



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ İLE
FARKLI DAYANIM SINIFLARI İÇİN
EKONOMİK-YEŞİL ÇİMENTONUN
OPTİMUM KLİNKER MİKTARININ
BELİRLENMESİ**

Hayriye Nur NAYAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Hayriye Nur NAYAN tarafından hazırlanan “Yaşam Döngüsü Analizi İle Farklı Dayanım Sınıfları İçin Ekonomik-Yeşil Çimentonun Optimum Klinker Miktarının Belirlenmesi” adlı tez çalışması 12/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL
Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

Danışman

Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Konya Teknik Üniversitesi

Danışman

Doç. Dr. Selim DOĞAN
Konya Teknik Üniversitesi

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Murat SAYDAN
Konya Teknik Üniversitesi

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Hayriye Nur NAYAN

Tarih: 12.06.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ İLE FARKLI DAYANIM SINIFLARI İÇİN EKONOMİK-YEŞİL ÇİMENTONUN OPTİMUM KLİNKER MİKTARININ BELİRLENMESİ

Hayriye Nur NAYAN

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Doç. Dr. Selim DOĞAN**

2024, 46 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Doç. Dr. Selim DOĞAN
Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL
Dr. Öğr. Üyesi Murat SAYDAN**

Yaşam Döngüsü Analizi (YDA); bir ürünün, hammadde temininden başlayarak üretim sürecinin ve yaşam boyunca olan hizmet aktivitesinin çevreye olan etkisini değerlendirmek ve belirleyebilmek için kullanılan bir yöntemdir. Bir ürünün ya da hizmetin üretimi sürecinde kullanılan hammaddelerin ve bununla birlikte ortaya çıkan çevresel emisyonların bir envanterinin çıkarılması ile başlayan YDA, bu girdi ve çıktıların oluşturabileceği çevresel etkilerin değerlendirilmesi ve sonuçların sistematik olarak karşılaştırılması ile sona erer. Yapı sektörü, yeryüzünden çıkarılan hammaddelerin yaklaşık %50'sini kullanmaktadır. Yapı sektörü küresel enerji kullanımının, %36'sını ve enerji kullanımı kaynaklı karbondioksit emisyonlarının %39'unu oluşturmasıyla çevre sorunlarının başlıca sebeplerindendir. Ortaya çıkan çevresel etkileri en aza indirmek dahası önüne geçebilmek için ürünün-hizmetin oluşturduğu çevresel etkiler somut bir şekilde ortaya konulmalıdır. Bu amaç doğrultusunda bu tez çalışmasında, çimento üretiminden kaynaklı çevresel kirliliklerin en aza indirilmesi için klinker miktarı %5-50 arasında azaltılarak mineral katkı malzemeli çimentolar üretilmiş ve numuneler hazırlanmıştır. Söz konusu mineral katkılar; uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve doğal puzolandır. Farklı oranlarda mineral katkı ile üretilen numuneler katkısız referans numunesi ile kendi aralarında karşılaştırılmış ve bir dayanım-çevre-maaliyet grafiği çizilerek en uygun çimento karışım oranı belirlenmiştir. Dayanım-çevre ve ekonomi açısından en verimli numune DP10 (%10 doğal puzolan ikameli numune) numunesi seçilmiş ve ekonomik- yeşil çimento ismi verilmiştir. Bu ekonomik-yeşil çimento ve Portland çimentosu ile inşa edilen iki farklı senaryo oluşturulmuş ve ekonomik-yeşil çimentonun karbon salınımını 40118,75 kgCO₂e azalttığı hesaplanmıştır. Böylece çevreye duyarlı, dayanım açısından uygun ve ekonomik yapılar için bir çimento önerisi verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: çimento, doğal puzolan, granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül, yaşam döngüsü analizi

ABSTRACT

MS THESIS

DETERMINING THE OPTIMUM CLINKER AMOUNT OF ECONOMICAL-GREEN CEMENT FOR DIFFERENT STRENGTH CLASSES WITH LIFE CYCLE ANALYSIS

Hayriye Nur NAYAN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

**Advisor: Prof. Ülkü Sultan KESKİN
Assoc. Prof. Dr. Selim DOĞAN**

2024, 46 Pages

**Jury
Prof. Ülkü Sultan KESKİN
Assoc. Prof. Selim DOĞAN
Assoc. Prof. Sadık Alper YILDIZEL
Asst. Prof. Dr. Murat SAYDAN**

Life Cycle Analysis (LCA); It is a method used to evaluate and determine the environmental impact of a product, its production process, starting from the supply of raw materials, and its service activity throughout its life. LDA begins with making an inventory of the raw materials used in the production process of a product or service and the resulting environmental emissions, and ends with evaluating the environmental impacts that these inputs and outputs may create and systematically comparing the results. The construction sector uses approximately 50% of the raw materials extracted from the earth. The construction sector is one of the main causes of environmental problems, accounting for 36% of global energy use and 39% of carbon dioxide emissions resulting from energy use. In order to minimize and even prevent the resulting environmental impacts, the environmental impacts created by the product-service should be revealed concretely. For this purpose, in this thesis study, in order to minimize environmental pollution caused by cement production, the amount of clinker is reduced by 5-50% and cements with mineral additives are used. produced and samples were prepared. The mineral additives in question are; fly ash, granulated blast furnace slag and natural boza. Samples produced with different amounts of mineral additives were compared with the reference sample without additives, and the most appropriate cement mixture ratio was determined by drawing a strength-environment-cost graph. The most efficient sample in terms of strength, environment and economy was selected as DP10 (10% natural posing replacement sample) and was named economical-green cement. Two different scenarios built with this economic-green cement and Portland cement were created and it was calculated that economic-green cement reduced carbon emissions by 40118.75 kgCO₂e. Thus, a cement recommendation is given for environmentally friendly, durable and economical structures.

Keywords: cement, fly ash, granulated blast furnace slag, life cycle analysis natural pozzolana

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda ve hayatımın tüm diğer alanlarında bana yol gösteren ayrıca karşılaştığım tüm zorluklarda beni yüreklendiren, değerli katkılarını ve desteklerini benden esirgemeyen danışmanım, kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Çalışmada kullandığım birçok analizde hem metod bakımından yardımlarını esirgemeyen hem de akademik bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, bana yol gösteren yardımcı danışman hocam Doç. Dr. Selim DOĞAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez ve diğer çalışmalarım süresince benden her türlü yardımı esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Murat SAYDAN, Arş. Gör. Furkan TÜRK ve Arş. Gör. Ayşe TÜRK'e çok teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında yardımlarıyla katkıda bulunan ve benden manevi desteklerini esirgemeyen, laboratuvar teknikerimiz Sayın Selçuk SOMUNCU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen ve her daim yanımda olan kıymetli aileme sonsuz şükran ve saygılarımı sunarım.

Hayriye Nur NAYAN
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
1.1.Çimento Üretimi	1
1.2.Yaşam Döngüsü Analizi	3
1.2.1. YDA Metodolojisi	5
1.2.2. Bina Ölçeğinde YDA.....	7
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	11
2.1. Yapı Malzemeleri Üretimi İçin Yaşam Döngüsü Analizi	11
2.2. Yapının İnşa-Kullanım-Enkazı İçin Yaşam Döngüsü Analizi	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	15
3.1.MATERYAL	15
3.1.1 Uçucu Kül	15
3.1.2. Doğal Puzolan.....	15
3.1.3. Granüle Yüksek Fırın Cürufu	15
3.1.4. Klinker	16
3.1.5. Agrega.....	16
3.1.6. Süperakışkanlaştırıcı Katkı Maddesi	16
3.2. YÖNTEM	17
3.2.1.Karışımların Hazırlanması	17
3.2.2 Mekanik Analiz.....	19
3.2.3 Kimyasal Analiz	19
3.2.4. Yaşam Döngüsü Analizi	20
3.2.5. Yaşam Döngüsü Maliyeti	23
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	24
4.1. Mekanik Analiz Sonuçları	24
4.2. Yaşam Döngüsü Analizi Sonuçları	26
4.3. Yaşam Döngüsü Maliyeti Sonuçları	29
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	32
5.1 Sonuçlar	32
5.2 Öneriler	33
KAYNAKLAR	34

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

nm: nanometre

µm: mikrometre

₺: Türk lirası

Kısaltmalar

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

YDA: Yaşam Döngüsü Analizi

UK: Uçucu Kül

DP: Doğal Puzolan

GYFC: Granüle Yüksek Fırın Cürufu

GK: Gömülü Karbon

GE: Gömülü Enerji

XRF: X Işını Florans Spektrometresi

SA: Süperakışkanlaştırıcı

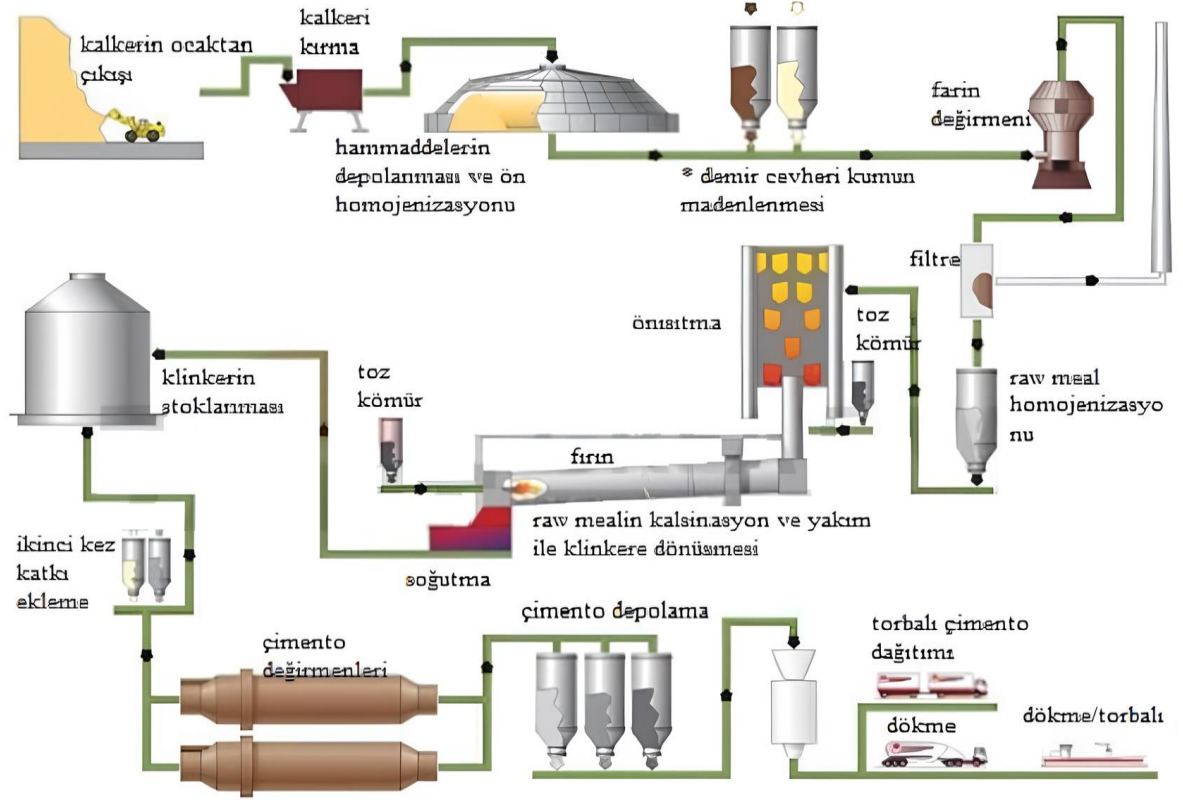
PÇ: Portland Çimentosu

1. GİRİŞ

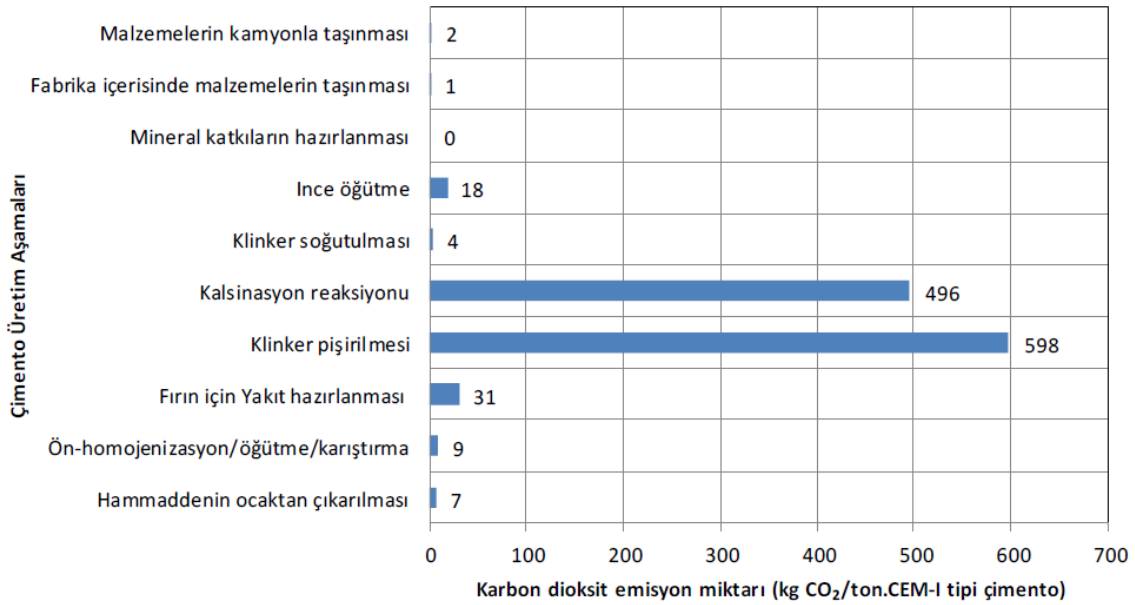
Çeşitli sektörlerin sebep olduğu; atmosferde bulunan zararlı gaz ya da doğada bulunan zararlı malzemelerin, en aza indirgenmesi için çeşitli önlemler alınmaktadır. Bu önlemlerden en önemlisi önümüzdeki 29 yılı içine alan Avrupa Yeşil Mutabakatı'dır (Şahin ve Önder, 2021). Avrupa Yeşil Mutabakatı'na göre, atık malzemelerin ekonomide üç farklı kategoride değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bunlar; atık olan malzemelerin ayrıştırılarak diğer sektörlerde ürün olarak kullanılmasıyla sürdürülebilir üretim, bertaraf edilmesi ve doğal hammadde kullanımının sınırlandırılarak ürün döngüsünün sağlanması ile çevreyi korumaya yönelik destek sağlanmasıdır (Şahin ve Önder, 2021). Atık malzeme israfının önlenmesi gelişmekte olan ülkelerde ekonomik anlamda olumlu etki yaratabilecektir. Yapı malzemesi olarak sıkça kullanılan ve yapının temel öğelerinden biri olan çimentonun üretimi de çeşitli çevresel sorunlara yol açmaktadır. Portland çimentosu üretimi başlangıcından itibaren muazzam bir gelişme göstermiştir. Dünya çimento üretimi 1995 yılında 1,4 milyar tondan 2020 yılında 4,1 milyar tona kadar çıkmıştır. Türkiye'deki çimento üretim ve tüketim miktarı ise milyon ton olarak 2000 yılından bu yana tam olarak iki katına ulaşmıştır. Küresel boyutlarda ise 2020 yılında dünya üreticileri arasında Türkiye çimento üretiminde ilk 10 içerisinde yer alırken, ihracatta ise 2. sırada yer almıştır (Çağatay, 2020; USGS 2022).

