

T.C.
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SÜRDÜRÜLEBİLİR HAVALİMANI YAPILARINDA MALZEME SEÇİMİ TABANLI
YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRME ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve Rüya ÖZYILMAZ

210007317

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Program: Proje Yönetimi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet Nurettin UĞURAL

HAZİRAN 2024

T.C.
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SÜRDÜRÜLEBİLİR HAVALİMANI YAPILARINDA MALZEME SEÇİMİ TABANLI
YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRME ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Merve Rüya ÖZYILMAZ
2100007317

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Program: Proje Yönetimi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet Nurettin UĞURAL
Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Fatma Heyecan GİRİTLİ
Dr. Öğretim Üyesi Ahmet TUZ

HAZİRAN 2024

ÖNSÖZ

Bu tez, yolculuğumun her adımında beni destekleyenler olmadan mümkün olamazdı. En başta, bilgeliği, sabrı ve ilhamsal rehberliği ile her zaman yanımda olan danışman hocam Doç.Dr. Mehmet Nurettin Uğural’a en derin teşekkürlerimi sunarım. Bilimsel mükemmelliğe olan tutkunuz, bu çalışmanın her satırına işlenmiştir.

Sevgili eşim; sevgin, zor zamanlarda bana güç verdi. Varlığın, her zorluğu aşmamdaki en büyük motivasyon kaynağımdır.

Anneme; koşulsuz sevgisi ve sarsılmaz inancı için minnettarım. Bana hayatın her anında yanımda olmanın ne demek olduğunu öğretti. Senin güçlü ve sevgi dolu varlığın, her zaman ilerlememi sağlayan bir ışık oldu.

Profesyonel gelişimimde bana yol gösterdiği için koçluk vizyonu ile hayatıma ışık olan kardeşim Öykü’ye teşekkür ederim. Bana inandığın ve potansiyelimi en üst seviyeye çıkarmam için bana destek olduğun için minnettarım.

Hayatımın her döneminde benim mutluluk ve ilham kaynağı olduğun için kardeşim Ayşegül’e teşekkür ederim. Bana olan desteğin, bu tezin sayfalarında saklı olan motivasyonun ve sevincin kaynağıdır.

Son olarak, hayatıma ışık olan bebeğime çalışmalarım boyunca bana destek olduğun için teşekkür ederim.

Her birinizin benim hayatımdaki yeriniz ve bu tezin oluşumundaki katkılarınız paha biçilemezdir. En içten teşekkürlerimle.

Haziran 2024

Merve Rüya Özyılmaz



Babam'a.

Görse, eminim çok mutlu olurdu.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	III
KISALTMALAR.....	IV
TABLO LİSTESİ.....	VI
ŞEKİL LİSTESİ.....	VII
SİMGE LİSTESİ.....	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Taraması.....	3
1.2. Sürdürülebilirlik Kavramı.....	8
1.3. Sürdürülebilir Yapılar ve Sertifikalar.....	10
1.3.1. LEED Sertifikası.....	12
1.3.2. BREEAM Sertifikası.....	13
1.4. Sürdürülebilir Malzeme Seçimi ve Standartlar.....	14
1.5. Yaşam Döngüsü Analizi Yaklaşımları ve Araçları.....	15
2. AMAÇ.....	22
2.1. Sürdürülebilir Havalimanı Yapılarının İncelenmesi.....	23
2.2. Havalimanı Yapılarında Kullanılan İnşai Malzemelerin Tespiti.....	29
3. YÖNTEM	30
3.1. Beton Malzemesinin Yaşam Döngüsü Analizi.....	33
3.2. Çelik Malzemenin Yaşam Döngüsü Analizi.....	37
3.3. Ahşap Malzemenin Yaşam Döngüsü Analizi	41
4. BULGULAR.....	47
4.1. Çevresel Etki Kıyaslamaları Bulgularının Değerlendirilmesi.....	47
5. SONUÇ.....	49
6. KAYNAKLAR.....	52

