil 1(a)** ve **1(b)**, de bağlayıcı malzemelerin FESEM görüntüsü ve XRD deseni sunulmuştur.

Tablo 1. Çatalağzı F sınıfı uçucu kül ve diatomitin kimyasal kompozisyonu

Oksit (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	SO ₃	Cl ⁻	P ₂ O ₅	TiO ₂	Kızdırma Kaybı
Uçucu Kül	52.60	27.02	6.98	4.55	0.75	1.59	2.85	0.23	0.0043	-	-	3.42
Diatomit	75.70	6.55	3.82	0.99	0.87	1.2	2.68	-	-	0.48	0.26	7.39



Şekil 1. a) Diatomit; FESEM görüntüsü ve XRD deseni b) Uçucu kül; FESEM görüntüsü ve XRD deseni

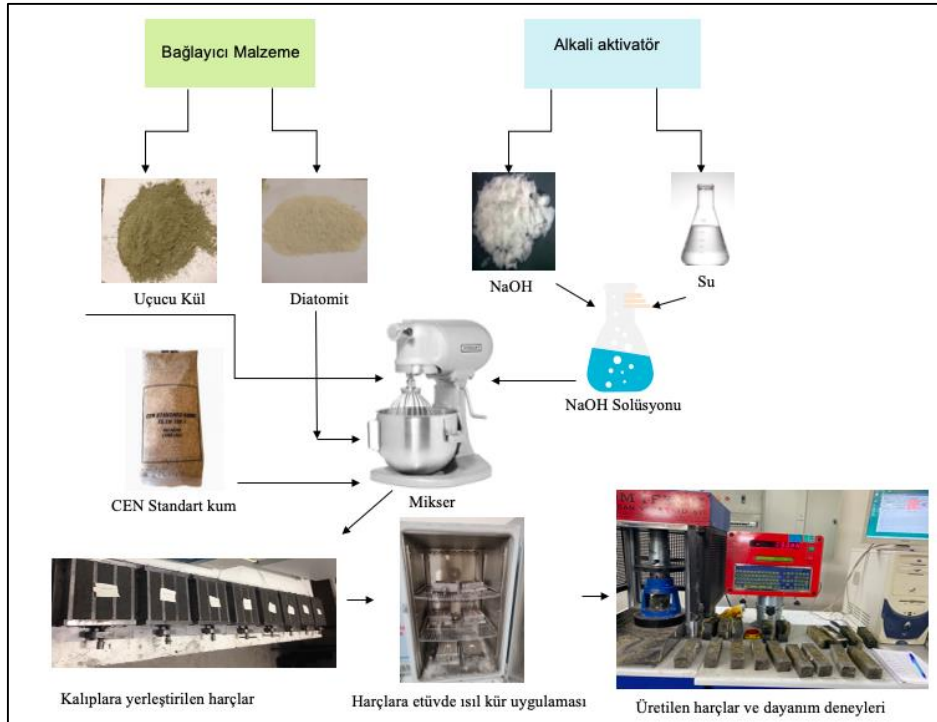
Geopolimer harç üretimi için TS EN 196-1 [37]'e uygun CEN standart kumu ve aktivatör olarak NaOH kullanılmıştır. Aktivatörün kimyasal içeriği en az %97 saflık içermektedir. Harç karışımlarında içilebilir su kullanılmış olup TS EN 1008'e göre harç karışımında içilebilir su kullanımının uygunluğu belirtilmiştir. Uçucu kül ile imal edilen referans harcı (D0) ve diatomit ikameli harçlardan oluşan toplam 6 grup geopolimer harç üretilmiştir. Bu harçların karışım oranları **Tablo 2**'de sunulmuştur. Çözeltideki Na⁺ oranı bağlayıcı miktarının %10'u olarak belirlenmiştir. Bağlayıcı/kum oranı 3 ve bağlayıcı/su oranı 0,31 olarak seçilmiştir. Diatomit ikameleri toplam bağlayıcı miktarının uçucu küle göre ağırlıkça %1 (D1), %2 (D2), %3 (D3), %4 (D4) ve %5 (D5)'i olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. Harçların karışım oranları

Harç Kodu	Uçucu Kül (g)	Diatomit (g)	Kum (g)	Na ⁺ (%)	Su (g)
D0	450	-	1350	10	140
D1	445.5	4.5	1350	10	140
D2	441	9.0	1350	10	140
D3	436.5	13.5	1350	10	140
D4	432	18.0	1350	10	140
D5	427.5	22.5	1350	10	140

2.2. Metot

Geopolimer harçların üretim süreci **Şekil 2**'de gösterilmiştir. Geopolimer harçlar üretilirken, bağlayıcı malzemeye göre ağırlıkça %10 Na⁺ içeren NaOH çözeltileri 24 saat önce hazırlanmıştır. Uçucu kül tabanlı geopolimer harçlara toplam bağlayıcının ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5'i oranına denk gelecek şekilde diatomit ikamesi yapılmıştır. Harç için karıştırma kabına yerleştirilen bağlayıcı ve NaOH çözeltisi 30 saniye boyunca yavaşça karıştırılmış sonrasında 1350 g standart kum eklenmiştir. Karıştırma işlemine düşük devirde 60 saniye devam edildikten sonra mikser durdurularak karıştırma kabı etrafındaki harç ortada toplanarak toplam 90 saniye dinlendirilmiştir. Karıştırma işlemine yüksek devirde 60 saniye daha devam edilerek karıştırma işlemi sonlandırılmıştır. Harç karışımları 40x40x160 mm ölçülerindeki çelik kalıplara iç kısımları yağlanarak sarsma tablası vasıtasıyla titreşimle yerleştirilmiştir. Daha sonra 90 °C'de önceden ısıtılmış fırına geopolimer harç numuneler yerleştirilmiş ve 24 saat, 48 saat ve 72 saat boyunca ısı küre tabi tutulmuştur. Kütleme işlemi tamamlandıktan sonra, numuneler fırından çıkarılmış, oda sıcaklığına soğumaya bırakılmış ve deney için hazır hale getirilmiştir. Kür sonrası elde edilen harç numuneleri eğilme ve basınç dayanımına tabi tutulmuştur. Numunelerin mikro yapısını analiz etmek için, geopolimer hamur numuneleri hazırlanmış ve FESEM görüntüleri alınmıştır.

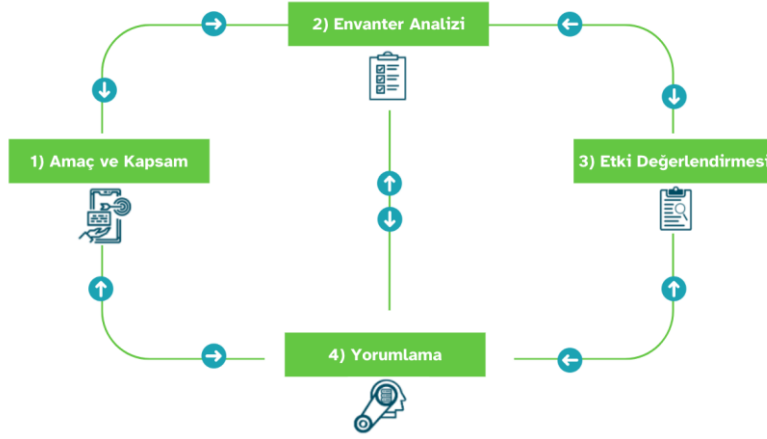
**Şekil 2.** Geopolimer harçların üretim süreci

Deneyel çalışmalar kapsamında eğilme ve basınç testleri TS EN 196-1 standardına göre yapılmıştır. Her bir seri için 40x40x160 mm ebatlarında üretilen üç adet uçucu kül ve diatomit ikemeli geopolimer numuneler üzerinde tek nokta eğilme testi yapılmıştır. İkiye bölünen ve toplam altı adet kalan harç numunelere basınç testi yapılmıştır. Testler tamamlandıktan sonra sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır. Alan Taramalı Elektron Mikroskopu (FESEM), geopolimer hamur örneklerinin mikro yapısı üzerinde diatomit ilavesinin etkisini değerlendirmek için incelenmiştir. Geopolimer hamur karışımı kum olmadan ve harç karışımlarının aynı karışım oranıyla hazırlanmıştır. Geopolimer hamur (D0, D1, D2, D3, D4, D5) 90°C'lik bir fırında 24 saatlik ısı küre tamamlandıktan sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilmiştir. Soğuyan numuneler altın paladyum

kaplaması yapılarak Zeiss (GeminiSEM 500) cihazı ile 1000, 20000 büyütme oranlarında görüntülemeler yapılmıştır.