1.1.Çimento Üretimi

Kalker (kireçtaşı), kil, marn, demir cevheri ve boksit gibi hammaddelerden oluşan Portland Çimentosu, kalker ve kil karışımının yüksek dereceli fırınlarda pişirilmesi sonucu oluşan klinkerin az miktarda alçıtaşı ile öğütülmesi ile elde edilmektedir. (Özdenkoş, 2010; Aydın, 2019). Çimento üretiminde en önemli aşama klinker üretimidir çünkü klinker üretimi yüksek karbondioksit emisyonuna neden olur. Bu işlem, fosil yakıtların yanması ile ilişkili olanlara ek olarak, yüksek karbon dioksit (CO₂) emisyonlarına neden olan kalsiyum karbonatın kalsiyum okside ayrışmasına dayanır. (Anonim, 2020). Şekil 1.1'de çimento üretimi ve Şekil 1.2'de üretim aşamalarının CO₂ emisyonları gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Çimento Üretim Aşamaları (Anonim, 2019)

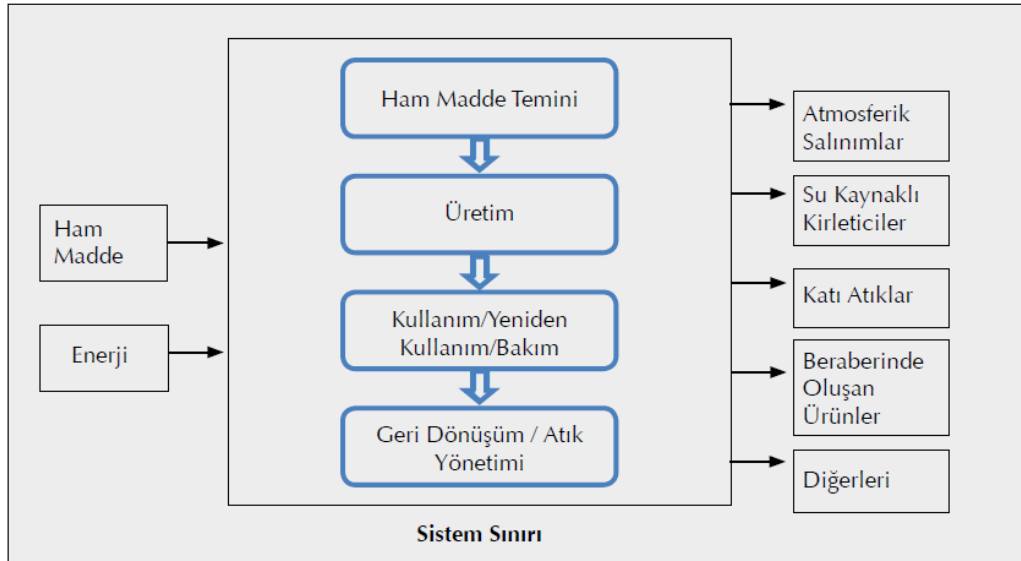


Şekil 1.2. Türkiye’de CEM-I çimento üretim aşamalarının CO₂ emisyonları (kg CO₂/ton.çimento) (Gürsel ve Meral 2012)

Dünyadaki CO₂ salınımı %7 oranında çimento üretiminden açığa çıkmaktadır (Alsubari ve diğ., 2016.; Maraghechi ve diğ., 2017; Naqi ve Jang, 2019). Çimento üretiminin azaltılması ya da çimento yerine kullanılabilecek malzemelerin bulunması ile bu salınımın azaltılacağı açıktır. Çimento yerine alternatif malzeme arayışı birçok araştırmacının araştırma konusu olmuştur (Ahmad ve diğ., 2021). Farklı sektörlerden ortaya çıkan ve puzolanik özellik gösteren bazı malzemelerin, belirli oranda çimento yerine kullanılmasının betonun mekanik özellikleri açısından mümkün olduğu belirlenmiştir. (Chen ve diğ., 2020; Hossain ve diğ., 2021). Çelik üretiminden açığa çıkan granüle yüksek fırın cürufu (GYFC), termik santrallerden açığa çıkan uçucu kül (UK) ve doğal puzolan (DP) bunlardan bazılarıdır.

1.2.Yaşam Döngüsü Analizi

İnsan yaşamının getirdiği sonuçlar neticesinde ortaya çıkan küresel ısınma ve iklim değişikliği günümüzde devletler arasında anlaşmalara ve protokollerin oluşturulmasına sebep olmuştur. Ortaya çıkan çevresel etkileri en aza indirmek, dahası önüne geçebilmek için ürünün-hizmetin oluşturduğu çevresel etkiler somut bir şekilde ortaya konulmalıdır. Yaşam Döngüsü Analizi (YDA); bir ürünün, hammadde temininden başlayarak üretim sürecinin ve yaşam boyunca olan hizmet aktivitesinin (Şekil 1.3.) çevreye olan etkisini değerlendirmek ve belirleyebilmek için kullanılan bir yöntemdir (Karimpour ve diğ., 2014).

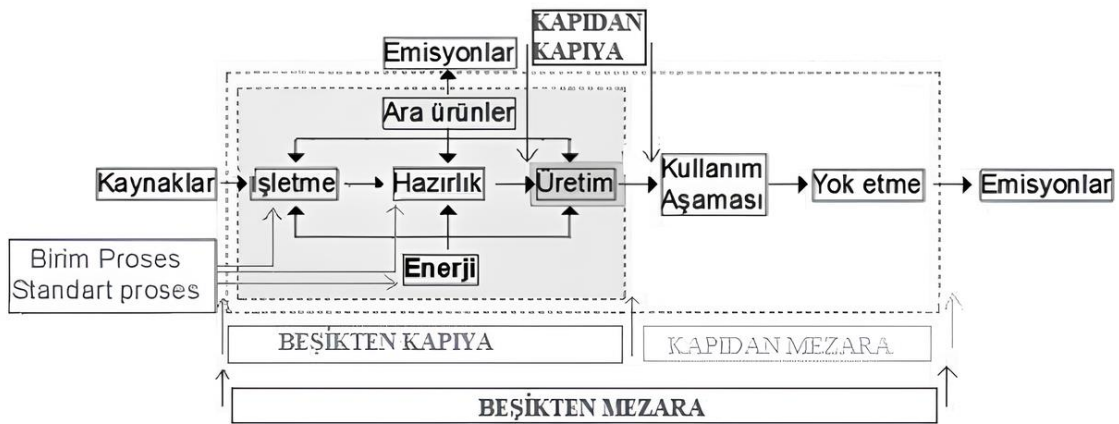


Şekil 1.3. YDA'nın aşamaları (USEPA, 2006)

YDA, elde ettiği sayısal veriler ve karşılaştırmalı analizleri sayesinde son yıllarda karmaşık karar verme süreçlerinde gittikçe daha sık başvurulmuş ve sürekli geliştirilen bir yöntem haline gelmiştir. (Guinee ve diğ., 2011).

YDA kapsamında incelenen ürün ya da hizmet doğal kaynak tüketimi bazlarında değerlendirilir (iklim değişikliği, stratosferik ozon tabakasındaki incelmeye, ötrifikasyon, asidifikasyon, toksik emisyonlar vb.). Ürünün ya da hizmetin tüm yaşamını ve süreçler arasındaki bağlantıları bütünsel olarak değerlendiren YDA, ürünün ya da hizmetin “beşikten mezara” tüm süreçlerinde yarattığı çevresel etkileri sayısal verilerle kanıtlamaktadır. Birçok çevresel etki değerlendirme yöntemlerinde hammadde eldesi, sevkiyat ve nihai bertaraf gibi aşamalar dikkate alınmazken, YDA yönteminde bu aşamalar değerlendirmeye alınmaktadır.

YDA yöntemi ile yapılan çalışmalar, ürünün ya da hizmetin yaşam döngüsünün kapsadığı alana bağlı olarak “beşikten mezara”, “beşikten kapıya”, “beşikten beşiğe” ve “kapıdan kapıya” şeklinde sınıflandırılır. “Beşikten mezara” kavramı ürün ya da hizmetin hammadde eldesinden (beşik) başlayarak bertaraf edilmesine kadar olan süreçteki çevresel etkilerini kapsar. “Beşikten kapıya” kavramı ürün ya da hizmetin hammadde eldesinden (beşik) kullanım için fabrikaya iletildiği (kapı) süreçteki çevresel etkilerini kapsar. “Beşikten beşiğe” kavramı ürün bertarafı aşamasından sonra ürünün geri dönüştürülerek tekrar kullanıldığı döngüyü, “kapıdan kapıya” kavramı ise seçilen tek bir aşamada analiz yapıldığı döngüyü kapsamaktadır. (Jimenez-Gonzalez,2000). Şekil 1.5.’te ürün ya da hizmetin aşamaları verilmiştir.



Şekil 1.5. YDA Süreci (Benli Yıldız, 2017)

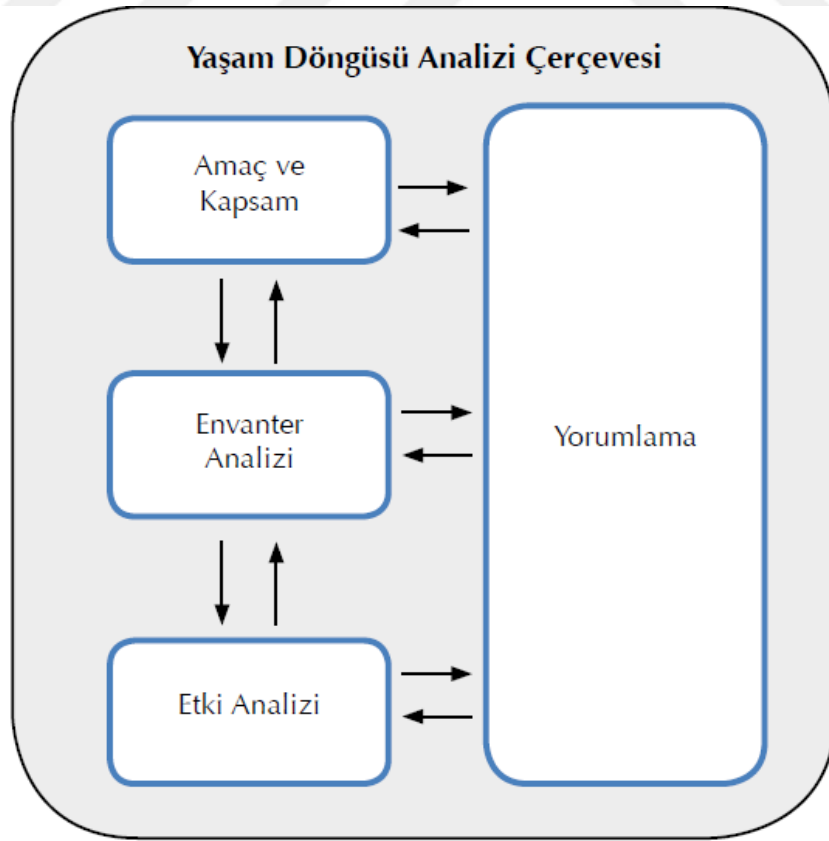
YDA, bir ürün ya da hizmetin tüm yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkabilecek çevresel etkileri kapsadığından, değerlendirilen bu çevresel etkileri tüm boyutlarıyla ve kapsamlı olarak yansıtarak sayısal verilerle destekler.

YDA kapsamlı bir analiz yöntemi olduğundan, ürünün ya da hizmetin değişimi, yenilenmesi ya da farklı senaryolarda kullanılması için iyi bir kılavuz oluşturmaktadır.

1.2.1. YDA Metodolojisi

Dört aşamadan oluşan YDA metodolojisi (Şekil 1.4.) temel olarak:

- Analizi yapılacak ürünün ya da hizmetin oluşturulması için kullanılan enerji, su ve diğer hammaddelerin (girdi) ve bu süreçlerde oluşan çevresel etkilerin (çıktı) envanterinin çıkarılması,
- Envanter analizi sonucu oluşabilecek çevresel etkilerin değerlendirilmesi ve karşılaştırılması,
- Elde edilen sayısal verilerin sistematik ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek, karar vericilere sunulmasını kapsar.



Şekil 1.4.. YDA metodolojisi (USEPA, 2006)

Amaç ve Kapsam: Analizin amacının belirlenmesi ve amaca uygun sınırlarının çizilerek detaylandırma aşamasıdır. Yapılan çalışmanın amacı YDA'nın ne sebeple yapıldığı açıkça ifade edilmelidir.

Envanter Analizi: Analiz yapılacak ürünün ya da hizmetin döngüsü dahilinde tüketilecek enerji, su, hammadde kullanımı ve bunlara bağlı olan çevresel emisyonların kapsamlı bir şekilde belirlendiği aşamadır. Bu bölümde toplanan veriler kalite standartları açısından veri setleri için son 10 yıl içinde, üreticilerin spesifik verileri için son 5 yıl içinde toplanmış olmalıdır. Analizin amacına uygun seçilen temsili bölgenin kapsam içinde kalan verilerin tamamını sağlaması gerekmektedir. (Gervasio ve Dimova, 2018).

Etki Analizi: Envanter analizi aşamasında belirlenen girdi ve çıktıların (enerji, su, hammadde kullanımı ve çevresel emisyonlar) insan sağlığı ve çevre üzerindeki olası etkileri kendi aralarında değerlendirildiği ve sonuçların karşılaştırıldığı aşamadır. Çizelge 1.1'de literatürde kullanılan çeşitli emisyonların olumsuz sonuçları örnek olarak verilmiştir.