KISALTMALAR

YDA	: Yaşam Döngüsü Analizi
LCA	: Life Cycle Assessment
EPD	: Çevresel Ürün Beyanı (Environmental Product Declaration)
BIM	: Bina Bilgi Modellemesi
LEED	: Sürdürülebilirlik Sertifikası (Leadership in Energy and Environmental Design)
USGBC	: ABD’de Yeşil Bina Konseyi (U.S. Green Building Council)
BREEAM	: Sürdürülebilirlik Sertifikası (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)
BRE	: İngiltere’de Bina Araştırma Kurumu (Building Research Establishment)
GWP	: Küresel Isınma (Global Warming Potential)
ODP	: Stratosferik Ozon Tabakasının Tükenme Potansiyeli (Depletion Potential of the Stratospheric Ozone Layer)
AP	: Arazi ve Suyun Asitleşme potansiyeli (Acidification Potential of Land and Water)
EP	: Ötrofikasyon Potansiyeli (Eutrophication Potential)
POCP	: Troposferik Ozon Fotokimyasal Oksidanların Oluşum Potansiyeli (Formation Potential of Tropospheric Ozone Photochemical Oxidants)
ADPE	: Fosil Olmayan Kaynaklar için Abiyotik Tükenme Potansiyeli (Abiotic Depletion Potential for Non-fossil Resources)
ADPF	: Fosil Kaynaklar için Abiyotik Tükenme Potansiyeli (Abiotic Depletion Potential for Fossil Resources)
CEEQUAL	: İnşaat Mühendisliği Çevresel Kalite Değerlendirme ve Ödül Programı (The Civil Engineering Environmental Quality Assessment and Awards Scheme)
Greenroads International	: Sürdürülebilirlik eğitimi ve ulaşım için bir derecelendirme sistemi geliştiren, kar amacı gütmeyen bağımsız bir kuruluştur.
IESVE	: Her boyut ve karmaşıklıkta yeni ve mevcut binaları modelleyebilen hızlı, doğru, saatin altında bir termal simülasyon paketidir.
TPE	: Termoplastik Elastomer Malzeme
GHG	: Sera Gazı (Greenhouse Gas)
YSA	: Yapay Sinir Ağları
MIVES	: Sürdürülebilirliği değerlendirmek için çok kriterli karar verme yaklaşımıdır.
CASBEE	: Bina Çevresel Verimliliği için Kapsamlı Değerlendirme (Comprehensive Assessment for Building Environmental Efficiency)
SBTool	: Sürdürülebilir Yapı Aracı (Sustainable Building Tool)
ACA	: Havalimanı Karbon Akreditasyonu (Airport Carbon Accreditation)

ISO : Uluslararası Standartlar Teşkilatı (International Organization for Standardization)

EN : Avrupa Normları (European Norm)

LPG : Sıvılaştırılmış Petrol Gazı

SQL : Yapılandırılmış Sorgu Dili (Structured Query Language)



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1. Sürdürülebilirlik Ölçütleri	11
Tablo 2. YDA İçin Kullanılan Veritabanı Alternatifleri ve Açıklamalar.....	17
Tablo 3. YDA İçin Kullanılan Program Alternatifleri ve Açıklamalar.....	18
Tablo 4. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Modülleri.....	21
Tablo 5. Sürdürülebilir Havalimanı Yapıları (İstanbul, Shenzhen).....	25
Tablo 6. Sürdürülebilir Havalimanı Yapıları (Californiya, İzmir).....	26
Tablo 7. Sürdürülebilir Havalimanı Yapıları (Changi, Pekin).....	27
Tablo 8. Sürdürülebilir Havalimanı Yapıları (Londra, Vantaa).....	28
Tablo 9. Belirlenen Sekiz Farklı Sürdürülebilir Havalimanında Kullanılan Bazı Malzemeler ve Kullanım Nokta Adetleri.....	29
Tablo 10. Yöntemin Yol Haritası.....	32
Tablo 11. Beton için YDA Değerlendirme Modülleri (X: Hesaplaması Yapılacak Modüller).....	34
Tablo 12. Beton İçin Program Girdileri.....	35
Tablo 13. Beton İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Analizi Sonuçları.....	36
Tablo 14. Çelik için Değerlendirme Modülleri (X: Hesaplaması Yapılacak Modüller).....	38
Tablo 15. Çelik İçin Program Girdileri.....	39
Tablo 16. Çelik İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Analizi Sonuçları.....	40
Tablo 17. Ahşap için YDA Değerlendirme Modülleri (X: Hesaplaması Yapılacak Modüller).....	43
Tablo 18. Ahşap İçin Program Girdileri	44
Tablo 19. Ahşap İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Analizi Sonuçları.....	45
Tablo 20. Seçilen Malzemelerin YDA Sonucundaki Küresel Isınma (GWP) Değerleri.....	47