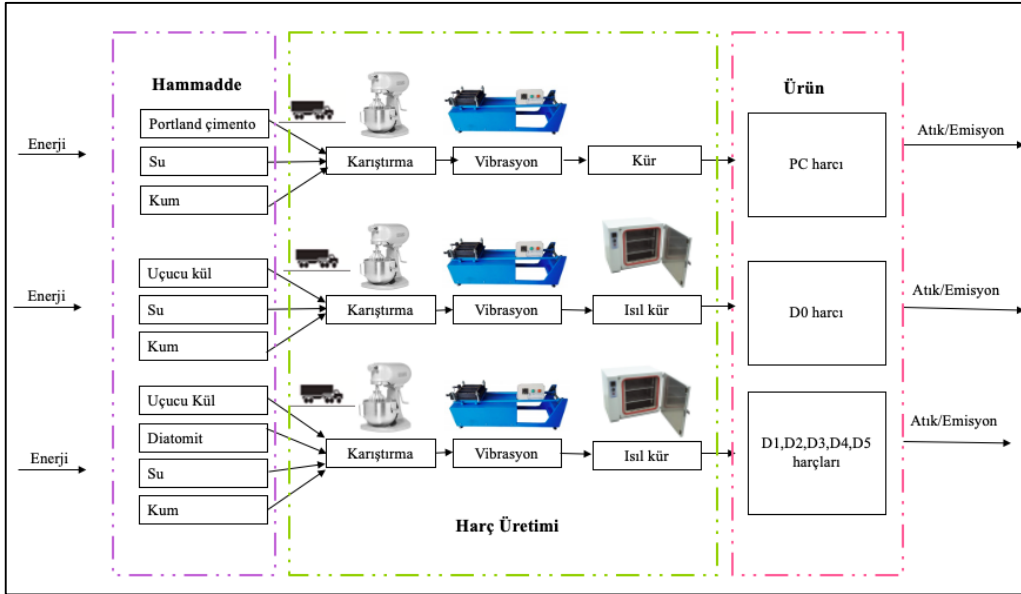
2.2.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD)

YDD, bir sürecin, ürünün veya hizmetin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir metodolojidir. ISO 14040 ve 14044'e [31], [38] göre YDD **Şekil 3**'te gösterildiği gibi dört ana aşamadan oluşmaktadır: Bu aşamalar amaç ve kapsam tanımı, envanter analizi, etki değerlendirme ve yorumlamadır.



Şekil 3. YDD aşamaları

Bu çalışma kapsamında YDD'nin temel amacı üretilen harç örneklerinin çevresel etkilerini ölçmek ve birbirileri ile karşılaştırmaktır. Bu bağlamda, çimento esaslı (PC) harç, geopolimer kontrol harcı (D0) ve %1, 2, 3, 4 ve 5 diatomit ikameli geopolimer harçların (D1, D2, D3, D4 ve D5) çevresel etkileri analiz edilmiştir. Birim fonksiyon 1 m³ olarak seçilmiş ve hammaddenin çıkarılmasından harç üretimine kadar yaşam döngüsü aşamalarını kapsayan beşikten kapiya yaklaşımı izlenmiştir. Geopolimer harçların sistem sınırları **Şekil 4**'te sunulmuştur.



Şekil 4. Harçların sistem sınırları (beşikten kapiya yaklaşım)

Harç karışımlarının hammade miktarları, enerji tüketimi ve su kullanımına ilişkin birincil envanter verileri laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalardan uyarlanmıştır. Bu çalışmada hammaddelerin (portland çimentosu, uçucu kül, kum, sodyum hidroksit, diatomit) 16-32 ton ağırlığındaki EURO 4 dizel yakıtlı bir kamyonla karayoluyla taşındığı varsayılmıştır. Taşıma mesafeleri Google Haritalar kullanılarak (portland çimentosu (50 km), uçucu kül (630 km), kum (980 km), sodyum hidroksit (379 km), diatomit (35 km)) olarak belirlenmiştir. Çimento esaslı PC harcı üretmek için dayanım sınıfı 42,5 ve özgül ağırlığı 3,14 g/cm³ olan Portland çimentosu ve CEN standardı RILEM kumu kullanılmıştır. Hammade üretimi, enerji ve taşıma verileriyle ilgili ikincil veriler SimaPro 9.5 yazılımında Ecoinvent 3.9.1 veri tabanından ve literatür taramasından elde edilmiştir. Mevcut yaşam döngüsü değerlendirmeleri, **Tablo 3**'te verilen üç vaka senaryosu ile detaylandırılmıştır.

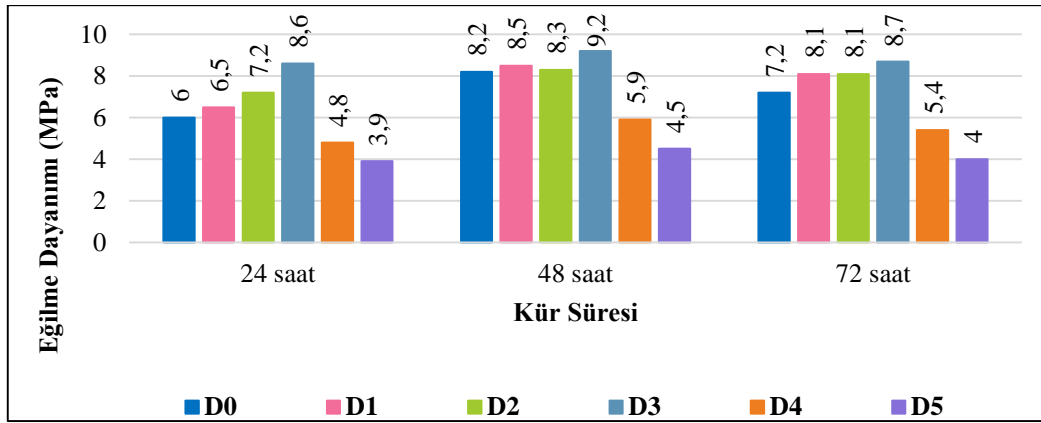
Tablo 3. Senaryoların tanımlanması

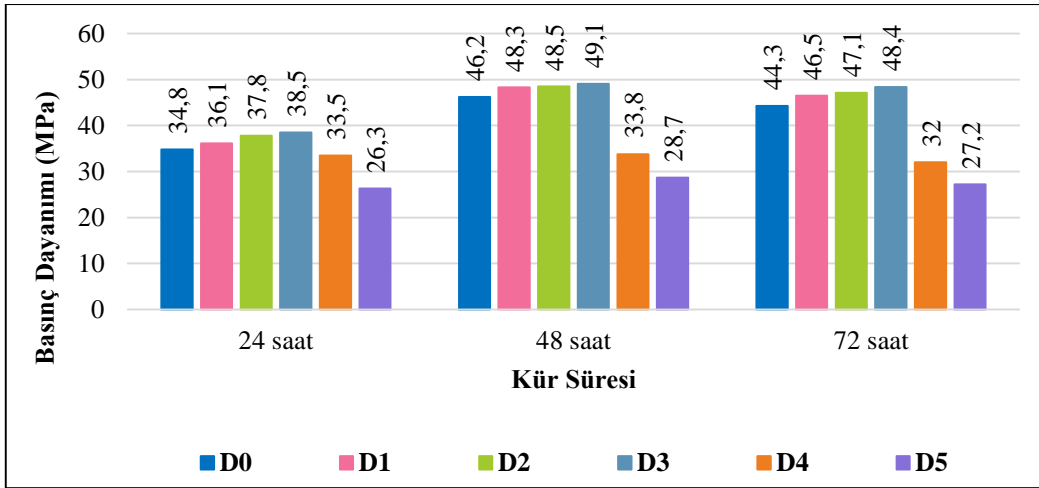
Senaryo	Tanım
Senaryo 1 (Temel Senaryo)	Gerçek taşıma mesafelerine dayalı senaryo (24 saat ısıt kür)
Senaryo 2	Gerçek taşıma mesafelerine (48 ve 72 saat ısıt kür) dayalı senaryoya göre kür sürelerinin çeşitlendirilmesi
Senaryo 3	Bölgesel taşıma mesafelerine dayalı senaryo (Tüm malzemeler 7 km'lik hayali bir mesafe üzerinden taşınmıştır ve 24 saat ısıt kür)

Harç üretiminin etki değerlendirmesi için SimaPro 9.5 yazılımında CML-IA temel yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem abiyotik tükenme (AD, kg Sb eq.), abiyotik tükenme-fosil yakıtlar (AD-FF, MJ), küresel ısınma potansiyeli (GWP, kg CO₂ eq.), ozon tabakasının incelmeye (ODP, kg CFC -11 eq.), insan toksisitesi (HT, kg 1,4-DB eq.), tatlı su sucul ekotoksisite (FAE, kg 1,4-DB eq.), deniz ekotoksisitesi (MAE, kg 1,4-DB eq.), karasal ekotoksisite (TE, kg 1,4-DB eq.), fotokimyasal oksidasyon (PO₄, kg C₂H₄ eq.), asitleşme potansiyeli (AP, kg SO₂ eq.) ve ötrofikasyon potansiyeli (EP, kg PO₄ eq.) çevresel etki kategorilerini kapsamaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