Çizelge 1.1. Çevresel emisyonlar ve olumsuz sonuçları (Canan ve Bakır, 2008)

Sistemin çıktısı/ emisyonlar	Oluşan etki	Etkinin olumsuz sonuçlarının sınıflandırılması
CO ₂ CH ₄ N ₂ O CFC	→ Sera etkisi (GWP)	Küresel ısınma Kg eşd. CO ₂
SO ₂ NO _x NH ₃ HCL	→ Asidifikasyon (AP)	Asit yağmuru: Kg eşd. SO ₂
Pb Hg CO Partikül	→ İnsan zehirlenmesi	Havada Kg eşd. Pb (kurşun)

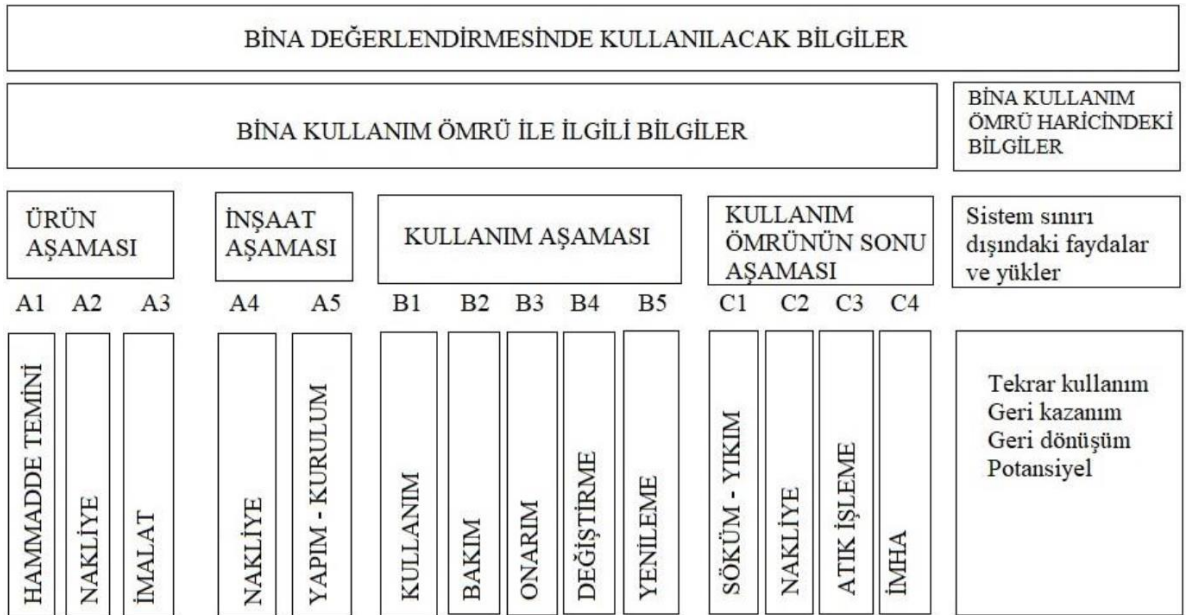
Yorumlama: Bu aşamada envanter ve etki analizi aşamalarından elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilir. Birden fazla ürün ya da hizmetin karşılaştırılması ile elde edilen sonuçlara göre çevresel emisyon açısından daha yararlı olan ürün, süreç ya da hizmet seçilebilir. (TS EN ISO 14040). Yorumlama aşamasında elde edilen çıkarımlar ve yorumlar sonucunda çevresel emisyonun azaltılması için hangi aşamada değişiklikleri gidileceği (hammadde temini, üretim veya kullanım gibi) belirlenerek analiz sonlandırılır (Alkaya, 2012).

1.2.2. Bina Ölçeğinde YDA

Yapı sektörü, yeryüzünden çıkarılan hammaddelerin yaklaşık %50'sini kullanmaktadır (WGSC, 2004). Yapı sektörü yıllık küresel enerji üretiminin %36'sını kullanmakta ve kullanılan bu enerji kaynaklı karbondioksit emisyonları, toplam emisyonlarının %39'unu oluşturmaktadır (UNEP, 2017).

YDA, ürün ölçeğinde yapıldığı gibi bina ölçeğinde de yapılabilmektedir. Bina ölçeğinde yaşam döngüsü analizi için yayınlanmış ISO'nun 15978 numaralı 'Yapılarda Sürdürülebilirlik – Binaların Çevresel Performansının Değerlendirilmesi – Hesaplama' isimli standardı kullanılır (Azkur, 2019). Bir yapı, malzemelerinin temininden yıkımına kadar olan süreçte hatta yıkım sonrası süreçte çevresel etkilere yol açar. Bu yüzden binaların tasarlanmasında detaylı çalışmalar yapılmalıdır. Ürün ve malzemeden kaynaklanan çevresel etkiler çok iyi ölçülmeli, analiz edilmeli ve karşılaştırılmalıdır. Günümüz dünyasında bu işlemler bir ihtiyaç haline gelmiş ve YDA bu konuda standart bir yaklaşım olarak kullanılmaya başlanmıştır (ETKB, 2016).

Bina ölçeğinde yaşam döngüsü analizi, A, B, C ve D olmak üzere dört ana modülden oluşmaktadır. (Şekil 1.6.)'da bu modüller ve sınırları verilmiştir.



Şekil 1.6. Binalar için Yaşam Döngüsü Analizi modülleri (TS EN 15978: 2012-04)

TS EN 15978 numaralı standarda göre bu modüllerin kapsadığı aşamalar şu şekilde açıklanmıştır:

A MODÜLÜ: Malzemelerin üretiminden başlayıp inşaat aşamasının bitişine kadar olan kısmı kapsar.

A1	Hammadde eldesi
A2	Hammaddenin üreticiye ulaştırılması
A3	Yapı malzemesinin üretim aşaması ve nakliyesi
A4	Yapı malzemelerinin fabrikadan şantiye alanına nakliyesi (İş makineleri de dahil)
A5	Yapının inşaatı ve bu süreçte kullanılan tüm enerji kaynakları

B MODÜLÜ: Binanın kullanım aşaması olarak ifade edilir. Yapım aşaması-bina ömrünün tamamlanması arasındaki zamanı içine alır.

B1	Yapının kullanımı
B2	Yapının bakımı (Temizlik, teknik bakım, ürün temini)
B3	Yapının tamir edilmesi (Tamir edilen parçaların süreci de dahil)
B4	Yapıda eleman-malzeme değişimi
B5	Yapıda bulunan ürünlerin yenilenmesi
B6	Yapı kullanım aşamasında tüketilen enerji (Isıtma, havalandırma, aydınlatma vb.)
B7	Yapı kullanım aşamasında tüketilen su (İçme suyu, yüzme havuzu, sauna vb.)

C MODÜLÜ: Binanın yıkımı, enkazın geri dönüşümü aşamalarını ifade eder.

C1	Yapının yıkılması-sökülmesi
C2	Enkazın atık alanına nakliyesi ve geri dönüşüm süreci
C3	Yapıdan çıkan ürünlerin yeniden kullanma için hazırlanması
C4	Kalan atıkların imhası

D MODÜLÜ: Yapıdan kalan enkaz içerisindeki ürünlerin yeniden kullanılması, iyileştirilmesi ve geri dönüşümünün etki- yarar bakımından değerlendirilme aşamasıdır.

Tablo 1.1.'de bazı geri dönüştürülebilen yapı malzemeleri ve bu malzemelerin kullanım alanları yer almaktadır.

Tablo 1.1. Malzemelerin geri dönüşüm yöntemleri ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanım alanları (Tam ve Tam, 2006).

Malzemeler	Geri Dönüşüm Yöntemi	Geri Dönüştürülmüş Malzeme
Asfalt	Soğuk Geri Dönüşüm Isı Üretimi Minnesota Üretim Paralel Silindir Üretim Uzatılmış Silindir Üretim Mikrodalga Asfalt Geri Dönüşüm Sistemi Finfalt Yüzey Yenileme	Geri Dönüştürülmüş Asfalt Asfalt Agregası
Tuğla	Yakıp kül (ash) haline getirme Agrega haline getirmek için kırma	Balçık kül Dolgu malzemesi Hardcore
Beton	Agrega haline getirmek için kırma	Geri dönüştürülmüş agregası Yeni beton yapımında kullanma Nehir seti Dolgu malzemesi
Demir İçeren Metaller	Eritmek Doğrudan yeniden kullanma	Geri dönüştürülmüş çelik parçaları
Cam	Doğrudan yeniden kullanma Öğütürerek toz haline getirme Cilalama Kırıp agregaya katma Yakıp kül (ash) haline getirme	Geri Dönüştürülmüş Pencere Ünitesi Cam elyafı Dolgu malzemesi Seramik Kaldırım taşı Asfalt Geri dönüştürülmüş agregası Çimento yerine sentetik toprak
Taş	Agrega haline getirmek için kırma Kül(ash) haline getirmek için 900° C 'ye ısıtma	Isı yalıtım betonu Geleneksel çamur tuğla Sodyum silikat tuğla
Demir İçermeyen Metaller	Eritmek	Geri dönüştürülmüş metal
Kağıt/Karton	Temizleme	Geri dönüştürülmüş kağıt
Plastik	Kriyojenik öğütme ile toza dönüştürme Kırma, kesme Agrega haline getirmek için kırma Yakıp kül (ash) haline getirme	Panel Geri dönüştürülmüş plastik Plastik kereste Geri dönüştürülmüş agregası Alan doldurma drenajı Asfalt Sentetik toprak
Ahşap	Doğrudan yeniden kullanma Agregaya karıştırma Maden eritme ocağında oksijenini çıkarma Gazlaştırma ve ısı kesim Yüksek su buharı altında şekil verme	Tek parça ahşap Mobilya ve mutfak malzemeleri Hafif geri dönüştürülmüş agregası Enerji kaynağı Kimyasal üretim Ahşap kaynaklı panel Plastik kereste Geofiber İzolasyon levhası

Bu tez çalışması kapsamında, çimento üretiminden kaynaklı çevresel kirliliklerin en aza indirilmesi için klinker miktarı azaltılmış mineral katkı malzemeli çimentolar üretilerek numuneler hazırlanmıştır. Çimento üretimi, atmosferik karbondioksit salınımının önemli bir kaynağıdır ve bu çalışma, çevre dostu alternatiflerin geliştirilmesi yoluyla bu salınımı azaltmayı hedeflemektedir. Çalışma kapsamında kullanılan mineral katkılar; uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve doğal puzolanlar gibi çeşitli endüstriyel ve doğal yan ürünlerdir. Bu malzemeler, çimento üretiminde klinker tüketimini azaltarak enerji tasarrufu sağlamak ve çevresel sürdürülebilirliği artırmaktadır. Farklı oranlarda mineral katkı ile laboratuvarda üretilen numunelere mekanik testler yapılmış ve dayanımları belirlenmiştir. Yaşam Döngüsü Analizi ve Yaşam Döngüsü Maliyeti ile numunelerin çevre-maliyet değerleri hesaplanmış katkısız referans numunesi ile kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilere göre bir dayanım-çevre-maliyet grafiği çizilerek en uygun çimento karışım oranı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, ekonomik ve çevre dostu çimentonun kullanımıyla ilgili potansiyel avantajlar da incelenmiştir.

Son olarak, elde edilen ekonomik ve çevre dostu çimento formülasyonu, farklı yapı senaryolarında uygulandığında karbon salınımını ne kadar azalttığı hesaplanmıştır. Bu çalışma, çevreye duyarlı, dayanıklı ve maliyet açısından uygun yapılar için çimento seçimi konusunda değerli bir öneri sunmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Yapı Malzemeleri Üretimi İçin Yaşam Döngüsü Analizi

Çankaya ve Pekey, (2019) Türkiye’de geleneksel çimento üretimi ile katkılı çimento üretiminin karşılaştırmalı bir YDA yapmışlar ve çimento üretiminde katkı malzemelerinin kullanımının çevresel açıdan olumlu etkisini sayısal verilerle açıklamışlardır. Çalışmada çimento üretiminde katkı malzemesi kullanılmasının yanı sıra artık yağın ikincil yakıt olarak kullanılmasının da etkilerini karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Türkiye’deki bir çimento fabrikasından elde edilen verilere dayanan çalışmada, çevresel analizler için SimaPro 8.0.4 kullanılmış olup klinker ve çimento üretiminin iklim değişikliğine, kaynaklar ve insan sağlığına olan etkisi gösterilmiştir. Çimento fabrikalarının çimento üretiminde farklı atık türlerinin kullanımının etkileri, klinker/çimento ikame oranları gibi aşamalara yaşam döngüsü perspektifiyle karar mekanizması geliştirmeyi amaçlamıştır.

Çankaya ve Pekey, (2018) Türkiye’de 1 ton klinker üretiminin yaşam döngüsü analizini yapmışlar ve alternatif yakıtlar (reddedilen yakıt ve kuru çamur) geliştirerek 6 farklı alternatif senaryo oluşturup karşılaştırmalı YDA sunmuşlardır. Oluşturulan alternatif senaryolarda petrokok, ithal kömür, yerli kömür, doğalgaz ve kuru çamurun klinkerin pişirilmesinde kullanılan yüzdeleri değiştirilmiş ve çevre-ürün açısından optimum yüzdeler elde edilmeye çalışılmıştır. 1 ton klinkerin pişirilmesinin YDA analizi SimaPro 8.0.4 programı kullanılarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda 6. senaryonun (1 ton klinker üretmek için gerekli yakıtın %30 pis su çamur, %30 petro kok, %10 ithal kömür, %30 yerli kömür ve klinker fırınında yakma ve ısı değerinin 2500 kcal/kg olduğu senaryo) en çevreci olduğu kanıtlanmıştır.

Meral ve ark., (2014) Türk uçucu kül- portland çimentosu harçlarının basınç dayanımı sonuçlarından bir veri tabanı hazırlamış ve karşılaştırmalı YDA yapmışlar, analiz aşamasında ana çevresel performans ölçütü olarak 1³ betonun küresel ısınma potansiyelini ölçüt almışlardır. Literatürden farklı oranlarda uçucu kül içeren beton karışımları seçilmiş, karışımların YDA için “Green Concrete LCA” yazılımı kullanılmıştır. Hesaplamalarda Türkiye ortalama elektrik dağılımı ve Türkiye Çimento Sektörü ortalama yakıt karışımı kullanılmış, daha sürdürülebilir bir beton üretimi için çimento yerine uçucu külün kullanılabilirliğini kanıtlamışlardır.

Tükenmez, (2019) yaptığı çalışmada 21 adet mineral katkı maddeli ve geri dönüşüm agregalı numuneler hazırlayarak YDA incelemesini yapmıştır. Ayrıca, oluşturulan yeşil beton karışımlarının Türkiye'de Enerji ve Çevresel Tasarımda Liderlik (LEED) derecelendirme sistemi ile sertifikalandırılan yeşil binalar için gerçekleştirilen LCA çalışmasına entegrasyonu sağlanarak betonun çevresel etkileri beşikten mezara değerlendirilmiş, YDA çalışmalarında SimaPro yazılımı ve CML etki değerlendirme yöntemi kullanılmıştır.