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. OpenLCA Programı ve ECOinvent Veritabanı.....	19
Şekil 2. OpenLCA ve ECOinvent Üzerinde Beton İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Analizi.....	35
Şekil 3. Beton İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Grafik Analizi.....	36
Şekil 4. OpenLCA ve ECOinvent Üzerinde Çelik İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Analizi.....	40
Şekil 5. Çelik İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Grafik Analizi.....	41
Şekil 6. OpenLCA ve ECOinvent Üzerinde Ahşap İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Analizi.....	45
Şekil 7. Ahşap İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Grafik Analizi.....	46
Şekil 8. Seçilen Malzemelerin YDA Sonucundaki Çevresel Etki Değerleri.....	48

SİMGE LİSTESİ

kg CO ₂ -Eq.	: Kilogram karbondioksit eşdeğeri
kg CFC11-Eq.	: Ozon tabakası incelme potansiyeli
kg SO ₂ -Eq.	: Asitleşme potansiyeli
kg (PO ₄) ₃ --Eq.	: Ötrofikasyon
kg ethene-Eq.	: Fotokimyasal oksidasyon potansiyeli
kg Sb-Eq.	: Abiyotik tükenme potansiyeli
MJ	: Megajul
kWh	: Kilovat enerji
L	: Litre
m ³	: Metreküp

Üniversite	: İstanbul Kültür Üniversitesi
Enstitüsü	: Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	: İnşaat Mühendisliği
Programı	: Proje Yönetimi
Tez Danışmanı	: Doç. Dr. Mehmet Nurettin UĞURAL
Tez Türü ve Tarihi	: Yüksek Lisans Tezi – Haziran 2024

ÖZET

SÜRDÜRÜLEBİLİR HAVALİMANI YAPILARINDA MALZEME SEÇİMİ TABANLI YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRME ANALİZİ

Sürdürülebilir havalimanı yapıları, enerji verimliliği, su tasarrufu ve atık yönetimi gibi çevresel etkileri minimize edecek şekilde tasarlanır ve işletilir. Bu yapıların inşaa edilme amacı; yenilenebilir enerji kaynaklarından güç alarak ve yeşil bina malzemeleri kullanarak karbon ayak izini azaltmayı hedefler.

Çalışmada sürdürülebilirlik sertifikalı sekiz farklı havalimanı terminal binasında kullanılan ana inşaat malzemelerinden üç farklı tipte olan; beton, çelik ve ahşap malzemenin yaşam döngüsü analizi yapılmış ve çevresel etkileri hesaplanmıştır. Bu araştırmanın amacı, malzemelerin çevresel etkilerini azaltma potansiyelini değerlendirmektir.

Çalışmada OpenLCA yazılımı ve ECOinvent veri tabanından istifade edilerek Çevresel Ürün Beyanı (EPD) standartlarına uygun olarak analizler yapılmıştır. Konu ile ilgili geniş çaplı literatür taramalarına yer verilmiştir. Analiz neticesinde elde edilen etki sonuçları bir kıyaslama tablosuna yerleştirilerek değerlendirmeye hazır hale getirilmiştir.

Elde edilen bulgular neticesinde; sürdürülebilir havalimanı yapılarında yoğun kullanımı tespit edilen beton, ahşap ve çelik malzemelerin çevresel etkileri incelendiğinde; ahşap malzemenin %60'tan az olan GWP(Küresel Isınma Potansiyeli) oranı ile, çelik ve beton malzemeye kıyasla küresel ısınmaya etkisinin daha az olduğu analiz edilmiştir. Beton malzemenin çelik malzemeyle kıyaslanmasında ise yaklaşık değerlere sahip olan iki malzeme arasında %90'a yakın bir oranla çelik malzemenin GWP etkisinin daha az olduğu gözlenmiştir. Bu durum, beton malzemenin, ahşap ve beton malzemeyle kıyasla global ısınmaya daha fazla etki gösterdiğini ifade eder. En az GWP etkisinde bulunan malzeme, bu karşılaştırmaya göre ahşap malzemedir. Diğer çevresel etkiler ODP(Stratosferik Ozon Tabakasının Tükenme Potansiyeli) ve AP (Arazi ve Suyun Asitleşme potansiyeli) değerleri de bu açıdan incelenmiştir.