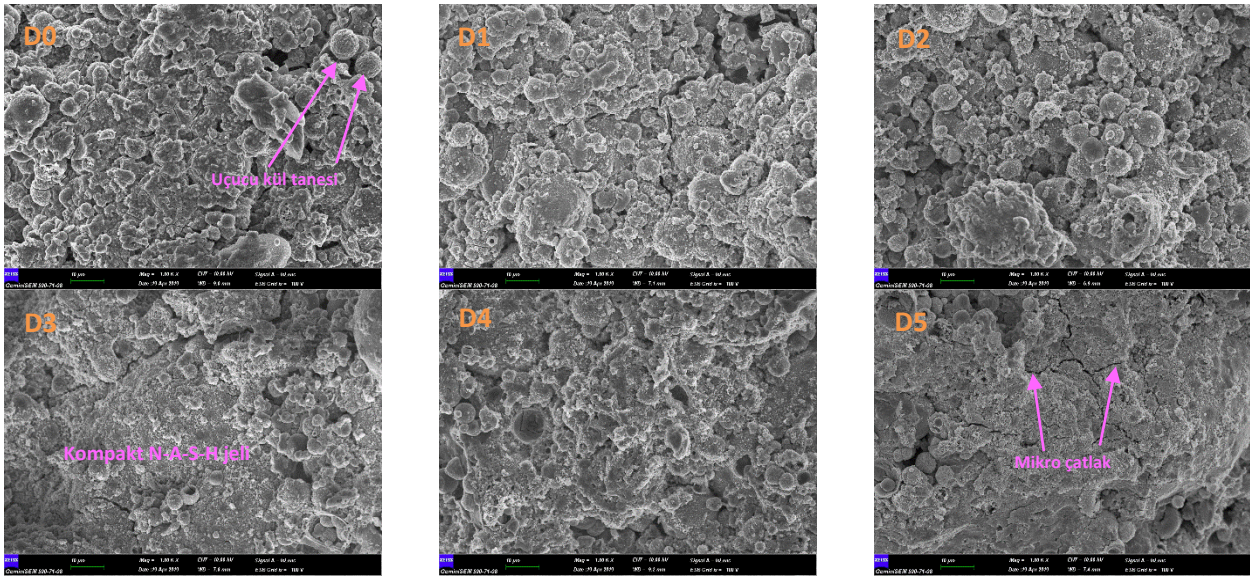
Şekil 5 ve 6'da gösterilen 90°C'de 24, 48 ve 72 saat ısıt kür uygulanan harçlar için eğilme ve basınç dayanımı sonuçları gösterilmektedir. %3 diatomit içeren geopolimer harç örneği (D3), 90°C'de 48 saatlik ısıt kür süresi sonucunda en yüksek eğilme (9,2 MPa) ve basınç dayanımı (49,1 MPa) değerlerine ulaşmıştır. Kontrol harcı (D0), aynı koşullar altında 8,2 MPa eğilme dayanımına ve 46,2 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Şekil 5 ve Şekil 6'dan, ısıt kür süresinin 24 saatten 48 saate çıkarılmasının, %3'e kadar diatomit ikame edilerek hem eğilme hem de basınç dayanımı açısından mekanik dayanıma olumlu katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Ancak, 90°C'de 72 saatlik ısıt kür süresi, diatomit katkı oranına bakılmaksızın 48 saatlik ısıt kür ile karşılaştırıldığında eğilme ve basınç dayanımını düşürmüştür. Ayrıca, geopolimer harçtaki (D4 ve D5) yüksek miktarda diatomit ikamesi, kontrol (D0) ve diğer harçlarla (D1, D2 ve D3) karşılaştırıldığında tüm kür süreleri boyunca dayanım kaybına neden olmuştur.

**Şekil 5.** Geopolimer harçların eğilme dayanımı sonuçları



Şekil 6. Geopolimer harçların basınç dayanımı sonuçları

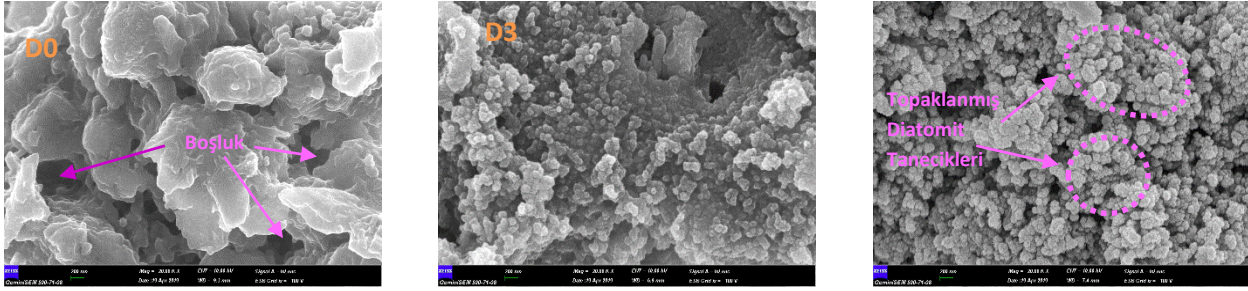
Şekil 6'da gösterilen sonuçlara göre, 90°C ıslıkür sıcaklığında optimum diatomit ikame oranının %3 olduğu belirlenmiştir. %5 oranında diatomit (D5) içeren geopolimer harç numunesi, 90°C'de tüm geopolimer karışımlarından daha düşük eğilme ve basınç dayanımı değeri sonucu vermiştir. Şekil 5 ve Şekil 6'da, 90°C'de 48 saatlik kür süresinin, kontrol harçlarına kıyasla 24 saatlik kür süreleri kadar eğilme ve basınç dayanımı gelişimine katkıda bulunmadığını göstermektedir. 24 saatlik ıslıkür süresinin 90°C'de yeterli olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu duruma paralel bir sonuç literatürde daha önce yapılan Atis ve arkadaşları tarafından bir çalışmada yayımlanmıştır [39], [40]. Yukarıda tartışıldığı gibi, yüksek miktarda diatomit içeren bazı karışımlar, örneğin D4 ve D5 karışımları daha düşük dayanım sonucu vermiştir. Bu durum yüksek miktardaki diatomit parçacıklarının aglomerasyonu ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde, Messina ve arkadaşları [41] ve Durak ve arkadaşları [42], geopolimer harçta silika dumanı veya nano SiO₂ miktarının artırılmasının mikro yapıda bir aglomerasyona veya kısmi tıkanıklığa neden olduğunu bildirmiştir. Bu nedenle, bu etki D4 ve D5 karışımında gözlemlendiği gibi mukavemet gelişiminde bir azalmaya neden olmuştur. Kontrol ve diatomit ikameli numunelerin FESEM görüntüleri Şekil 7'de sunulmuştur. Mikro yapıya göre sodyum alümina-silikat jelinin oluşumu, tepkimeye girmemiş, kısmen tepkimeye girmiş ve tamamen tepkimeye girmiş uçucu kül parçacıkları, boşluklar, gözeneklilik ve mikro çatlak oluşumu açıkça gözlemlenmiştir. Bu durumun literatürde yayınlanan önceki çalışmalarla benzer olduğu görülmüştür [4], [42]–[44]. Ancak %3 diatomit içeren D3'ün FESEM görüntüsü mikro gözenekleri ve boşlukları geliştirmiştir. Diğer hamur numunelerinin D3 hamurundan daha yüksek gözenekliliğe sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Geopolimer hamurların (D0, D1, D2, D3, D4 ve D5) FESEM görüntüsü (1000 büyütme)

Kontrol hamur numunesi (D0) ve diatomit içeren geopolimer hamurlar (D3, D5) için 20000 kat büyütülen FESEM görüntüleri Şekil 8'de sunulmuştur. D0 geopolimerik matristeki boşlukların oluşumu FESEM görüntüsünde gösterilmiştir. D3 hamuru, kontrol hamuruna kıyasla düşük boşluklu daha yoğun bir mikro yapıda

olduğu gösterilmektedir. D5 hamuru FESEM görüntüsü, aglomerasyon nedeniyle oluşan boşlukları ve tepkimeye girmeyen diatomit parçacıklarını açıkça göstermektedir.