Demirel ve ark., (2019) yaptıkları çalışmada farklı oranlarda PÇ, uçucu kül ve camPET kullanarak YDA ile karşılaştırma yapmışlardır. Karşılaştırmalı yaşam döngüsü değerlendirmesi için ReCiPe veri tabanına sahip YDA yazılımı SimaPro kullanmışlardır. Çalışmada fonksiyonel birim olarak bir kg/m³ harç seçilmiş ve YDA için malzeme çıkarma, taşıma ve üretim ile kullanılan sistem sınırlarını içeren bir beşikten kapıya yaklaşımı izlenmiştir.

Tucker ve ark., (2018) araştırmalarında bir belediye katı atık malzemesi olan cam kırıntılarını geri kazanım tesisinden geri dönüştürülmüş cam tozuna dönüştürmüşler ve portland çimentosu/beton üretiminde puzolanik malzeme olarak kullanmışlardır. Portland çimentosu ve cam tozu ikame edilmiş numunelerin çevresel ve ekonomik nitelikleri değerlendirilmiştir.

Tangüler, (2015) yaptığı çalışmada Türkiye'de üretilen uçucu küllü beton karışımlarının çevresel performansını hesaplamış, Demirel ve ark. (2019) beşikten-kapıya yaklaşımı ile atık malzeme (camPET ve uçucu kül) kullanımının kendiliğinden yerleşen harç üretiminin çevresel performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymuşlardır.

Kurda ve ark., (2018) farklı katkı oranlarına sahip olan uçucu kül ve geri dönüştürülmüş beton agregaları içeren beton karışımlarının çevresel etkilerini karşılaştırmışlar ayrıca Kurda ve ark., (2020) yaptıkları diğer bir çalışmada yüksek miktarda uçucu kül ve/veya geri dönüştürülmüş agrega içeren beton karışımlarının mekanik davranışlarını, çevresel etkilerini ve kaynak kullanımını anlamak için kapsamlı deneysel çalışmalar yapmışlardır.

Seto ve ark., (2017) çimento ikamesi olarak %10, 25 ve %50 uçucu kül içeren betonun YDA modellerini, dört tahsis senaryosuna dayalı olarak oluşturmuşlardır.

Tun ve ark., (2020) Myanmar çimento sektörünün çevresel etkilerini YDA kullanarak değerlendirmişler, Stafford ve ark., (2016) Güney Avrupa'daki temsili bir çimento fabrikasında atıkların, fosil yakıtların kısmi ikamesi olarak kullanılmasının çevresel etkilerini değerlendirmişler, Sjunnesson, (2005) normal ve dona dayanıklı beton olmak

üzere iki tip beton için YDA yapmış, Tait ve Cheung, (2016) farklı çimento esaslı karışımlar içeren beton karışım tasarımları üzerinde bir "beşikten kapıya" YDA gerçekleştirmişlerdir.

Huntzinger ve Eatmon, (2009) yaptıkları çalışmada dört farklı çimento üretim sürecinin çevresel etkisi değerlendirmiştir. Bunlar: (1) geleneksel portland çimentosu üretimi, (2) katkı malzemeli çimento (doğal puzolan, uçucu kül), (3) çimento atığı olan çimento fırını tozunun %100' ünün fırın işlemine geri dönüştürülmesi ve (4) geri dönüştürülmüş fırın tozu ile üretilen portland çimentosudur. Çevresel etkileri incelenen bu dört senaryonun en çevreci olanını katkı malzemesi kullanılan çimento üretimi olarak belirlemişlerdir.

Gürsel ve Meral (2012) yaptıkları çalışmada CEM-I çimento üretiminin çevresel emisyonlarını hesaplamışlar ayrıca çimentoyu farklı mineral katkılarla ikame ederek karşılaştırma yapmışlardır.

Ruan ve Unluer (2016) yaptıkları çalışmada portland çimentosuna göre üretim sıcaklıkları daha düşük olan ve potansiyel olarak sürdürülebilir bir bağlayıcı olarak önerilen reaktif magnezya (MgO) çimentoları üretiminin çevresel etkilerini değerlendirmişler ve bir YDA yaklaşımı kullanarak portland çimentosu üretimi ile bir karşılaştırma yapmışlardır.

2.2. Yapının İnşa-Kullanım-Enkazı İçin Yaşam Döngüsü Analizi

Bir yapının çevresel etkilerinin irdelenmesinde yaşam döngüsü analizin kullanılması konusunda yapılan çalışmalar uygunluğunu kanıtlamış (Rashid ve Yusoff, 2015; Khasreen ve ark., 2009; Koç ve ark., 2022) ve Azkur, (2019), yaptığı bir çalışmada gömülü karbon ve enerjiyi ölçen “Yaşam Döngüsü Analizi (YDA)” yöntemini kullanmış ve yapının inşa öncesi evresine dikkat çekerek, bu süreçte tüketilen enerjinin ve doğaya yapılan karbon salınımının taşıyıcı sistemler bağlamında değerlendirmiştir.

Kayılı, (2020) yaptığı çalışmada, hafif ahşap ve çelik duvar konstrüksiyonların (aynı ısı geçirgenlik katsayısı, alan ve hacme sahip) gömülü karbon değerlerini hesaplamıştır. Çalışmada üç farklı doğrama çeşidine sahip pencerenin (ahşap, PVC ve alüminyum doğrama) ayrı ayrı gömülü karbon değerlerini hesaplamıştır. Sonuç olarak çelik malzemenin alan ve hacim olarak diğer senaryoya göre daha az oranda kullanılmasına rağmen gömülü karbon değerinin daha yüksek çıktığını göstermiştir. Ayrıca hafif çelik

konstrüksiyonlarının yaşam ömrünün tamamlanmasında sonra mutlaka geri dönüştürülerek tekrar kullanılması gerektiğini önermiştir.

Canan, (2008) yaptığı bir çalışmada binaların ömür süreçlerinde enerji tüketimlerini ve oluşabilecek çevresel etkileri araştırmıştır. ‘Yaşam Döngüsü Analizi’ yöntemiyle, bina ömür süreçlerinde enerji tüketimlerini ve çevresel etkilerini belirlemiştir. Konya yerel ölçeğinde seçtiği bir yapı adasındaki sosyal konutları bu yöntemle analiz etmiş ve aynı yapı adasında iyileştirilmiş bir proje geliştirmiştir. Her iki projenin enerji tüketimlerini ve meydana getirdikleri çevresel etkileri, bina yaşam döngüsünde belirlenen evreler kapsamında sayısal sonuçlar elde ederek karşılaştırmıştır.

Kartal, (2018) yaptığı bir araştırma çalışmasında yapıda sık kullanılan malzemelerin ekolojik özelliklerine, bu malzemelerin ekolojik özelliklerinin iyileştirilmesi için yapılan çalışmalara, çevresel etkisi düşük alternatif yapı malzemelerine değinmiştir.

Taygun, (2005) yaptığı bir çalışmada yapı ürünlerinin yaşam döngüsü analizine yönelik bir model önerisi sunmuştur. Yapının tasarımcısı, yapı ürünü üreticisi ve kullanıcılarının bu süreçte yapının çevresel emisyonları hakkında bilinçlendirilmesi, bu bağlamda yapının çevresel emisyonlarının önlenmesi ile ilgili zorunlulukların getirilmesi, yapı ürünlerinin üretim teknolojisinin geliştirilmesi hatta değiştirilmesi gerektiği sonucuna varmıştır.

Orhon ve Altın (2012) yaptıkları çalışmada beton yapıların karbon ayak izini YDA ile irdelemişler, Diş ve Canbaz (2015) bir alışveriş merkezinin çevresel etkilerini irdelemişler, Hozatlı ve Günerhan (2015) öncelikle yapılarda yaşam döngüsü analizi yöntemini irdelemişler ardından Muğla ilinde ahşap bir yapının çevresel etkilerini YDA ile bulmuşlardır.

Önal (2022) yaptığı çalışmada binalar için YDA yöntemini ve ilgili standartları dikkate alarak farklı iki yapım süreci için karşılaştırmalı YDA yapmıştır. Prefabrike (ön üretim) ve geleneksel (yerinde) yapım sistemi olmak üzere ahşap esaslı iki farklı senaryonun çevresel etkisini incelemiştir. Karşılaştırma sonucunda, prefabrike yapım sisteminin daha çevreci olduğunu göstermiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1.MATERYAL

Tez çalışması kapsamında kullanılan materyaller aşağıda sıralanmıştır.

3.1.1 Uçucu Kül

Kömürle çalışan termik santrallerde yanma sırasında taban külü açığa çıkmaktadır. Çalışmada Kütahya Seyit Ömer Termik Santrali'nden Temin edilen F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu külün XRF analizi sonucu oksit içerikleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Uçucu kül içeriği

	Oksitler (% ağırlıkça)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Uçucu Kül	60,78	21,68	5,48	3,48	1,71	0	1,95	0,74

3.1.2. Doğal Puzolan

Konya Çimento'da öğütülen doğal puzolan (tras) kullanılmıştır. Doğal puzolanın XRF analizi sonucu oksit içerikleri Çizelge 3.2. 'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Doğal puzolan içeriği

	Oksitler (% ağırlıkça)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CL
Doğal Puzolan	65,71	18,72	6,24	4,56	1,05	0	2,94	2,69	0,0071

3.1.3. Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Demir çelik fabrikalarında bir yan ürün olarak oluşan granüle yüksek fırın cürufu çalışma kapsamında Bolu Çimento A.Ş'den temin edilmiştir. Granüle yüksek fırın cürufunun (GYFC) XRF analizi sonucu oksit içerikleri Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. GYFC içeriği

	Oksitler (% ağırlıkça)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	S	MnO
GYFC	35	16,00	1,40	37,5	5,25	1,5	1,75

3.1.4. Klinker

Konya Çimento'dan temin edilen klinker kullanılmıştır. Klinkerin XRF analizi sonucu oksit içerikleri Çizelge 3.4.'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Klinker oksit içeriği

	Oksitler (% ağırlıkça)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Serbest CaO	CL
Klinker	21	5,54	4,31	65,87	1,21	0,19	0,62	0,41	0,81	0,0124

3.1.5. Agrega

Karışımlarda agrega olarak mermer kırığı kullanılmış, farklı elek çaplarına göre ayrıştırılmış ve numunelerde standart kum granülometrisinde kullanılmıştır. Çizelge 3.5.'de kullanılan agreganın tanecik boyutları, Çizelge 3.6.'da ise su emme kapasitesi ve özgül ağırlığı verilmiştir.

Çizelge 3.5.Karışımlarda kullanılan agreganın tanecik boyutu

	Tanecik Boyutu (% ağırlıkça)			
	0,075 altı	0,075-0,6	0,6-1,19	1,19-2,36
Mermer Kırığı	1	32	34	33

Çizelge 3.6.Karışımlarda kullanılan agreganın su emme kapasitesi ve özgül ağırlığı

Malzeme	Su Emme Kapasitesi (%)	Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)
Mermer Kırığı	0.49	2,67

Agreganın XRF analizleri yapılarak, oksit bileşimleri elde edilmiştir. Çizelge 3.6.'den da görüleceği üzere agrega yüksek oranda kalsiyum karbonat (CaCO₃) içeriğine sahip bir agrega türüdür.

Çizelge 3.7. Agreganın XRF analizi

	Oksitler (% ağırlıkça)							
	CaO	CO ₂	SrO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃
Agrega	61.0	38.7	0.02	0.25	0.07	0.17	0.05	0.01

3.1.6. Süperakışkanlaştırıcı Katkı Maddesi

Su/bağlayıcı oranını düşürmek, betonun işlenebilirliğini sağlarken hem erken hem de ileri yaş beton mukavemetini arttırmak için polikarboksilat esaslı

süperakışkanlaştırıcı (SA) katkı kullanılmıştır. Yüksek oranda su azaltma kapasitesine sahip, TS EN 934-2 standartına uygun olan Sika Viscocrete PC-15 süper akışkanlaştırıcı katkı karışımlara dahil edilmiştir.

3.2. YÖNTEM

3.2.1.Karışımların Hazırlanması

Tez çalışması kapsamında mekanik analiz için üretilecek olan numuneler 0,5 S/Ç oranında hazırlanmış ve çimento miktarının %1'i kadar akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Numunelerde kullanılan malzeme miktarları Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1.Numunelerde kullanılan malzeme miktarları

	Klinker (gr)	GYFC (gr)	DP (gr)	UK (gr)	Agrega (Mermer Kırığı)	Su
Referans	450				1350	225
GYFC5	427,5	22,5			1350	225
GYFC10	405	45			1350	225
GYFC15	382,5	67,5			1350	225
GYFC20	360	90			1350	225
GYFC25	337,5	112,5			1350	225
GYFC30	315	135			1350	225
GYFC35	292,5	157,5			1350	225
GYFC40	270	180			1350	225
GYFC45	247,5	202,5			1350	225
GYFC50	225	225			1350	225
DP5	427,5		22,5		1350	225
DP10	405		45		1350	225
DP15	382,5		67,5		1350	225
DP20	360		90		1350	225
DP25	337,5		112,5		1350	225
DP30	315		135		1350	225
DP35	292,5		157,5		1350	225
DP40	270		180		1350	225
DP45	247,5		202,5		1350	225
DP50	225		225		1350	225
UK5	427,5			22,5	1350	225
UK10	405			45	1350	225
UK15	382,5			67,5	1350	225
UK20	360			90	1350	225
UK25	337,5			112,5	1350	225
UK30	315			135	1350	225
UK35	292,5			157,5	1350	225
UK40	270			180	1350	225

UK45	247,5			202,5	1350	225
UK50	225			225	1350	225
Toplam	10237,5	1237,5	1237,5	1237,5	41850	6975

İlk olarak bağlayıcı sistemini oluşturan çimento ya da ikame yüzdesine göre mineral katkı tartıldıktan sonra çimento mikseri ile 1 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karışım suyuna süperakışkanlaştırıcı katkı eklenmiştir. Bağlayıcıların 1 dakika kuru olarak karıştırılmasından sonra üzerine karışım suyu eklenmiş ve 60 saniye boyunca karıştırılmıştır. Sonrasında 30 saniye boyunca karışıma yavaş yavaş mermer kırığı eklenmiştir. Daha sonra mikser durdurulup bir spatula yardımıyla kabın tüm kenarları ve tabanı da dahil olmak üzere sıyrılarak 60 saniye karıştırılmıştır sonraki 60 saniye boyunca harç hızlı devirde tekrar karıştırılmıştır. Tablo 3.2.'de kullanılan mineral katkıların klinker ile ikame yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 3.2. Çalışmada kullanılan mineral katkı oranları