Şekil 8. Geopolimer hamurların (D0, D3, D5) FESEM görüntüsü (20000 büyütme)

D3 geopolimer matrisi, diatomit parçacıklarının daha yüksek BET yüzey alanı nedeniyle geopolimerik reaksiyonu güçlendirdiğini göstermektedir. Geopolimer sentezinde, alümina silikat malzemelerin (uçucu kül, silika dumani, metakaolin, diatomit, vb.) ana bileşenleri olan silika ve alümina oksitlerin alkali bir aktivatör çözeltisinde çözündüğü sonucuna varılmıştır. Daha önce yayınlanan çalışmalarda geopolimer bağlayıcıların reaksiyon mekanizmasının üç ana adımdan oluştuğunu bildirmektedir: (1) esas olarak OH⁻ nedeniyle camsı katı fazlardan reaktif Si ve Al'nin çözünmesi; (2) çözünmüş türlerin yeniden yönlendirilmesi ve jelleşmesi; (3) ürünlerin polimerizasyonu ve yoğunlaşması [45]–[47]. Çalışmada elde edilen iç yapı analizlerinin literatür ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma, üç farklı senaryo kullanılarak geleneksel portland çimentolu ve uçucu kül bazlı geopolimer harçların çevresel etkilerinin belirlenmesinde hammadde taşınmasını ve ısıl kür süresinin önemi irdelenmiştir. İlk senaryoda harç karışımları için kullanılan malzemelerin kaynaktan üretim yapılacağı laboratuvara kadar olan gerçek taşıma mesafeleri ile sınırlar belirlenmiştir. Ayrıca üretilen geopolimer harçlara 90°C'de 24 saat ısıl kür uygulanmıştır. İkinci senaryoda ilk senaryodaki karışımların kür süreleri değiştirilerek (90°C'de 48 ve 72 saat) karışımların çevresel etkileri üzerinde kür süresinin etkileri ölçülmüştür. Üçüncü senaryoda ise hammadde taşımacılığının karışımlar üzerindeki çevresel etkilerini ölçmek için yerel olarak (yerel tedarikçiden) 7m uzaklıktan hammaddeler tedarik edilerek ele alınmıştır. Karışımlara ilk senaryoda olduğu gibi 90°C'de 24 saat ısıl kür uygulanmıştır. Senaryolar yerel kaynak kullanımının ve kür süresinin YDD analizleri üzerindeki etkisini kapsamlı şekilde ele almıştır.

Bütün senaryolarda harç karışımlarının çevresel etki kategorisi değerleri, 1 m³ harç için beşikten kapıya yaklaşımı dikkate alınarak CML-IA temel yöntemiyle nitelendirilmiştir [48]–[51]. Bu yöntem 11 çevresel etki kategorisini (AD, AD-FF, GWP, ODP, HT, FAE, MAE, TE, PO, AP ve EP) içermektedir.

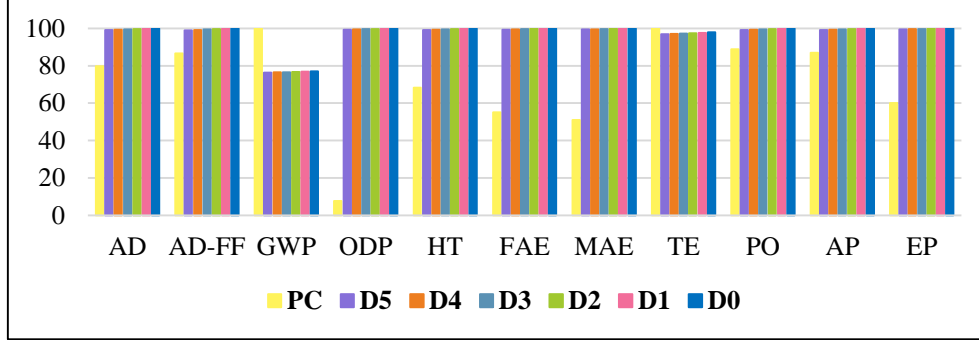
Gerçek taşıma mesafelerine bağlı ilk senaryo sonuçları **Tablo 4**'te sunulmuştur. Harç karışımlarında kullanılan her bir hammadde için fiili taşıma mesafeleri şu şekilde belirtilmiştir: PC (50 km), uçucu kül (630 km), kum (980 km), NaOH (780 km), diatomit (35 km). Bu metodoloji ile inşaat sektöründe taşımacılığın neden olduğu olumsuz çevresel etkilere odaklanılmıştır. Geleneksel harç için (Portland çimentolu) GWP değeri 8,28E+02 ve geopolimer kontrol harcı (D0) için 6,38E+02 kg CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Öte yandan diatomit ikameli harçların (D1, D2, D3, D4 ve D5) GWP'si sırasıyla 6,36E+02, 6,35E+02, 6,34E+02, 6,33E+02 ve 6,32E+02 kg CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Bu bulgulara göre, %5 oranında diatomit ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harcın (D5) geleneksel harca (PC) göre GWP'si %23,6 oranında azalmıştır. Ayrıca, GWP açısından geopolimer kontrol harcı (D0) ve diğer diatomit ikameli harçlar da benzer çevresel performanslar sergilediği görülmüştür.

Tablo 4. Gerçek taşıma senaryosuna göre PC ve geopolimer harçların YDD sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	PC	D5	D4	D3	D2	D1	D0
AD	kg Sb eq	2,31E-03	2,87E-03	2,88E-03	2,88E-03	2,89E-03	2,90E-03	2,90E-03
AD-FF	MJ	6,88E+03	7,86E+03	7,88E+03	7,90E+03	7,91E+03	7,93E+03	7,95E+03
GWP	kg CO ₂ eq	8,28E+02	6,32E+02	6,33E+02	6,34E+02	6,35E+02	6,36E+02	6,38E+02
ODP	kg CFC-11 eq	5,64E-06	7,39E-05	7,40E-05	7,41E-05	7,42E-05	7,43E-05	7,44E-05
HT	kg 1,4-DB-eq	2,62E+02	3,80E+02	3,81E+02	3,82E+02	3,82E+02	3,83E+02	3,84E+02
FAE	kg 1,4-DB-eq	1,33E+02	2,41E+02	2,41E+02	2,41E+02	2,42E+02	2,42E+02	2,42E+02
MAE	kg 1,4-DB-eq	3,20E+05	6,25E+05	6,26E+05	6,26E+05	6,27E+05	6,28E+05	6,29E+05
TE	kg 1,4-DB-eq	2,27E+00	2,20E+00	2,20E+00	2,21E+00	2,21E+00	2,21E+00	2,22E+00
PO	kg C ₂ H ₄ eq	1,09E-01	1,21E-01	1,22E-01	1,22E-01	1,22E-01	1,22E-01	1,22E-01

AP	kg SO ₂ eq	2,42E+00	2,76E+00	2,77E+00	2,77E+00	2,77E+00	2,78E+00	2,78E+00
EP	kg PO ₄ eq	6,27E-01	1,04E+00	1,04E+00	1,04E+00	1,04E+00	1,04E+00	1,05E+00

Geopolimer harç karışımları çimentolu geleneksel harç karışımı ile karşılaştırıldığında (**Şekil 9**), bir ürün veya sistemin çevresel performansının önemli bir göstergesi olan GWP açısından daha düşük çevresel etkilere sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak TE etki kategorisi hariç çimentolu geleneksel harç, geopolimer harçlara göre daha iyi çevresel performans göstermiştir. Geopolimer harçların diğer çevresel etki kategorilerinde daha düşük performans gösterememesinin sebebi kullanılan aktivatör (NaOH) ve taşıma mesafelerinden kaynaklı olduğu anlaşılmıştır.



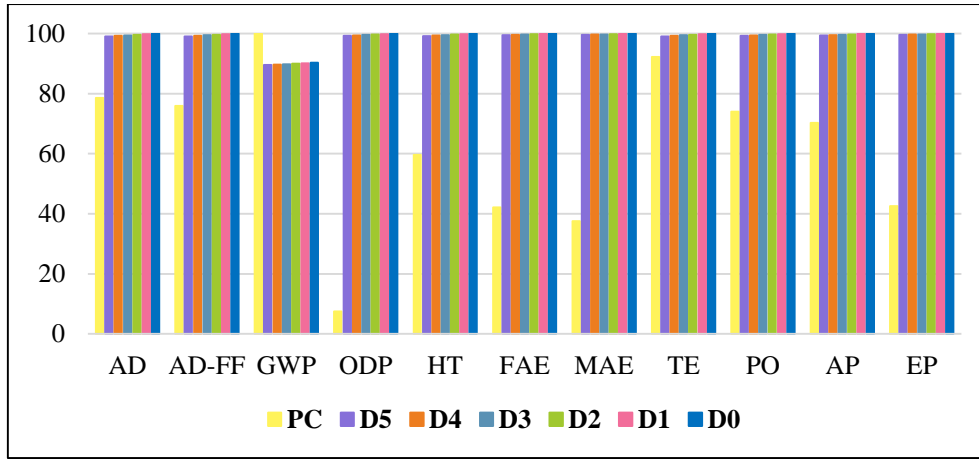
Şekil 9. Gerçek taşıma senaryosuna göre PC ve geopolimer harçlarının YDD sonuçlarının karşılaştırılması

Kür sürelerinin çeşitlendirilmesiyle (48 ve 72 saat) kurulan ikinci senaryo sonuçları **Tablo 5** ve **Tablo 6**'da gösterilmektedir. Geleneksel harç için (Portland çimentolu) GWP değeri 8,28E+02 ve 90 °C'de 48 saat kür edilen geopolimer kontrol harcı (D0) için 7,48E+02 kg CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Öte yandan diatomit ikameli harçların (D1, D2, D3, D4 ve D5) GWP'si sırasıyla 7,46E+02, 7,45E+02, 7,44E+02, 7,43E+02 ve 7,42E+02 kg CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Bu bulgulara göre, %5 oranında diatomit ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harcın (D5) geleneksel harca (PC) göre GWP'si %10,5 oranında azalmıştır. Ayrıca, GWP açısından geopolimer kontrol harcı (D0) ve diğer diatomit ikameli harçlar da benzer çevresel performanslar sergilediği görülmüştür. Kür süresinin 48 saate çıkmasıyla harç karışımlarının GWP değerleri artmıştır. 24 ve 48 saat kür edilen D5 harçlarının GWP'leri kıyaslandığında kür süresinin artmasıyla % 17,25 oranında GWP'si artmıştır.

Tablo 5. 48 saat kür senaryosuna göre PC ve geopolimer harçların YDD sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	PC	D5	D4	D3	D2	D1	D0
AD	kg Sb eq	2,31E-03	2,91E-03	2,92E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,94E-03	2,94E-03
AD-FF	MJ	6,88E+03	8,99E+03	9,01E+03	9,02E+03	9,04E+03	9,05E+03	9,07E+03
GWP	kg CO ₂ eq	8,28E+02	7,41E+02	7,43E+02	7,44E+02	7,45E+02	7,46E+02	7,48E+02
ODP	kg CFC-11 eq	5,64E-06	7,44E-05	7,45E-05	7,47E-05	7,48E-05	7,49E-05	7,50E-05
HT	kg 1,4-DB-eq	2,62E+02	4,37E+02	4,37E+02	4,38E+02	4,39E+02	4,40E+02	4,40E+02
FAE	kg 1,4-DB-eq	1,33E+02	3,14E+02	3,15E+02	3,15E+02	3,15E+02	3,16E+02	3,16E+02
MAE	kg 1,4-DB-eq	3,20E+05	8,47E+05	8,48E+05	8,49E+05	8,50E+05	8,50E+05	8,51E+05
TE	kg 1,4-DB-eq	2,27E+00	2,44E+00	2,44E+00	2,45E+00	2,45E+00	2,46E+00	2,46E+00
PO	kg C ₂ H ₄ eq	1,09E-01	1,46E-01	1,46E-01	1,46E-01	1,46E-01	1,46E-01	1,47E-01
AP	kg SO ₂ eq	2,42E+00	3,42E+00	3,43E+00	3,43E+00	3,43E+00	3,44E+00	3,44E+00
EP	kg PO ₄ eq	6,27E-01	1,47E+00	1,47E+00	1,47E+00	1,47E+00	1,47E+00	1,47E+00

Geopolimer harç karışımlarının GWP'si çimentolu geleneksel harç karışımına göre daha düşük çevresel etkilere sahiptir (**Şekil 10**). Ancak diğer bütün çevresel etki kategorilerinde çimentolu geleneksel harç, geopolimer harçlara göre daha iyi çevresel performans göstermiştir. Geopolimer harç karışımlarının diğer çevresel etki kategorilerinde daha düşük performans gösterememelerinin sebebi kullanılan aktivatör (NaOH) ve taşıma mesafeleri kaynaklıdır. Ayrıca kür süresi arttığı için bir diğer önemli sebep ısıl kür için harcanan enerji olmuştur.

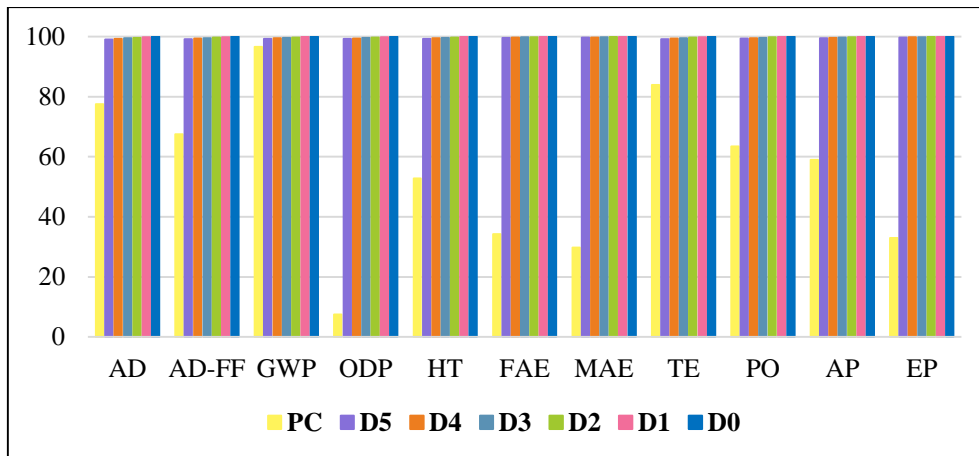


Şekil 10. 48 saat kür senaryosuna göre PC ve geopolimer harçlarının YDD sonuçlarının karşılaştırılması

72 saat kür edilen geopolimer harçlar için (D0, D1, D2, D3, D4 ve D5) GWP değerleri sırasıyla $8,57E+02$, $8,56E+02$, $8,55E+02$, $8,54E+02$, $8,53E+02$ ve $8,51E+02$ olarak hesaplanmıştır (Tablo 6). Geleneksel harç için (Portland çimentolu) GWP değeri ise $8,28E+02$ 'dir. Bu bulgulara göre, %5 oranında diatomit ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harcın (D5) geleneksel harca (PC) göre GWP'si %2.78 oranında artmıştır. 24 ve 72 saat kür edilen D5 harçlarının GWP'leri kıyaslandığında kür süresinin artmasıyla % 34.65 oranında GWP'si artmıştır. Ayrıca kür süresinin 72 saate çıkmasıyla geopolimer harçlar çevresel performans açısından geleneksel çimentolu harca göre bütün çevresel etki kategorilerinde daha kötü performans sergilemiştir (Şekil 11). Geopolimer harçlarda çevresel etkilerin artması NaOH kullanımı ve taşıma kaynaklı emisyonlar dışında ısıl kür süresinin artması en büyük handikap olmuştur.

Tablo 6. 72 saat kür senaryosuna göre PC ve geopolimer harçların YDD sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	PC	D5	D4	D3	D2	D1	D0
AD	kg Sb eq	2,31E-03	2,96E-03	2,96E-03	2,97E-03	2,97E-03	2,98E-03	2,98E-03
AD-FF	MJ	6,88E+03	1,01E+04	1,01E+04	1,01E+04	1,02E+04	1,02E+04	1,02E+04
GWP	kg CO ₂ eq	8,28E+02	8,51E+02	8,53E+02	8,54E+02	8,55E+02	8,56E+02	8,57E+02
ODP	kg CFC-11 eq	5,64E-06	7,50E-05	7,51E-05	7,52E-05	7,53E-05	7,54E-05	7,56E-05
HT	kg 1,4-DB-eq	2,62E+02	4,93E+02	4,94E+02	4,95E+02	4,95E+02	4,96E+02	4,97E+02
FAE	kg 1,4-DB-eq	1,33E+02	3,88E+02	3,89E+02	3,89E+02	3,89E+02	3,90E+02	3,90E+02
MAE	kg 1,4-DB-eq	3,20E+05	1,07E+06	1,07E+06	1,07E+06	1,07E+06	1,07E+06	1,07E+06
TE	kg 1,4-DB-eq	2,27E+00	2,68E+00	2,68E+00	2,69E+00	2,69E+00	2,70E+00	2,70E+00
PO	kg C ₂ H ₄ eq	1,09E-01	1,70E-01	1,70E-01	1,70E-01	1,71E-01	1,71E-01	1,71E-01
AP	kg SO ₂ eq	2,42E+00	4,08E+00	4,09E+00	4,09E+00	4,09E+00	4,10E+00	4,10E+00
EP	kg PO ₄ eq	6,27E-01	1,89E+00	1,90E+00	1,90E+00	1,90E+00	1,90E+00	1,90E+00



Şekil 11. 72 saat kür senaryosuna göre PC ve geopolimer harçlarının YDD sonuçlarının karşılaştırılması