	Klinker	Granüle Yüksek Fırın Cürufu	Doğal Puzolan	Uçucu Kül
Referans	100%	-	-	-
GYFC5	95%	5%	-	-
GYFC10	90%	10%	-	-
GYFC15	85%	15%	-	-
GYFC20	80%	20%	-	-
GYFC25	75%	25%	-	-
GYFC30	70%	30%	-	-
GYFC35	65%	35%	-	-
GYFC40	60%	40%	-	-
GYFC45	55%	45%	-	-
GYFC50	50%	50%	-	-
DP5	95%	-	5%	-
DP10	90%	-	10%	-
DP15	85%	-	15%	-
DP20	80%	-	20%	-
DP25	75%	-	25%	-
DP30	70%	-	30%	-
DP35	65%	-	35%	-
DP40	60%	-	40%	-
DP45	55%	-	45%	-
DP50	50%	-	50%	-
UK5	95%	-	-	5%
UK10	90%	-	-	10%
UK15	85%	-	-	15%
UK20	80%	-	-	20%
UK25	75%	-	-	25%
UK30	70%	-	-	30%
UK35	65%	-	-	35%
UK40	60%	-	-	40%
UK45	55%	-	-	45%

UK50

50%

-

-

50%

3.2.2 Mekanik Analiz

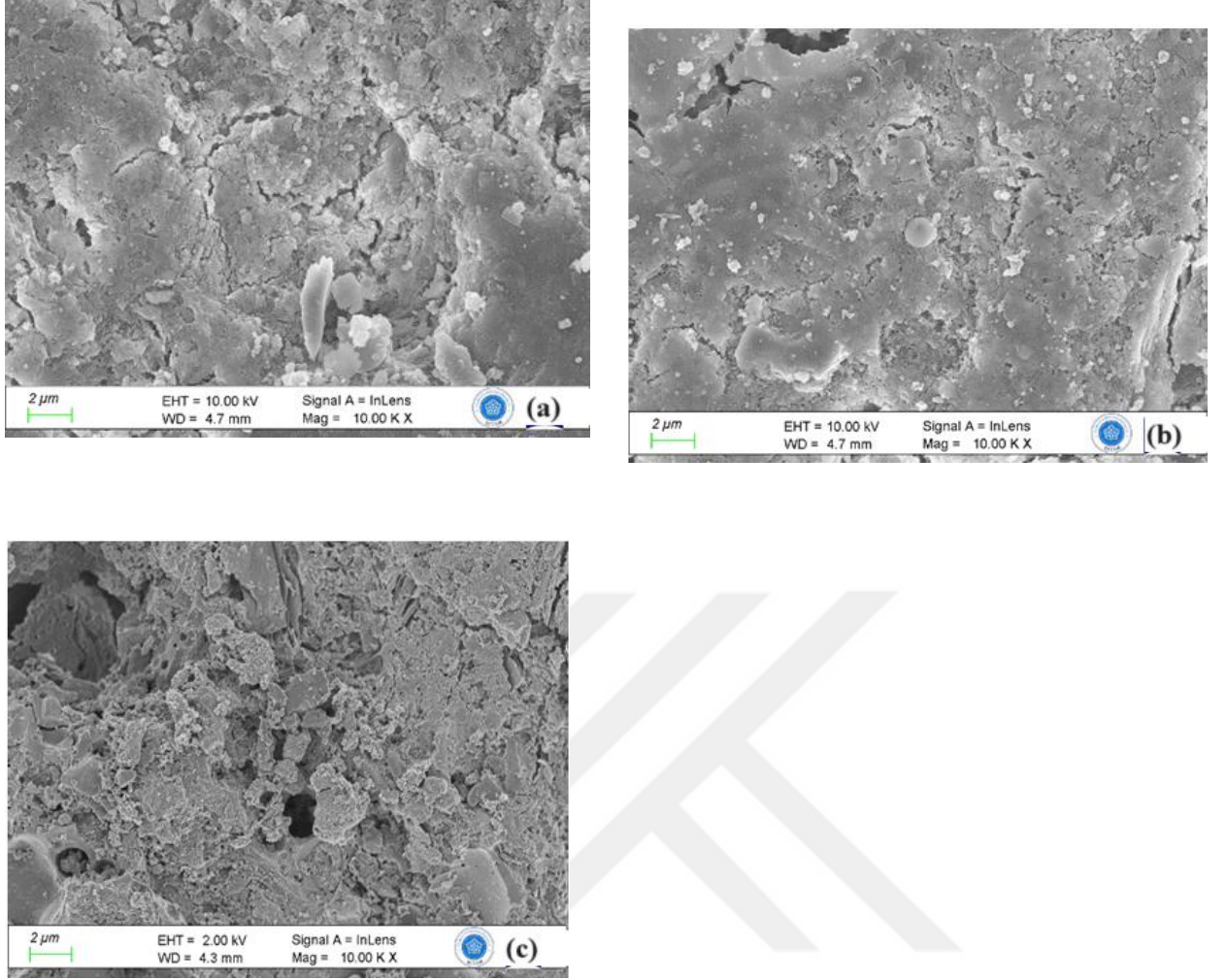
Sertleşmiş harçların mekanik özelliklerini belirlemek için, numune karışımları 40x40x160 mm boyutlarında yağlanmış kalıplara alınmış 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan numuneler kirece doygun su içerisinde oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır. 28 gün sonunda kür suyundan çıkarılan numuneler kurulandıktan sonra TS EN 196-1'e göre önce eğilme (Şekil 3.1a) daha sonra basınç deneyine (Şekil 3.1b) tabi tutulmuştur.



Şekil 3.1.Numunelerin eğilme ve basınç dayanımı testleri ((a) Eğilme dayanımı testi (b) Basınç dayanımı testi)

3.2.3 Kimyasal Analiz

Görüntüleme işlemleri numunelerin 28. yaş gününde hidratasyon alkol muamelesi ile durdurularak gerçekleştirilmiştir. Mineral katkı malzemelerinin SEM görüntüleri Şekil 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Mineral katkı malzemelerinin SEM görüntüleri ((a) Doğal puzolan (b) Uçucu kül (c) Granüle yüksek fırın cürufu)

3.2.4. Yaşam Döngüsü Analizi

3.2.4.1 Çalışmada Kullanılan Veri Tabanı

ICE (The Inventory of Carbon and Energy), YDA esaslı İngiltere Bath Üniversitesi'nde oluşturulmuş bir veri tabanıdır.

Yapı malzemelerinin gömülü karbon ve gömülü enerji değerlerine bir envanter oluşturan ICE veri tabanındaki veriler çeşitli kitaplardan, makalelerden ve konferans metinlerinden bilgi toplanmasıyla oluşturulmuştur.

Toplam 34 adet yapı malzemesi grubu envanterde listelenmiştir (Şekil 3.3.). Bu veri tabanı beşikten kapıya değerleri kapsamaktadır.

INVENTORY OF CARBON & ENERGY (ICE) SUMMARY				
Materials	Embodied Energy & Carbon Coefficients			Comments
	EE - MJ/kg	EC - kgCO ₂ /kg	EC - kgCO ₂ e/kg	
Asphalt				EE = Embodied Energy, EC = Embodied Carbon
General (Gravel or Crushed Rock)	0,063	0,0048	0,0062	Estimated from measured UK industrial fuel consumption data
Aluminium	Main data source: International Aluminium Institute (IAI) LCA studies (www.world-aluminium.org)			
General	155	8,24	9,16	Assumed (UK) ratio of 25.6% extrusions, 55.7% Rolled & 18.7% castings. Worldwide average recycled content of 33%.
Virgin	218	11,46	12,79	
Recycled	29,0	1,89	1,81	
Cast Products	169	9,28	9,22	Worldwide average recycled content of 33%
Virgin	226	11,70	13,10	
Recycled	25,0	1,35	1,45	
Extruded	154	8,16	9,08	Worldwide average recycled content of 33%
Virgin	214	11,20	12,50	
Recycled	24,0	1,88	2,12	
Rolled	155	8,26	9,18	Worldwide average recycled content of 33%
Virgin	217	11,50	12,80	
Recycled	29	1,67	1,79	
Asphalt				
Asphalt, 4% (bitumen) binder content (by mass)	2,86	0,059	0,066	1.68 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Modelled from the bitumen binder content. The fuel consumption of asphalt mixing operations was taken from the Mineral Products Association (MPA). It represents typical UK industrial data. Feedstock energy is from the bitumen content.
Asphalt, 5% binder content	3,39	0,064	0,071	2.10 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Comments from 4% mix also apply.
Asphalt, 6% binder content	3,93	0,068	0,076	2.52 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Comments from 4% mix also apply.
Asphalt, 7% binder content	4,46	0,072	0,081	2.94 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Comments from 4% mix also apply.
Asphalt, 8% binder content	5,00	0,076	0,086	3.36 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Comments from 4% mix also apply.
Brass				
... Aggregate Aluminium Asphalt Bitumen Brass Bronze Carpet Cement Ceramics Clay & Bricks Concrete Copper Glass Insulation Iron Lead Lime Linoleum Miscellaneous (+)				

Şekil 3.3. ICE veri tabanında verilen malzemeler

Çalışmadaki değerler ISO 14040'ta belirtilen yöntemlerle elde edilmiş verilerdir.

Bir malzemenin gömülü karbon ve gömülü enerji değerinin uluslararası kabul gören ortak bir değerde buluşması YDA yönteminin doğası gereği çok zordur. ICE veri tabanında verilen değerlerin diğer veri tabanlarında verilen değerlere göre daha güvenilir olduğu kanıtlanmıştır (Hammond ve Jones, 2008).

ICE veri tabanında malzemelerin kilogram başına gömülü karbon ve gömülü enerji değerleri verilmiştir (Şekil 3.4.). Gömülü enerji "mj/kg", gömülü karbon değeri "kgCO₂e/kg" birimleri ile belirtilmiştir. ICE veri tabanı en son 2011 yılında güncellenmiş, güncellemeler hala devam etmektedir. Çalışma kapsamında 'ICE V2.0' kullanılmıştır.

Material Profile: Concrete								
Embodied Energy (EE) ICE-Database Statistics - MJ/Kg								
Main Material	No. Records	Average EE	Std Deviation	Minimum EE	Maximum EE	Comments on the Database Statistics:		
Concrete	124	2.92	8.61	0.07	92.50	None		
Concrete, General	112	3.01	9.07	0.07	92.50			
Unspecified	85	2.12	2.86	0.07	23.98			
Virgin	27	6.09	18.24	0.59	92.50			
Concrete, Pre-Cast	12	2.18	0.78	1.20	3.80			
Unspecified	8	2.42	0.64	1.36	3.00			
Virgin	4	1.72	0.42	1.20	2.19			
Selected Embodied Energy & Carbon Coefficients and Associated Data								
Boundaries	Cradle to Gate		Data Range		(+/- 30%)		Specific Comments	
Material	Embodied Energy - MJ/Kg		Embodied Carbon - Kg CO2e/Kg					
General Concrete	0.75		0.107				it is strongly recommended to avoid selecting a 'general' value for concrete. Selecting data for a specific concrete type (often a ready mix concrete) will give greater accuracy, please see comments. Assumed cement content 12% by mass. Assumed use of weighted average UK cement.	
16/20 MPa	0.70		0.100				Using UK weighted average cement (more representative of "typical" concrete mixtures).	
20/25 MPa	0.74		0.107					
25/30 MPa	0.78		0.113					
28/35 MPa	0.82		0.120					
32/40 MPa	0.88		0.132					
40/50 MPa	1.00		0.151					
READY MIX CONCRETE (ICE CMC Model Results)								
BS 8500:2006 CONCRETE DESIGNATIONS								
Material	Embodied Energy - MJ/kg			Embodied Carbon - kgCO2e/kg			NOTE: Cradle to Gate	
FLY ASH								
% Cement Replacement - Ash	Fly	0% (using CEM I)	15%	30%	0% (using CEM I)	15%	30%	Note 0% is a concrete using a CEM I cement
GEN 0 (6/8 MPa)		0.55	0.52	0.47	0.076	0.069	0.061	Compressive strength designation C6/8 MPa. 28 day compressive strength under British cube method of 8 MPa, under European cylinder method 6 MPa. Possible uses: Kerb bedding and backing. Data is only cradle to factory gate but beyond this the average delivery distance of ready mix concrete is 8.3 km by road (see reference 244).
GEN 1 (8/10 MPa)		0.70	0.65	0.59	0.104	0.094	0.082	Possible uses: mass concrete, mass fill, mass foundations, trench foundations, blinding, strip footing.

Şekil 3.4. ICE veri tabanında verilen betonun gömülü karbon ve gömülü enerji değerleri

3.2.4.2. Yaşam Döngüsü Analizinin Hesaplanması

Numunelerin Gömülü Karbon ve Gömülü Enerji Değerleri

ICE veri tabanından alınan değerler ve çalışmada kullanılan numune yüzdeleri ile hesaplamalar yapılmış ve her bir numunenin gömülü karbon ve gömülü enerji değerleri hesaplanmıştır. Doğal puzolan (tras) doğadan ham madde olarak elde edildiğinden bir gömülü karbon ya da gömülü enerji katsayısı yoktur. Bu sebeple değerler klinkerin azaltılmasıyla elde edilmiştir.

Nakliyeden Kaynaklı Karbon Salınımı

Tablo 3.4.'te katkı malzemelerinin temin edildikleri yerler ve mesafeleri verilmiştir.

Tablo 3.4. Katkı malzemelerinin temin edildiği yerler

	Uçucu Kül	GYFC	Doğal Puzolan
Temin Edildiği Yer	Kütahya	Bolu	Konya (Sille)
Variş Noktası	Konya	Konya	Konya
Mesafe (km)	350	285	15

Ortalama bir tır/kamyon 0.3 L/km yakıt harcamakta, her 1 L dizel tüketiminde doğaya 2,77 kg CO₂ salınımı yapmakta ve 21-24 ton arası yük alabilmektedir (Haksevenler, 2020). Çalışmada kullanılan kamyonun 24 ton yük alabildiği kabulü yapılmış ve bu bilgiler ışığında nakliyeden kaynaklı salınan CO₂ miktarı denklem (3.1)'den hesaplanmıştır;

$$CS = 2,77 \times YT \times M \quad (3.1)$$

CS: Kamyon/Tır kaynaklı CO₂ salınımı (kgCO₂e)

YT: Bir kamyonun/tırın yakıt tüketimi (L/km)

M: Alınan mesafe (km)

Uçucu kül için;

$$CS = 2,77 \times 0,3 \times 350 = 290,85 \text{ kgCO}_2\text{e} \text{ (1 kamyonun malzeme taşıması sonucu salınan CO}_2 \text{ miktarı)}$$

GYFC için;

$$CS = 2,77 \times 0,3 \times 285 = 236,835 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Doğal Puzolan için;

$$CS = 2,77 \times 0,3 \times 15 = 12,465 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

3.2.5. Yaşam Döngüsü Maliyeti

Farklı orandaki numunelerin içerdiği malzemelerin birim fiyatları ile kullanılan miktar çarpılmış, testlerde kullanılan numunelerin maliyetleri hesaplanmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Mekanik Analiz Sonuçları

Mekanik analiz sonucu basınç ve eğilme dayanımı testi sonuçları Tablo 4.1.'de verilmiştir. Tabloda eğilme ve basınç dayanımı sonuçları kuvvet ve dayanım şeklinde verilmiştir.