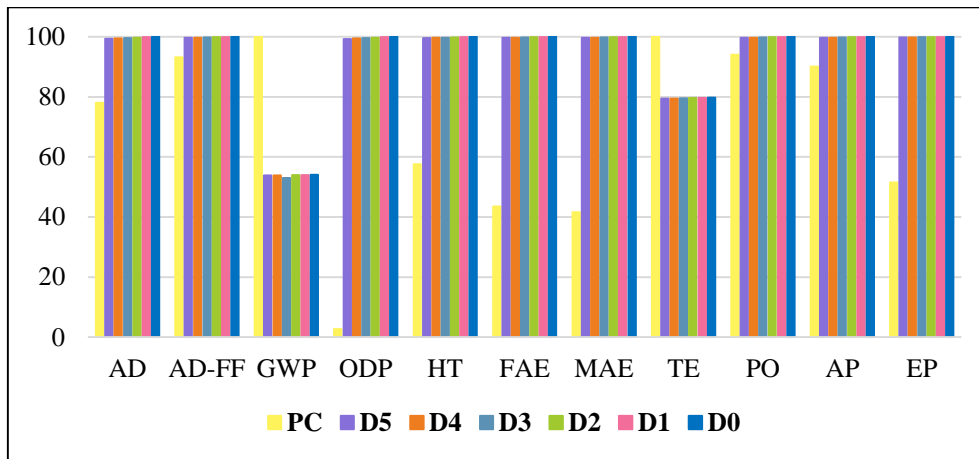
Üçüncü senaryoda, harç üretimi için gerekli tüm hammaddelerin 7 km'lik bir yerel mesafeden (yerel tedarikçi) taşındığı yaklaşımı benimsenmiştir. Bu basitleştirme, önceki senaryoya karşı bir zıtlık oluşturarak, yerel kaynakların kullanımının potansiyel çevresel avantajlarını vurgulamaktadır. Geleneksel harç için (Portland çimentosu) GWP değeri $5,46E+02$ ve geopolimer kontrol harcı (D0) için $2,95E+02$ kg CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Öte yandan diatomit ikameli harçların (D1, D2, D3, D4 ve D5) GWP'si sırasıyla $2,95E+02$, $2,94E+02$, $2,94E+02$, $2,94E+02$ ve $2,94E+02$ kg CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır (**Tablo 7**). Bu bulgulara göre, %2 (D2), %3 (D3), %4 (D4) ve %5 (D5) oranında diatomit ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harçların geleneksel harca (PC) göre GWP'leri %46.15 oranında azalmıştır. Ayrıca, GWP açısından geopolimer kontrol harcı (D0) ve D1 diğer diatomit ikameli harçlara benzer çevresel performanslar sergilediği görülmüştür.

D5 harcının gerçek taşıma mesafelerine bağlı ilk senaryo ile yerel taşıma mesafelerine sahip üçüncü senaryo kıyaslandığında GWP değeri %53,48 oranında azalmıştır. Yerel kaynakların kullanımı çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilirlik açısından büyük öneme sahip olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında, hammadde taşımacılığının, geopolimer harçların çevresel etkileri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Örneğin, Bajpai ve diğerleri (2020), üç farklı geopolimer beton karışımının çevresel etkilerini geleneksel çimento betonlarıyla karşılaştırmak için bir YDD gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonucunda ham madde taşımacılığının hem geopolimer hem de geleneksel beton karışımlarının küresel ısınma potansiyeline (%8,90-%47,61) önemli ölçüde katkı sağladığını ortaya koymuşlardır [52].

Tablo 7. Yerel taşıma senaryosuna göre PC ve geopolimer harçların YDD sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	PC	D5	D4	D3	D2	D1	D0
AD	kg Sb eq	1,40E-03	1,78E-03	1,78E-03	1,79E-03	1,79E-03	1,79E-03	1,79E-03
AD-FF	MJ	2,92E+03	3,12E+03	3,13E+03	3,13E+03	3,13E+03	3,13E+03	3,13E+03
GWP	kg CO ₂ eq	5,46E+02	2,94E+02	2,94E+02	2,94E+02	2,94E+02	2,95E+02	2,95E+02
ODP	kg CFC-11 eq	1,96E-06	6,94E-05	6,95E-05	6,96E-05	6,97E-05	6,98E-05	6,99E-05
HT	kg 1,4-DB-eq	1,25E+02	2,16E+02	2,16E+02	2,17E+02	2,17E+02	2,17E+02	2,17E+02
FAE	kg 1,4-DB-eq	7,41E+01	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02
MAE	kg 1,4-DB-eq	2,02E+05	4,83E+05	4,84E+05	4,84E+05	4,84E+05	4,84E+05	4,85E+05
TE	kg 1,4-DB-eq	1,28E+00	1,02E+00	1,02E+00	1,02E+00	1,02E+00	1,02E+00	1,02E+00
PO	kg C ₂ H ₄ eq	6,35E-02	6,73E-02	6,74E-02	6,74E-02	6,75E-02	6,75E-02	6,75E-02
AP	kg SO ₂ eq	1,48E+00	1,64E+00	1,64E+00	1,64E+00	1,65E+00	1,65E+00	1,65E+00
EP	kg PO ₄ eq	3,91E-01	7,57E-01	7,58E-01	7,58E-01	7,59E-01	7,59E-01	7,59E-01

Geopolimer harç karışımları çimentosu geleneksel harç karışımı ile karşılaştırıldığında, GWP açısından daha düşük çevresel etkilere sahip olduğu görülmüştür. Ancak TE etki kategorisi hariç çimentosu geleneksel harç, geopolimer harçlara göre daha iyi çevresel performans göstermiştir (**Şekil 12**). Geopolimer harçların diğer çevresel etki kategorilerinde daha düşük performans gösterememelerinin sebebi kullanılan aktivatör NaOH'dan kaynaklı olduğu anlaşılmıştır.

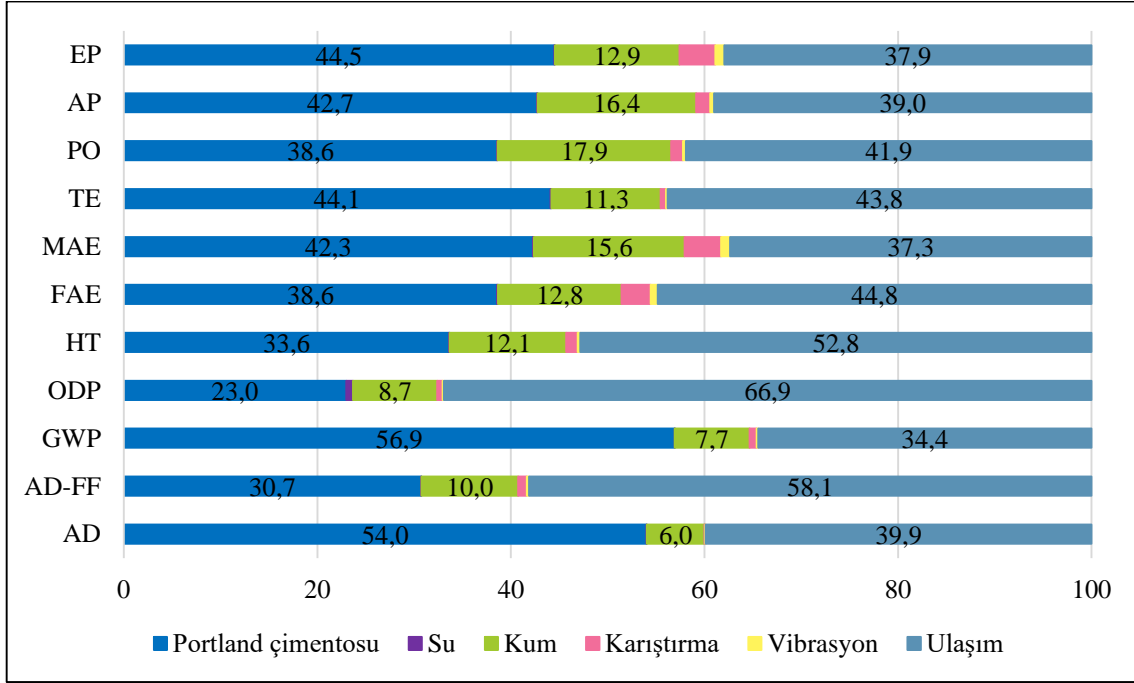


Şekil 12. Yerel taşıma senaryosuna göre PC ve geopolimer harçların YDD sonuçlarının karşılaştırılması

Geleneksel çimentosu harç ve %5 oranında diatomit ikamesi içeren geopolimer harç için çevresel etkilerin üretim adımlarına ve alt bileşenlere göre dağılımı **Şekil 13** ve **Şekil 14**'te gösterilmektedir.