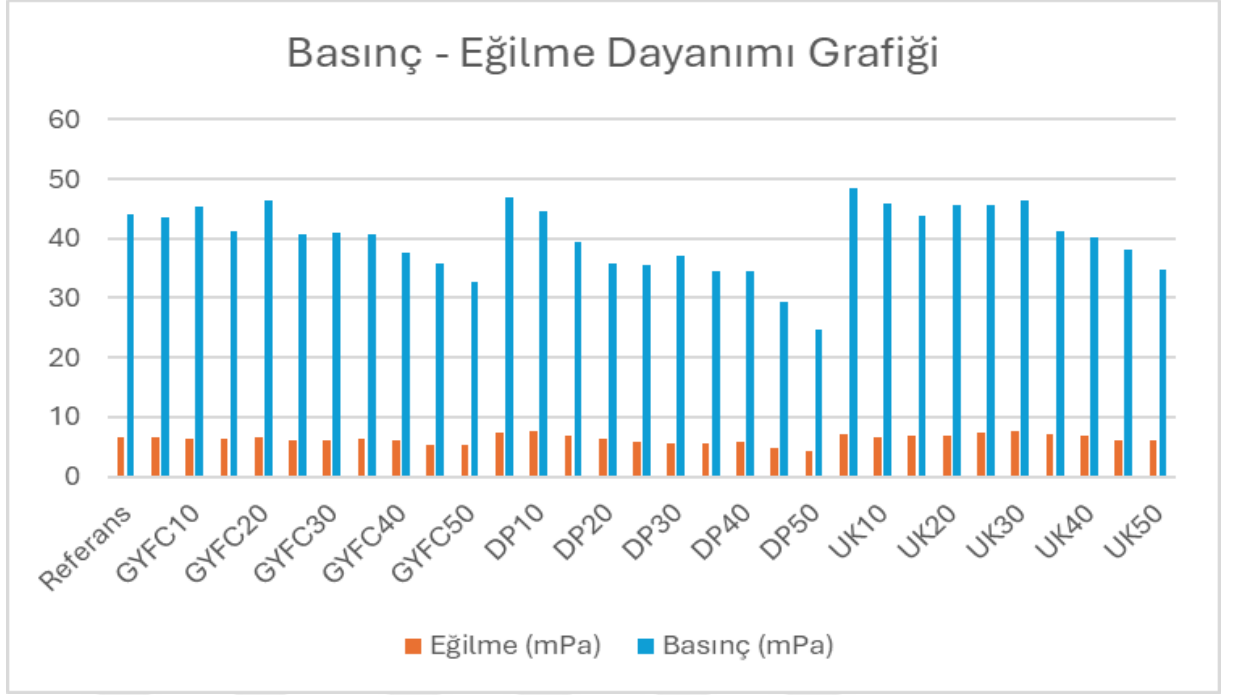
Tablo 4.1. Numunelerin basınç ve eğilme testi sonuçları

	Eğilme (kN)	Eğilme (MPa)	Basınç (kN)	Basınç (MPa)
Referans	4,2	6,5625	70,58	44,067
GYFC5	4,3	6,71875	70,48	43,58
GYFC10	4,13	6,453125	72,4	45,25
GYFC15	4,07	6,359375	66,147	41,315
GYFC20	4,2	6,5625	74,12	46,4
GYFC25	3,97	6,203125	65,24	40,74
GYFC30	3,93	6,140625	65,7	41,04
GYFC35	4	6,25	65,26	40,775
GYFC40	3,87	6,046875	60,27	37,65
GYFC45	3,36	5,25	55,86	35,75
GYFC50	3,47	5,421875	52,47	32,78
DP5	4,77	7,453125	74,943	46,827
DP10	4,83	7,546875	71,187	44,679
DP15	4,33	6,765625	63,13	39,454
DP20	4,03	6,296875	57,363	35,833
DP25	3,76	5,875	56,45	35,44
DP30	3,57	5,578125	59,53	37,18
DP35	3,57	5,578125	55,25	34,525
DP40	3,7	5,78125	55,3	34,547
DP45	3,03	4,734375	47,013	29,37
DP50	2,73	4,265625	39,48	24,659
UK5	4,5	7,03125	47,85	48,56
UK10	4,27	6,671875	73,41	45,87
UK15	4,37	6,828125	70,3	43,93
UK20	4,4	6,875	73,01	45,631
UK25	4,67	7,296875	78,14	45,52
UK30	4,97	7,765625	88,96	46,27
UK35	4,6	7,1875	66,07	41,29
UK40	4,43	6,921875	64,38	40,23
UK45	3,97	6,203125	61,14	38,2
UK50	3,87	6,046875	55,76	34,84

Şekil 4.1.'de elde edilen sonuçların ayrı ayrı sütun grafiği, Şekil 4.2.'de karşılaştırmalı sütun grafiği verilmiştir.



Şekil 4.1. Numunelerin basınç ve eğilme dayanımı sonuçları ((a) Uçucu kül, (b) Doğal puzolan, (c) Granüle yüksek fırın cürufu)



Şekil 4.2. Numunelerin basınç ve eğilme dayanım sonuçları

4.2. Yaşam Döngüsü Analizi Sonuçları

Tablo 4.2.'de numunelerin nakliyeden kaynaklı salınımlar da dahil her bir numunenin gömülü karbon ve gömülü enerji değerleri verilmiştir.

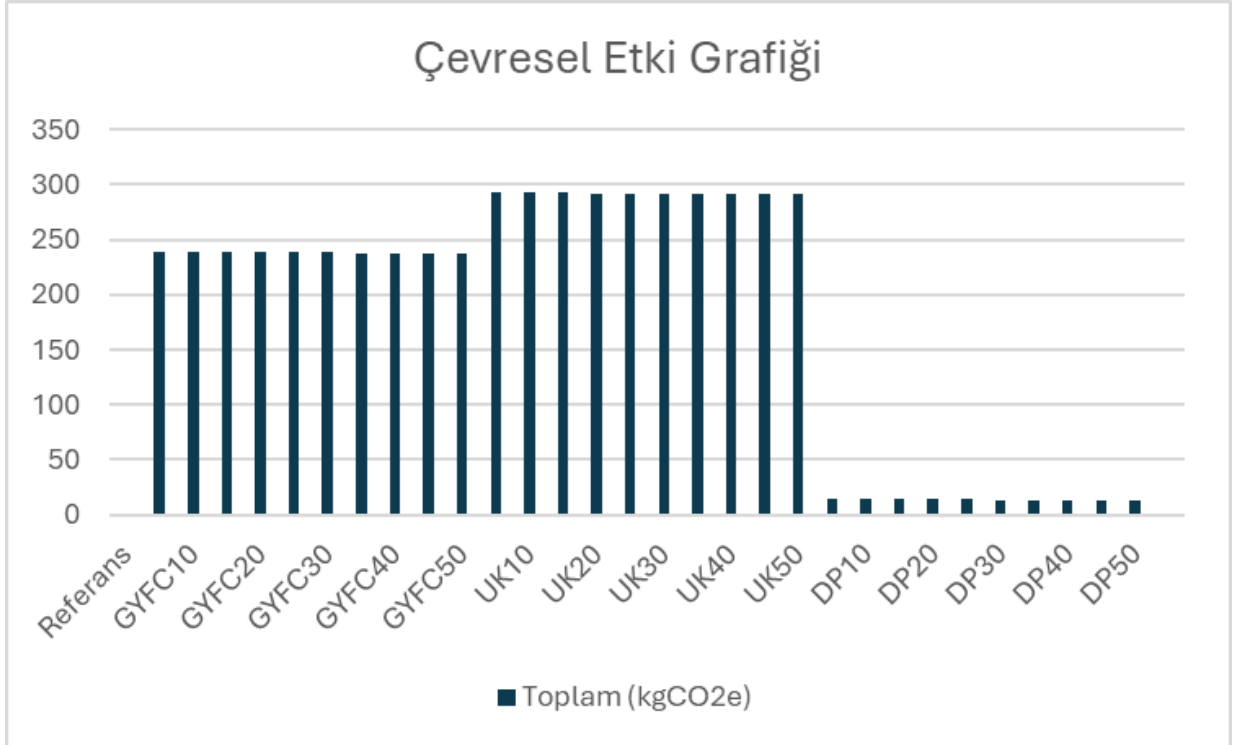
Tablo 4.2. Numunelerin toplam gömülü karbon ve gömülü enerji değerleri

	G.E. (Mj/kg)	G.K. (kgCO ₂ e/kg)	Numune Miktarı (kg)	G.E. (Mj)	G.K.(kgCO ₂ e)	Nakliyeden Kaynaklı Salınım (kgCO ₂ e)	Toplam (kgCO ₂ e)
Referans	5,5	0,95	2,025	11,1375	1,92375		
GYFC5	5,32	0,91	2,025	10,773	1,832625	236,835	238,667625
GYFC10	5,14	0,86	2,025	10,4085	1,7415	236,835	238,5765
GYFC15	4,96	0,82	2,025	10,044	1,650375	236,835	238,485375
GYFC20	4,78	0,77	2,025	9,6795	1,55925	236,835	238,39425
GYFC25	4,58	0,73	2,025	9,2745	1,47825	236,835	238,31325
GYFC30	4,39	0,69	2,025	8,88975	1,39725	236,835	238,23225
GYFC35	4,2	0,65	2,025	8,505	1,31625	236,835	238,15125
GYFC40	4	0,61	2,025	8,1	1,23525	236,835	238,07025
GYFC45	3,8	0,57	2,025	7,695	1,15425	236,835	237,98925
GYFC50	3,61	0,53	2,025	7,300125	1,07325	236,835	237,90825
UK5	5,28	0,89	2,025	10,692	1,80225	290,85	292,65225
UK10	5,02	0,85	2,025	10,1655	1,72125	290,85	292,57125
UK15	4,76	0,8	2,025	9,639	1,62	290,85	292,47
UK20	4,51	0,76	2,025	9,13275	1,539	290,85	292,389
UK25	4,25	0,72	2,025	8,60625	1,458	290,85	292,308
UK30	3,99	0,67	2,025	8,07975	1,35675	290,85	292,20675
UK35	3,73	0,63	2,025	7,55325	1,27575	290,85	292,12575
UK40	3,47	0,59	2,025	7,02675	1,19475	290,85	292,04475

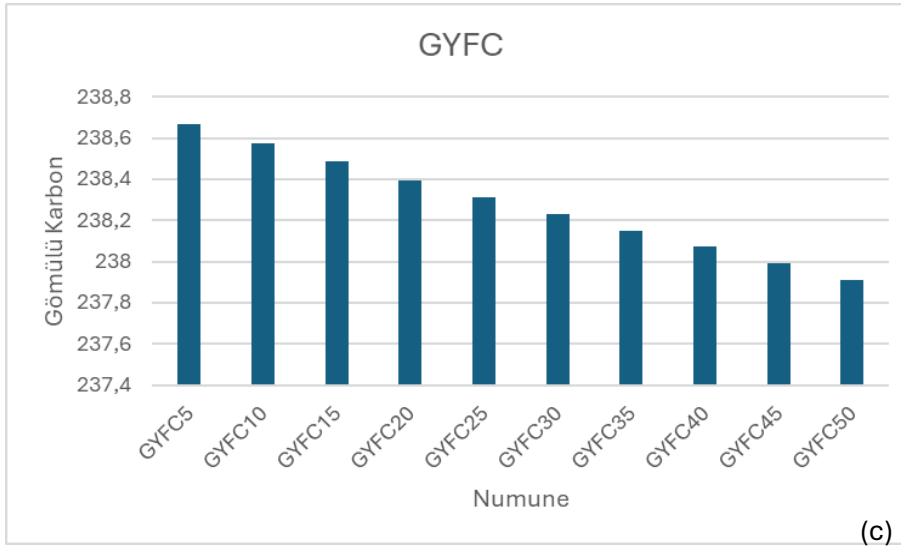
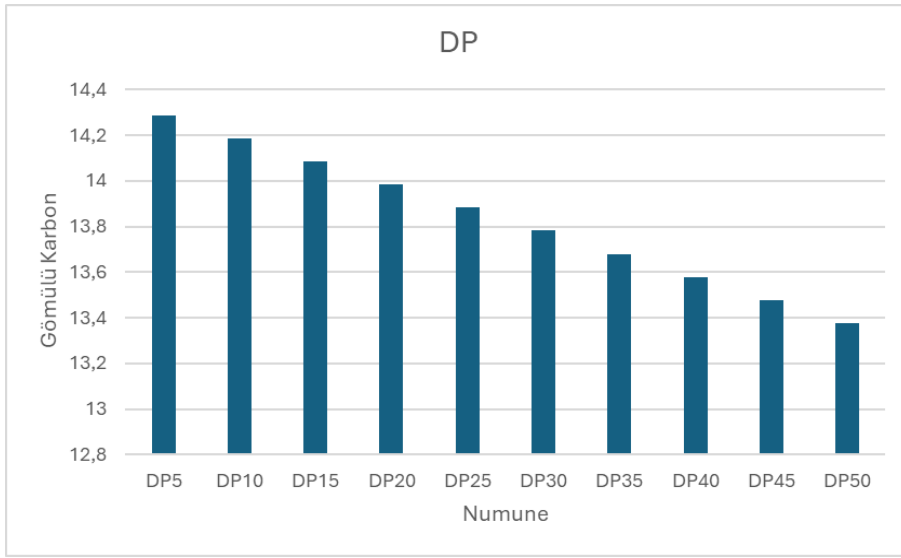
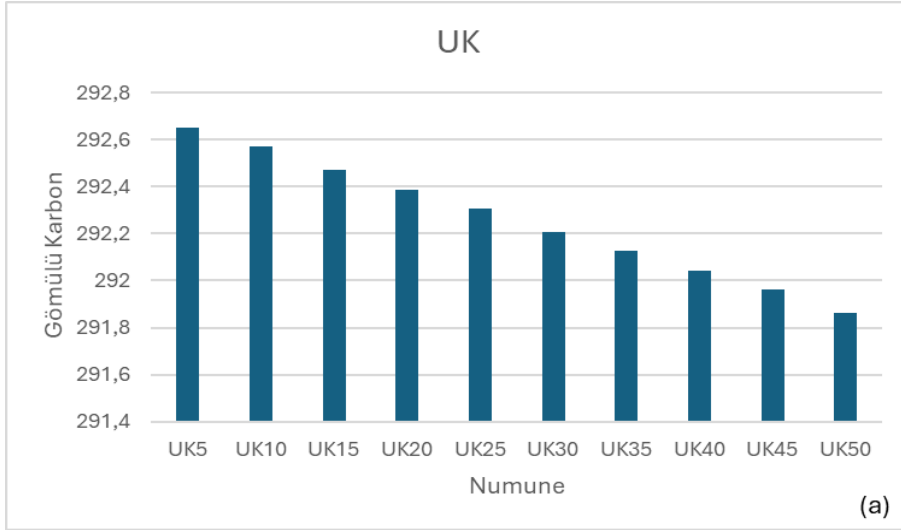
UK45	3,21	0,55	2,025	6,50025	1,11375	290,85	291,96375
UK50	2,95	0,5	2,025	5,97375	1,0125	290,85	291,8625
DP5	5,225	0,9	2,025	10,58063	1,8225	12,465	14,2875
DP10	4,95	0,85	2,025	10,02375	1,72125	12,465	14,18625
DP15	4,68	0,8	2,025	9,466875	1,62	12,465	14,085
DP20	4,4	0,75	2,025	8,91	1,51875	12,465	13,98375
DP25	4,13	0,7	2,025	8,353125	1,4175	12,465	13,8825
DP30	3,85	0,65	2,025	7,79625	1,31625	12,465	13,78125
DP35	3,58	0,6	2,025	7,239375	1,215	12,465	13,68
DP40	3,3	0,55	2,025	6,6825	1,11375	12,465	13,57875
DP45	3,03	0,5	2,025	6,125625	1,0125	12,465	13,4775
DP50	2,75	0,45	2,025	5,56875	0,91125	12,465	13,37625

G.K.=Gömülü Karbon G.E.= Gömülü Enerji

Yukarıdaki tabloda ilk sütun numunelerin isimlerini, ikinci ve üçüncü sütunlar birim gömülü enerji ve gömülü karbon değerlerinin ICE veri tabanından alınan değerleridir. Dördüncü ve beşinci sütunlarda ise numune ağırlıklarının, bu birim değerler ile çarpılarak elde edilmiş değerleri megajul ve kilo karbondioksit eşdeğeri cinsinden belirtilmiştir. Şekil 4.3.'te elde edilen sonuçların karşılaştırmalı sütun grafiği, Şekil 4.4.'te ayrı ayrı sütun grafiği verilmiştir.



Şekil 4.3. Karşılaştırmalı çevresel etki grafiği



Şekil 4.4. Numunelerin çevresel etki grafiği ((a) Uçucu kül (b) Doğal puzolan (c) Granüle yüksek fırın cürufu)

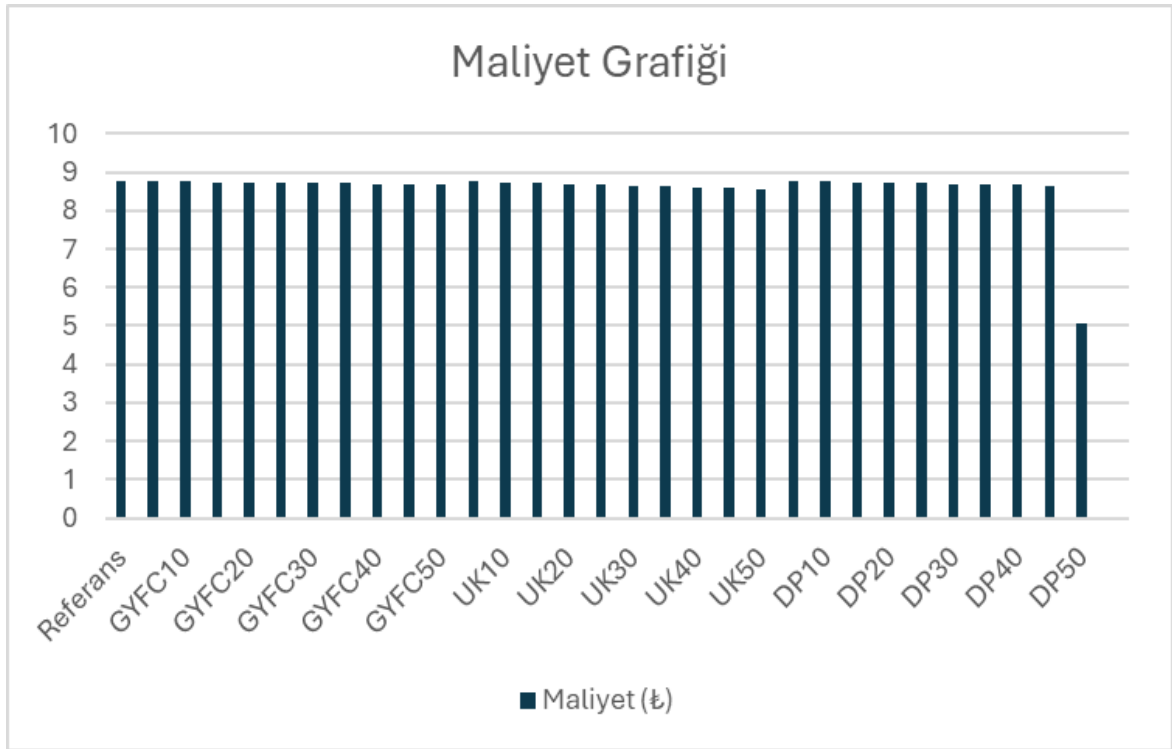
4.3. Yaşam Döngüsü Maliyeti Sonuçları

Her bir orandaki numunenin maliyeti hesaplanmış, Tablo 4.3.'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Numunelerin toplam maliyeti

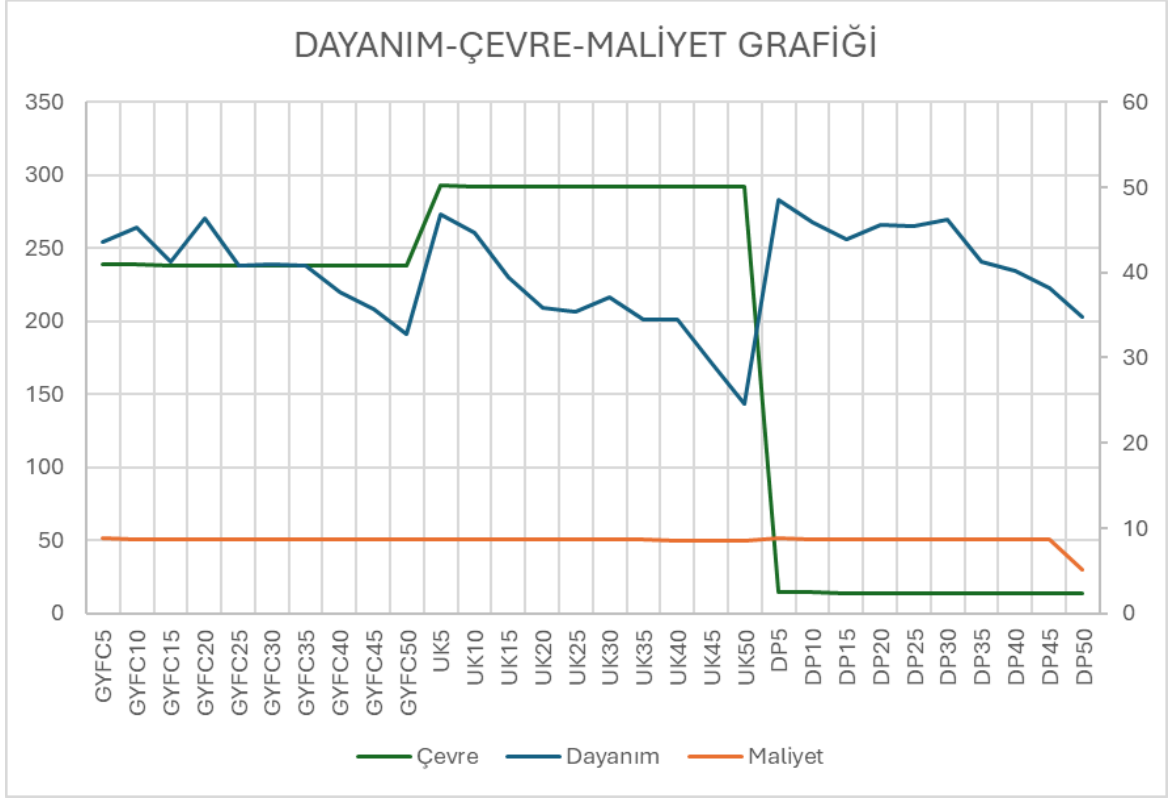
	Klinker (gr)	GYFC (gr)	DP (gr)	UK (gr)	Agrega (Mermer Kırığı)	Su	Maliyet (₺)
Referans	450				1350	225	8,7768
GYFC5	427,5	22,5			1350	225	8,77
GYFC10	405	45			1350	225	8,76
GYFC15	382,5	67,5			1350	225	8,74
GYFC20	360	90			1350	225	8,73
GYFC25	337,5	112,5			1350	225	8,72
GYFC30	315	135			1350	225	8,71
GYFC35	292,5	157,5			1350	225	8,7
GYFC40	270	180			1350	225	8,69
GYFC45	247,5	202,5			1350	225	8,68
GYFC50	225	225			1350	225	8,67
UK5	427,5		22,5		1350	225	8,75466
UK10	405		45		1350	225	8,73252
UK15	382,5		67,5		1350	225	8,71038
UK20	360		90		1350	225	8,68824
UK25	337,5		112,5		1350	225	8,6661
UK30	315		135		1350	225	8,64396
UK35	292,5		157,5		1350	225	8,62182
UK40	270		180		1350	225	8,59968
UK45	247,5		202,5		1350	225	8,57754
UK50	225		225		1350	225	8,5554
DP5	427,5			22,5	1350	225	8,762175
DP10	405			45	1350	225	8,74755
DP15	382,5			67,5	1350	225	8,732925
DP20	360			90	1350	225	8,7183
DP25	337,5			112,5	1350	225	8,703675
DP30	315			135	1350	225	8,68905
DP35	292,5			157,5	1350	225	8,674425
DP40	270			180	1350	225	8,6598
DP45	247,5			202,5	1350	225	8,645175
DP50	225			225	1350	225	5,071300272
Birim Fiyat (₺/gr)	0,001334	0,000855	0,00035	0,000684	0,00342	0,01582	

Şekil 4.5.'te elde edilen sonuçların sütun grafiği verilmiştir.



Şekil 4.5. Numunelerin maliyet grafiği

Elde edilen veriler ışığında bir dayanım-çevre-maliyet grafiği çizildiğinde (Şekil 4.6.) optimum değerde olan numunenin DP10 (%10 doğal puzolanlı çimento) olduğu görülmektedir. Doğal puzolanın doğada hammadde olarak bulunması, öğütme kaynağına diğer mineral malzemelerden daha yakın olması, maliyetinin düşük olması ve referans numunesine göre dayanımı düşürmemesi DP10 numunesinin eko-yeşil çimento olarak seçilmesine sebep olmuştur.



Şekil 4.6. Dayanım-çevre-maliyet grafiği

Elde edilen eko-yeşil çimento; doğada bulunan bir mineral katkıyı geri dönüştürme, çimento üretiminden kaynaklı karbon salınımını azaltma gibi sebeplerden daha çevreci bir malzeme olarak nitelendirilebilir.

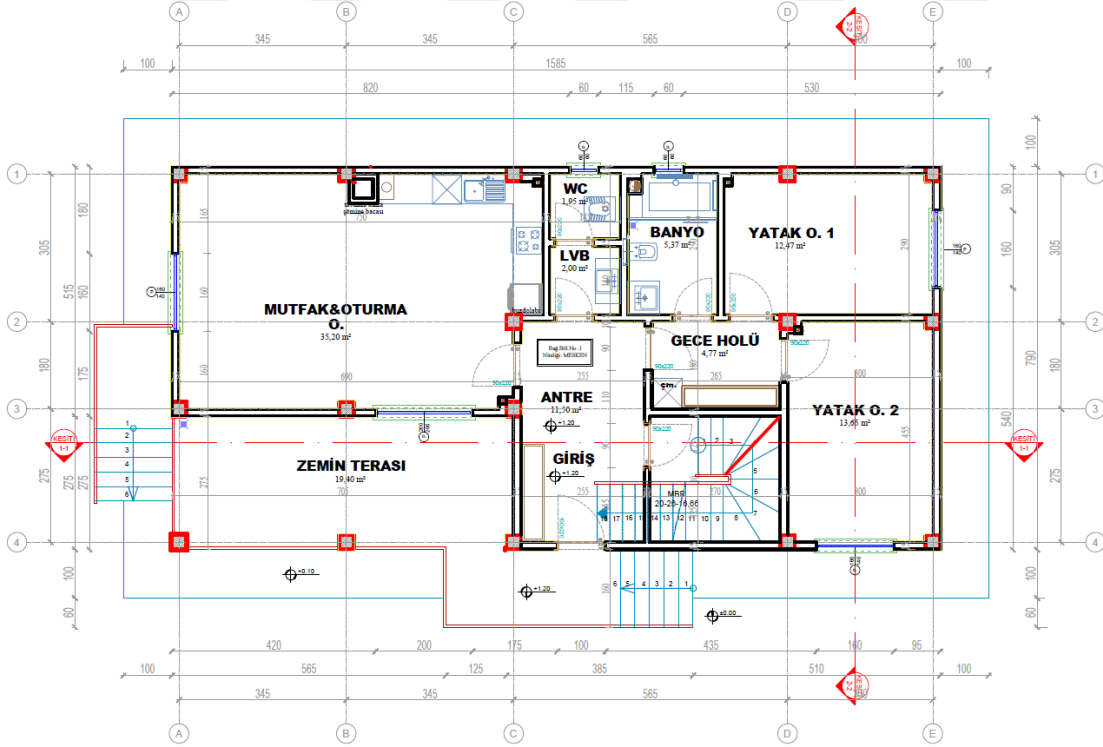
Uçucu kül ve granüle yüksek fırın curüflu numunelerde de dayanım açısından farklılık yoktur fakat çevresel anlamda doğal puzolana göre daha olumsuz sonuçlar vermişlerdir. Nakliye ve maliyet parametreleri doğal puzolanın öne geçmesini sağlamıştır.