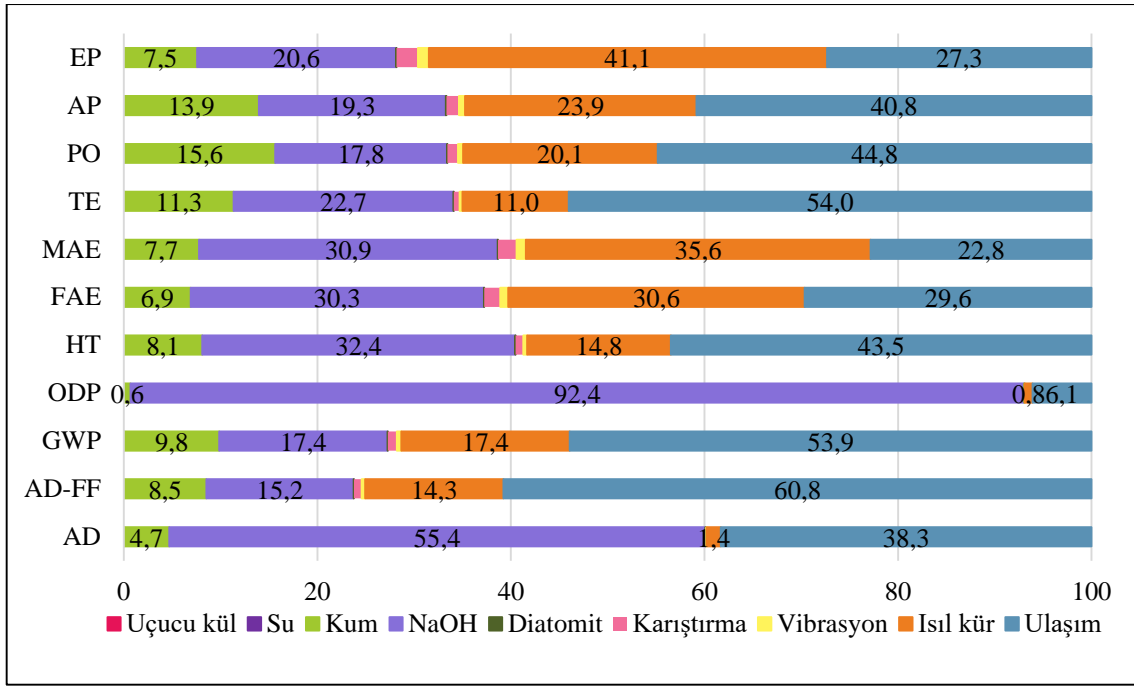
Geleneksel çimentosu harç karışımının YDD sonuçları, en yüksek çevresel etkilerin çimento, hammadde taşımacılığında kaynaklandığını ortaya koymuştur. Çimento, %23-%56,9 arasında payla tüm çevresel etki

katigorilerine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Çimento üretimi karbondioksit emisyonu ve enerji yoğun bir süreç olduğundan, çimento üretimi yüksek küresel sera gazı emisyonlarına neden olmaktadır. Böylece çimento, PC harcı üretiminde %56,9 ile GWP üzerindeki en yüksek etkiye sahiptir (**Şekil 13**). Çimento üretimiyle ilgili diğer önemli emisyonlar partikül madde (PM), nitrojen oksitler (NO_x) ve kükürt dioksit (SO₂). Ayrıca karbon monoksit (CO), uçucu organik bileşikler (VOC) ve toksik emisyonlar (örneğin ağır metaller, dioksinler ve furanlar) da endişe vericidir. Çimento üretim sürecinde kullanılan yakıt ve hammaddelerin bileşimi, üretim teknolojisinin seçimi ve diğer faktörler, hava kirleticilerin türünü belirlemekte ve miktarını [53]–[55] etkilemektedir. Geleneksel harç karışımında bir diğer önemli çevresel etkiyi ham madde taşımacılığı oluşturmuştur. Ham madde taşımacılığı %34,4–%66,9 arasında payla tüm çevresel etki kategorilerine büyük oranda katkıda bulunmaktadır. Karışımında kullanılan kum çimento ve ham madde taşımacılığına ek olarak daha küçük bir payla %6–%17,9 oranında çevresel etki kategorilerine katkıda bulunmuştur. Harçların karıştırılması ve vibrasyonu gibi proseslerin çevresel yükleri oldukça düşüktür.



Şekil 13. Gerçek taşıma senaryosu ile PC harç karışımının çevresel etkilerinin alt bileşenlere göre dağılımı

Çevresel etkilerin D5 harç karışımının alt bileşenlerine göre dağılımı **Şekil 14**'te gösterilmektedir. %5 oranında diatomit ikameli harç karışımının YDD sonuçları, en yüksek çevresel etkilerin NaOH, ham madde taşımacılığı ve ısıl külden kaynaklandığını ortaya koymuştur. NaOH, %15,2–%55,4 arasında payla tüm çevresel etki kategorilerine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Diatomit ikameli geopolimer harç karışımında bir diğer önemli çevresel etkiyi hammadde taşımacılığı oluşturmuştur. Hammadde taşımacılığı %6,1–%60,8 arasında payla tüm çevresel etki kategorilerine büyük oranda katkıda bulunmaktadır. Karışımın ısıl kür ile priz alması sağlandığı için önemli bir çevresel yükte ısıl kürlenme prosesinden gelmiştir (%0,8–%41,1). Bunlara ek olarak harç karışımlarında kullanılan kum %0,6–%15,6 payla çevresel etki kategorilerine katkı sağlamıştır. Harçların karıştırılması ve vibrasyonu gibi proseslerin çevresel yükleri oldukça düşüktür.



Şekil 14. Gerçek taşıma senaryosu ile D5 geopolimer harç karışımının çevresel etkilerinin alt bileşenlere göre dağılımı

4. Tartışma ve Sonuç

Çalışma sonuçlarına göre %3 oranına kadar diatomit ikamesinin geopolimer harç numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarını kontrol numunesine kıyasla artırdığı belirlenmiştir. Fakat %3 diatomit ikame oranından daha yüksek oranda diatomitin ikame edilmesi durumunda dayanımlarda düşüş olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, numunelerin 90°C'de 72 saat boyunca kür edilmesi diatomitin etkinliğini azaltmış ve basınç mukavemetlerini düşürmüştür.

FESEM görüntülerine göre, %3'e kadar diatomit ikamesi, geopolimer hamur numunelerinin mikro yapısını iyileştirerek diatomitsiz hazırlanan numunelere kıyasla daha yoğun içyapıya sahip numuneler elde edilmesini sağlamıştır.

Gerçek taşıma senaryosuna göre %5 oranında diatomit ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harcın (D5) geleneksel harca (PC) göre GWP'si %23,6 oranında azalmıştır.

Senaryo 2'ye göre 48 saat kür edilen %5 oranında diatomit ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harcın (D5) geleneksel harca (PC) göre GWP'si %10,5 oranında azalmıştır. 72 saat kür edilen %5 oranında diatomit ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harçta ise (D5) geleneksel harca (PC) göre GWP'si %2,78 oranında artmıştır. 24 ve 72 saat kür edilen D5 harçlarının GWP'leri kıyaslandığında kür süresinin artmasıyla % 34,65 oranında GWP'si artmıştır.

Senaryo 3'e göre %2 (D2), %3 (D3), %4 (D4) ve %5 (D5) oranında diatomit ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harçların geleneksel harca (PC) göre GWP'leri %46,15 oranında azalmıştır.

D5 harcının gerçek taşıma mesafelerine bağlı Senaryo 1 ile yerel taşıma mesafelerine sahip Senaryo 3 kıyaslandığında GWP değeri %53,48 oranında azalmıştır. Bu sonuç yerel kaynakların kullanımının çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilirlik açısından büyük öneme sahip olduğunu göstermiştir.

Gerçek taşıma senaryosu Senaryo 1'e göre PC harç karışımının çevresel etkilerinin alt bileşenlere göre dağılımı incelendiğinde en yüksek çevresel etkilerin çimento ve hammadde taşımacılığından kaynaklandığını ortaya koymuştur. D5 geopolimer harç karışımında ise en yüksek çevresel etkilerin NaOH, hammadde taşımacılığı ve ısıl kürden kaynaklandığı belirlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından **FLY-2019-9195** kodlu proje ile desteklenmiştir.

Kaynakça

- [1] H. Li *et al.*, "Sustainable resource opportunity for cane molasses: Use of cane molasses as a grinding aid in the production of Portland cement," *J. Clean. Prod.*, vol. 93, pp. 56–64, 2015.
- [2] D. N. Huntzinger and T. D. Eatmon, "A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies," *J. Clean. Prod.*, vol. 17, no. 7, pp. 668–675, 2009.
- [3] C. L. Sabine *et al.*, "The Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂," *Science (80-.)*, vol. 305, no. July, pp. 5–12, 2004.
- [4] P. S. Deb, P. K. Sarker, and S. Barbhuiya, "Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature," *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 675–683, 2015.
- [5] S. Saha and C. Rajasekaran, "Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag," *Constr. Build. Mater.*, vol. 146, pp. 615–620, Aug. 2017.
- [6] İ. İ. Atabey, O. Karahan, C. Bilim, and C. D. Atiş, "The influence of activator type and quantity on the transport properties of class F fly ash geopolymer," *Constr. Build. Mater.*, vol. 264, 2020.
- [7] A. Awad *et al.*, "Experimental investigation of mechanical properties of geopolymer mortars produced with metakaolin, red mud and glass powder Ashraf," *Comput. Concr.*, vol. 27, no. 6, p. 597, Jun. 2021.
- [8] Y. G. Adewuyi, "Recent Advances in Fly-Ash-Based Geopolymers: Potential on the Utilization for Sustainable Environmental Remediation," *ACS Omega*, vol. 6, no. 24, pp. 15532–15542, 2021.
- [9] S. Adjei, S. Elkatatny, and K. Ayranci, "Effect of Elevated Temperature on the Microstructure of Metakaolin-Based Geopolymer," *ACS Omega*, vol. 7, no. 12, pp. 10268–10276, 2022.
- [10] A. Sathonsaowaphak, P. Chindapasirt, and K. Pimraksa, "Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar," *J. Hazard. Mater.*, vol. 168, no. 1, pp. 44–50, 2009.
- [11] K. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Kajitvichyanukul, and P. Chindapasirt, "NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature," *Fuel*, vol. 90, no. 6, pp. 2118–2124, 2011.
- [12] F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes, and S. Jalali, "Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 7, pp. 1315–1322, Jul. 2008.
- [13] A. Palomo, M. W. Grutzeck, and M. T. Blanco, "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 8, pp. 1323–1329, Aug. 1999.
- [14] J. C. Swanepoel and C. A. Strydom, "Utilisation of fly ash in a geopolymeric material," *Appl. Geochemistry*, vol. 17, no. 8, pp. 1143–1148, Aug. 2002.
- [15] V. F. F. Barbosa, K. J. D. MacKenzie, and C. Thaumaturgo, "Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: Sodium polysialate polymers," *Int. J. Inorg. Mater.*, vol. 2, no. 4, pp. 309–317, 2000.
- [16] A. R. Brough, M. Holloway, J. Sykes, and A. Atkinson, "Sodium silicate-based alkali-activated slag mortars: Part II. The retarding effect of additions of sodium chloride or malic acid," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 9, pp. 1375–1379, Sep. 2000.
- [17] A. Fahmi, A. B. amini, Y. Marabi, S. R. Zavaragh, and A. Majnoui-Toutakhane, "Effect of Curing Temperature on the Mechanical Strength of Alkali Activated Laterite Geopolymeric Samples," *J. Eng. Res.*, pp. 1–25, 2021.
- [18] T. Bakharev, "Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 6, pp. 1224–1232, Jun. 2005.
- [19] D. Pantias, I. P. Giannopoulou, and T. Perraki, "Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 301, no. 1–3, pp. 246–254, 2007.
- [20] P. Chindapasirt, T. Chareerat, and V. Sirivivatnanon, "Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 3, pp. 224–229, 2007.

- [21] O. A. A. Ali, "Mechanical Properties of Fly Ash Based Geopolymer Mortar Activated By Alkali and Cement Simultaneously," Erciyes Universty, Graduate School of Natural and Applied Sciences, 2017.
- [22] F. Puertas, S. Martínez-Ramírez, S. Alonso, and T. Vázquez, "Alkali-activated fly ash/slag cements. Strength behaviour and hydration products," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 10, pp. 1625–1632, 2000.
- [23] Z. Sun and A. Vollpracht, "Isothermal calorimetry and in-situ XRD study of the NaOH activated fly ash, metakaolin and slag," *Cem. Concr. Res.*, vol. 103, no. September 2017, pp. 110–122, 2018.
- [24] B. Galzerano *et al.*, "Design of sustainable porous materials based on 3D-structured silica exoskeletons , Diatomite : Chemico-physical and functional properties," *Mater. Des.*, vol. 145, pp. 196–204, 2018.
- [25] C. Bagci, G. P. Kutyla, and W. M. Kriven, "Fully reacted high strength geopolymer made with diatomite as a fumed silica alternative," *Ceram. Int.*, vol. 43, no. 17, pp. 14784–14790, 2017.
- [26] T. Sinsiri, T. Phoo-ngernkham, N. Ratchasima, and V. Sata, "The effects of replacement fly ash with diatomite in geopolymer mortar," *Comput. Concr.*, vol. 9, no. 6, pp. 427–439, 2012.
- [27] M. Sciences, T. Phoo-ngernkham, P. Chindapasirt, V. Sata, and T. Sinsiri, "High calcium fly ash geopolymer containing diatomite as additive," *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, vol. 20, no. August, pp. 310–318, 2013.
- [28] P. Posi, S. Lertnimoolchai, V. Sata, and T. Phoo-ngernkham, "Investigation of Properties of Lightweight Concrete with Calcined Diatomite Aggregate," vol. 18, pp. 1429–1435, 2014.
- [29] Y. C. Ersan, S. Gulcimen, T. N. Imis, O. Saygin, and N. Uzal, "Life cycle assessment of lightweight concrete containing recycled plastics and fly ash," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 7, pp. 2722–2735, 2022.
- [30] A. Josa, A. Aguado, A. Cardim, and E. Byars, "Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 5, pp. 781–788, 2007.
- [31] ISO-14040, *Environmental management–life cycle assessment–Principles and framework*. International Organization for Standardization, 2006.
- [32] P. S. Matheu, K. Ellis, and B. Varela, "Comparing the environmental impacts of alkali activated mortar and traditional portland cement mortar using life cycle assessment," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 96, no. 1, 2015.
- [33] L. Nguyen, A. J. Moseson, Y. Farnam, and S. Spatari, "Effects of composition and transportation logistics on environmental, energy and cost metrics for the production of alternative cementitious binders.," *J. Clean. Prod.*, vol. 185, pp. 628–645, 2018.
- [34] R. Robayo-Salazar, J. Mejía-Arcila, R. Mejía de Gutiérrez, and E. Martínez, "Life cycle assessment (LCA) of an alkali-activated binary concrete based on natural volcanic pozzolan: A comparative analysis to OPC concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 176, pp. 103–111, Jul. 2018.
- [35] A. Passuello *et al.*, "Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators," *J. Clean. Prod.*, vol. 166, pp. 680–689, 2017.
- [36] B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. Van Riessen, and G. D. Corder, "Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement," *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 9–10, pp. 1080–1090, 2011.
- [37] TS EN 196-1, "Method of testing cement, Part 1. Determination of strength." Turkish Standards Institution, Ankara, 2009.
- [38] TSE, "TS EN ISO 14044 standardı, Çevre yönetimi- Hayat boyu değerlendirme- Gereklere ve kılavuz," 2007.
- [39] C. D. Atiş, E. B. Görür, O. Karahan, C. Bilim, S. İlkentapar, and E. Luga, "Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration," *Constr. Build. Mater.*, vol. 96, pp. 673–678, Oct. 2015.
- [40] G. Görhan and G. Kürklü, "The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures," *Compos. Part B Eng.*, vol. 58, pp. 371–377, 2014.
- [41] Messina, Ferone, F. Colangelo, Roviello, and Cioffi, "Alkali activated waste fly ash as sustainable composite: Influence of curing and pozzolanic admixtures on the early-age physico-mechanical properties and residual strength after exposure at elevated temperature," *Compos. Part B Eng.*, vol. 132, pp. 161–169, Jan. 2018.
- [42] U. Durak, O. Karahan, B. Uzal, S. İlkentapar, and C. D. Atiş, "Influence of nano SiO₂ and nano CaCO₃ particles on strength, workability, and microstructural properties of fly ash-based geopolymer," *Struct. Concr.*, vol. 22, no. S1, pp. E352–E367, Jan. 2021.

- [43] J. E. Oh, P. J. M. Monteiro, S. S. Jun, S. Choi, and S. M. Clark, "The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 2, pp. 189–196, 2010.
- [44] E. D. Rodríguez, S. A. Bernal, J. L. Provis, J. Paya, J. M. Monzo, and M. V. Borrachero, "Effect of nanosilica-based activators on the performance of an alkali-activated fly ash binder," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 1–11, 2013.
- [45] J. L. Provis and S. A. Bernal, "Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 44, no. 1, pp. 299–327, 2014.
- [46] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. Van Deventer, "Geopolymer technology: The current state of the art," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 2917–2933, 2007.
- [47] D. Khale and R. Chaudhary, "Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 3, pp. 729–746, 2007.
- [48] A. Kul *et al.*, "Characterization and life cycle assessment of geopolymer mortars with masonry units and recycled concrete aggregates assorted from construction and demolition waste," *J. Build. Eng.*, vol. 78, p. 107546, Nov. 2023.
- [49] Q. Munir, M. Abdulkareem, M. Horttanainen, and T. Kärki, "A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of geopolymer concrete produced from industrial side streams in comparison with traditional concrete," *Sci. Total Environ.*, vol. 865, p. 161230, Mar. 2023.
- [50] B. Gopalakrishna and P. Dinakar, "Life cycle assessment (LCA) and the influence of alkaline activator content on mechanical and microstructural properties of geopolymer mortar," *J. Eng. Res.*, Jan. 2024.
- [51] B. Kanagaraj, N. Anand, U. Johnson Alengaram, and R. Samuvel Raj, "Engineering properties, sustainability performance and life cycle assessment of high strength self-compacting geopolymer concrete composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 388, p. 131613, Jul. 2023.
- [52] R. Bajpai, K. Choudhary, A. Srivastava, K. S. Sangwan, and M. Singh, "Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 254, p. 120147, 2020.
- [53] A. Petek Gursel, E. Masanet, A. Horvath, and A. Stadel, "Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 51, pp. 38–48, Aug. 2014.
- [54] C. Li, J. Li, Q. Ren, Q. Zheng, and Z. Jiang, "Durability of concrete coupled with life cycle assessment: Review and perspective," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 139, p. 105041, May 2023.
- [55] F. Schorcht, N. Kourti, B. M. Scalet, S. Roudier, and L. D. Sancho, *BAT reference cement productie*. 2013.