DP10'un eko-yeşil çimento olması diğer katkılı malzemelerin çevresel etkilerinin olduğu anlamına gelmemekte mineral katkı kullanımının referans numunesine kıyasla daha çevresel olduğu görülmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Sonuç olarak; seçilen eko-yeşil çimentonun bina inşasında kullanımı ile iki farklı senaryo kurulmuş eko-yeşil çimentonun, Portland çimentosuna göre karbon salınımını ne kadar azalttığı sayısal verilerle verilmiştir. Senaryolar için Şekil 5.1.'de verilen bina kesiti kullanılarak ortalama 5 katlı olduğu kabul edilmiş ve hesaplamalar bu doğrultuda yapılmıştır. Konutlar; bodrum, zemin ve 5 kattan oluşmakta bina oturma alanı 125 m²'dir. Yapıların kat yükseklikleri 3 metredir. Kullanıma açık çatı katlarında ise %70'lik eğim sebebiyle iç yükseklikler değişkenlik göstermektedir. Isı yalıtımları için taş yünü, çatı kaplaması için kiremit tercih edilmiştir. Grobeton üzerine sırasıyla su yalıtımı ve ısı yalıtımından sonra betonarme radye temel uygulanmıştır. Temel üzerine sırasıyla düzeltme şapı, polietilen şilte, laminant parke ya da seramik yapılmıştır. Betonarme radye temel üzerine inşa edilen yapılarda kolon boyutları 30x30, kiriş boyutları 25x40 ve normal döşeme seçilerek statik çözüm gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.1. Senaryolar için kullanılan binanın kesiti

Seçilen Eko-Yeşil imento ile inşa edilen ve Portland imentosu ile inşa edilen bir yapı ile iki farklı senaryo kurulduğunda;

Senaryo 1;

Seçilen binanın inşasında eko-yeşil imento kullanılması

Senaryo 2;

Seçilen binanın inşasında Portland imentosu kullanılması

Tablo 5.1.'de imento metrajı hesaplanan binanın iki farklı senaryoda malzeme kaynaklı karbon salınımları verilmiştir.

Tablo 5.1. Senaryoların malzeme kaynaklı karbon salınımları

Senaryo	Metraj (kg)	G.K. (kgCO ₂ e/kg)	G.K. (kgCO ₂ e)
Senaryo 1	401187,5	0,85	341009,375
Senaryo 2	401187,5	0,95	381128,125

Sonuçlara göre eko-yeşil çimentonun 5 katlı bir bina için kullanıldığı durumda gömülü karbon değerini 40118,75 kgCO₂e azaltmıştır.

5.2 Öneriler

YDA yöntemi inşaat alanında yapılan çalışmaların çevresel etkisinin bilinmesi hususunda büyük önem taşımaktadır. Sayısal veriler ve etki analizleri ile hangi aşamada neler yapılabileceği konusunda detaylı bilgiler veren YDA, çevreci bir gelecek için yapmamız ya da değiştirmemiz gereken uygulamalar için de yön göstermektedir. Bunun bir örneği çalışmada yer verilmiş üretim aşaması sırasında dikkatli olunması gereken bir diğer hususun çevre olması gerektiği belirlenmiştir.

YDA yöntemi birçok programla ve veri tabanlarıyla yapılabilmekte ve kapsamlı sonuçlar verebilmektedir. Bu çalışmada sadece karbondioksit salınımı ve enerji kullanımı göz önüne alınmış olup yapılacak diğer çalışmalarda farklı etki analizleri göz önüne alınabilir.

Tez alışması kapsamında mineral katkı kullanım yüzdeleri beşer beşer arttırılmış ve %50'de bitirilmiştir. Yapılacak diğer çalışmalarda bu oran yükseltilebilir numuneler arası fark yüzdeleri düşürölerek daha detaylı sonuçlar alınabilir.

KAYNAKLAR

Ahmad W., Ahmad A., Ostrowski KA., Aslam F., Joyklad P., 2021, A scientometric review of waste material utilization in concrete for sustainable construction. Case Studies in Construction Materials.

Alsubari, B., Shafigh, P., Jumaat, M.Z., 2016, Utilization of High-Volume Treated Palm Oil Fuel Ash to Produce Sustainable Self-Compacting Concrete, Journal of Cleaner Production, 137, 982-996.

Aydın M., 2019, Kalsiyum Alüminat Çimentosu ile Portland Çimentosunun Karşılaştırılması, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye.

Azkur, H. S., 2019, Konut Mimarisinde Farklı Taşıyıcı Sistemlerin Çevresel Etkilerinin Yaşam Döngüsü Analizi İle Değerlendirilmesi, Konya.

Canan, F., 2008, Enerji ve Çevre Etkin Bina Tasarımında Ömür Süreci Analizi Yönteminin Değerlendirilmesi, Konya.

Benli Yıldız, N., 2017, Cam Elyaf Takviyeli Beton (GFRC) Cephe Panelleri İçin Yaşam Döngü Değerlendirmesi (YDD) Yöntemiyle Bir Sürdürülebilirlik Çerçevesi Geliştirilmesi.

Canan, F., & Bakır, İ., 2008, Enerji ve Çevre Etkin Bina Tasarımında Ömür Süreci Analizi Yönteminin Değerlendirilmesi, *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 7(2), 153-174.

Chen JJ., Ng PL., Chu SH., Guan GX., Kwan AKH., 2020, Ternary blending with metakaolin and silica fume to improve packing density and performance of binder paste. Construction and Building Materials, 252: 119031.

Crc Rota, Çimento Nasıl Üretilir? [Çevrimiçi]. Erişim: <http://www.crcrota.com/tr/cimento/>

Çağatay, B., 2020, Türkiye’de Çimento Sektörüne İlişkin Gelecek Tahminleri; Küresel Ticaret Ve Makroekonomik Değişkenler Işığında Yeni Politikalar, Dumlupınar Üniversitesi İibf Dergisi, 4(8): 95 - 115 .

Çankaya, S., Pekey, B., 2018, Comparative Life Cycle Assessment of Clinker Production with Conventional and Alternative Fuels Usage in Turkey, International Journal of Environmental Science and Development.

Çankaya, S., Pekey, B., 2019, A Comparative Life Cycle Assessment For Sustainable Cement Production in Turkey, Journal of Environmental Management 249.

Demirel, S., Öz, H., Ö., Güneş, M., Çiner, F., 2019, Türkiye’de Atık Malzemeden Yapılmış Kendiliğinden Yerleşen Harç Üretiminin Yaşam Döngüsü Analizi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 8, Sayı 1, 1-8.

Demirel, S., Öz, H., Ö., Güneş, M., Çiner, F., Adın, S., 2019, Life-Cycle Assessment (LCA) Aspects and Strength Characteristics of Self-compacting Mortars (SCMs) Incorporating Fly Ash and Waste Glass PET, The International Journal of Life Cycle Assessment 24:1139–1153.

Diş, M., Ö., Canbaz, M., ,2015, Yaşam Döngüsü Analizi Uygulaması: Breeam Modeli, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 11, No: 2, 1-9.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Bütünleşik Bina Tasarımı Yaklaşımı -Türkiye Ortamı ve Koşullarına Uyarlama Raporu, 2016, ETKB, Ankara.

Gervasio, H., Dimova, S., & Pinto, A., 2018, Benchmarking the life-cycle environmental performance of buildings. *Sustainability*, 10(5), 1454.

Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., ... & Rydberg, T. ,2011, Life cycle assessment: past, present, and future.

Gürsel, A., P., Meral, Ç., 2012, Türkiye’de Çimento Üretiminin Karşılaştırmalı Yaşam Döngüsü Analizi, 2. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi.

Haksevenler, B. H., 2020, G. N. Yerel Yönetimler İçin Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi: Ümraniye Örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 323-325.

Hammond, G., P., Jones, C., I., 2008, Embodied Energy And Carbon İn Construction Materials, *Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers – Energy*, 161(2), 87-98.

Hossain MU., Dong Y., Ng ST., 2021, Influence of supplementary cementitious materials in sustainability performance of concrete industry: A case study in Hong Kong. *Case Studies in Construction Materials*.

Hozatlı, B., Günerhan, H. 2015, Muğla İli Koşullarında Betonarme ve Ahşap İskeletli Binalara Ait Yaşam Döngüsü Analizi, *Mühendis ve Makina*, cilt 56, sayı 660, s. 52-60.

Huntzinger, D., N., Eatmon, T., D., 2009, A Life-Cycle Assessment Of Portland Cement Manufacturing: Comparing The Traditional Process With Alternative Technologies, *Journal of Cleaner Production* 17, 668–675.

Jiménez-González, C., Kim, S., & Overcash, M. R., 2000, Methodology for developing gate-to-gate life cycle inventory information. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5, 153-159.

Karimpour, M., Belusko, M., Xing, K. and Bruno, F., 2014, Minimising the Life Cycle Energy of Buildings: Review and Analysis, *Building and Environment*, 73, 106-114.

Kartal, M., 2018, Yapıda Sık Kullanılan Malzemelerin Ekolojik Olarak Değerlendirilmesi, İstanbul.

Kayılı, M., 2020, Hafif Çelik ve Ahşap Duvar Konstrüksiyonlarının Gömülü Karbon Değerinin Belirlenmesi, Karabük.

Khasreen, M., Banfill, P., F., G., Menzies, G., F., 2009, Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review, *Sustainability* 1, 674-701.

Koç, İ., Duru, M., O., Dinçer, S., G., 2022, Yapılarda Gömülü ve Kullanım Enerjisi Kavramlarının Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) Metodolojisiyle İrdelenmesi, *bāb Journal of Architecture and Design I*, 55-70.

Kurda, R., Brito J., Silvestre, J., 2020, A Comparative Study of the Mechanical and Life Cycle Assessment of High-Content Fly Ash and Recycled Aggregates Concrete, *Journal of Building Engineering*.

Kurda, R., Brito, J., Silvestre, J., 2018, Life Cycle Assessment of Concrete Made With High Volume Of Recycled Concrete Aggregates and Fly Ash, *Resources, Conservation & Recycling* 139: 407-417.

Maraghechi, H., Salwockı, S., Rajabipour, F., 2017, Utilisation of Alkali Activated Glass Powder in Binary Mixtures with Portland Cement, Slag, Fly Ash and Hydrated Lime, *Materials and Structures*, 50(1), 1-14.

Naqi, A., Jeong G., J., 2019, “Recent Progress in Green Cement Technology Utilizing Low-Carbon Emission Fuels and Raw Materials: A Review.” *Sustainability* 2019, Vol. 11, Syf. 537 11 (2).

Orhon, A., V., Altın, M., Beton Yapıların Karbon Ayak İzi, 2012.

Önal, H., 2022, Prefabrike ve Geleneksel Ahşap Esaslı Yapım Sistemlerinin Karşılaştırmalı Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, Konya.

Özdenkoş O., 2010, Çimento Fabrikalarında Kalite ve Çevre Yönetimi Sistemleri: Sektörde Bir Uygulama, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, Türkiye.

Rashid, A., F., A., Yusoff, S., 2015, A Review Of Life Cycle Assessment Method For Building Industry, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 244-248.

Ruan, S., Unluer, C., Comparative life cycle assessment of reactive MgO and Portland cement production, 2016, *Journal and Cleaner Production*, 258-273.

Seto, K., E., Churchill, C., J., Panesar D., K., 2017, Influence of Fly Ash Allocation Approaches On The Life Cycle Assessment of Cement- Based Materials, *Journal of Cleaner Production*, 65-75.

Sjunnesson, J., 2005, *Life Cycle Assessment of Concrete*.

Stafford, F., N., Dias, A. C., Arroja ,L., Labrincha, J., A., Hotza, D., 2016, Life Cycle Assessment of The Production Of Portland Cement: a Southern Europe Case Study, *Journal of Cleaner Production*, 159-165.

Şahin G., Önder HG., 2021, Atık yönetimi, sera gazı emisyonları ve Türkiye: Avrupa yeşil mutabakatı çerçevesinde bir değerlendirme., *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 9(112): 194-216.

Tait, M., W., Cheung, W. M., 2016, A Comparative Cradle-To-Gate Life Cycle Assessment Of Three Concrete Mix Designs, *Life Cycle Assess* 21:847–860.

Tam, V. W., & Tam, C. M., 2006, Evaluations of existing waste recycling methods: a Hong Kong study. *Building and Environment*, 41(12), 1649-1660.

Türk Standartları Enstitüsü (TSE), 2012, Yapı İşlerinin Sürdürülebilirliği Binaların Çevresel Performansının Tetkiki-Hesaplama Yöntemi, TS EN 15978, Ankara, Türkiye, 19-29.

Tangüler, M., Meral, Ç., Gursel, A., P., 2014, Merging Mechanical and Environmental Performance of Turkish Fly Ash-Portland Cement Mortars, *İstanbul*.

Tangüler, M., Meral, Ç., Gursel, A., P., 2015, Türkiye’de Uçucu Küllü Betonlar İçin Yaşam Döngüsü Analizi.

Taygun, T., 2005, Yapı Ürünlerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesine Yönelik Bir Model Önerisi, *İstanbul*.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çimento Üretimi, Sektörel Uygulama Kılavuzu, 2020, <https://webdosya.csb.gov.tr/db/sanayihavarehberi/icerikler/c-mento-uret-m--20200110113349.pdf>

Tucker, E., L., Ferraro, C., C., Laux, S., J., Townsend, T., G., 2018, Economic and Life Cycle Assessment of Recycling Municipal Glass As A Pozzolan in Portland Cement Concrete Production, *Resources, Conservation & Recycling* 129: 240-247.

Tun, T., Z., Bonnet S., Gheewala, S., H., 2020, Life cycle assessment of Portland cement production in Myanmar, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25:2106–2121.

Tükenmez, E., 2019, Life Cycle Assessment (LCA) Of Different Concrete Mixtures And An Application In A Green Building, Ankara.

Ulutas, F., Alkaya, E., Bogurcu, M., & Demirer, G. N., 2012, Determination of the framework conditions and research–development needs for the dissemination of cleaner (sustainable) production applications in Turkey. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 19(3), 203-209.

United Nations Environmental Programme, Towards A Zero-Emission, Efficient, And Resilient Buildings And Construction Sector Global Status Report, 2017, UNEP.

United States Geological Survey, “Mineral Commodity Summaries”. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-cement.pdf> (20.01.2022).

United State Environmental Protection Agency (USEPA), Life Cycle Assessment: Principles and Practice, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, 2006, Ohio.

WGSC, Working Group For Sustainable Construction, Working Group Sustainable Construction Methods And Techniques Final Report, 2004.