Sonuç olarak; sürdürülebilir yapı malzemelerinden ahşap, çelik ve beton malzemelerin kullanımı, havalimanı yapılarının çevresel etkisinin önemli ölçüde azalmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, havalimanlarının karbon ayak izini azaltarak ekolojik dengeye katkıda bulunmasını sağlar ve yeşil bina sertifikasyonu gibi çevresel standartlara uyumu kolaylaştırır. Sürdürülebilir malzemelerin kullanılması, havalimanlarını daha çevre dostu yapının yanı sıra, gelecek nesillere yönelik sorumluluk bilincini de güçlendirir.

Anahtar Kelimeler; Sürdürülebilirlik, Havalimanı, Yapı Malzemeleri, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, Proje Yönetimi, İnşaat Mühendisliği

University : Istanbul Kültür University
Institute : Institute of Postgraduate Education
Department : Civil Engineering
Programme : Project Management
Thesis Supervisor : Assist. Professor Dr. Mehmet Nurettin UGURAL
Degree Awarded and Date : MA Thesis – June 2024

ABSTACT

LIFE CYCLE ASSESSMENT ANALYSIS BASED ON MATERIAL SELECTION IN SUSTAINABLE AIRPORT BUILDINGS

Sustainable airport structures are designed and operated to minimize environmental impacts such as energy efficiency, water conservation and waste management. The purpose of constructing these buildings is to reduce the carbon footprint by utilizing renewable energy sources and using green building materials.

In this study, the life cycle analysis of three different types of main construction materials; concrete, steel and wood, used in eight different sustainability certified airport terminal buildings were analyzed and their environmental impacts were calculated. The aim of this research is to evaluate the potential of materials to reduce their environmental impact.

In the study, OpenLCA software and ECOinvent database were utilized and analyzed in accordance with Environmental Product Declaration (EPD) standards. Extensive literature reviews on the subject were included. The impact results obtained as a result of the analysis were placed in a comparison table and made ready for evaluation.

As a result of the findings obtained; when the environmental effects of concrete, wood and steel materials, which are intensively used in sustainable airport structures, are examined; it was analyzed that wood material has less impact on global warming compared to steel and concrete material with a GWP (Global Warming Potential) ratio of less than 60%. In the comparison of concrete material with steel material, it was observed that the GWP effect of steel material was less with a ratio of close to 90% between the two materials with approximate values. This means that concrete material has a higher impact on global warming compared to wood and concrete materials. The material with the lowest GWP impact is wood according to this comparison. Other environmental impacts ODP ((Depletion Potential of the Stratospheric Ozone Layer) and AP (Acidification Potential of Land and Water) values were also examined in this respect.

As a result, the use of sustainable building materials such as wood, steel and concrete significantly reduces the environmental impact of airport structures. This approach enables airports to contribute to the ecological balance by reducing their carbon footprint and facilitates compliance with environmental standards such as green building certification. The use of sustainable materials not only makes airports more environmentally friendly, but also strengthens the sense of responsibility towards future generations.

Keywords; Sustainability, Airport, Building Materials, Life Cycle Assessment, Project Management, Civil Engineering

1. GİRİŞ

Sürdürülebilir havalimanı yapılarında malzeme seçimi ve bu malzemelerin yaşam döngüsü analizi, çevresel etkilerin azaltılması, operasyonel maliyetlerin düşürülmesi ve yapıların uzun vadeli dayanıklılığının sağlanması açısından büyük önem taşır. Yaşam döngüsü analizi yaklaşımı, havalimanı tasarım alternatiflerinin enerji ve çevresel etkilerini değerlendirmesinde kullanılarak, malzeme seçiminin ve bakım stratejilerinin belirlenmesinde ekonomik ve çevresel faktörlerin yanı sıra performans gereksinimlerinin dikkate alınmasını sağlar (Wang vd., 2016). Bu çalışmada sürdürülebilir havalimanı yapıları tasarımında malzeme seçiminin ve bu malzemelerin yaşam döngüsü analizinin, çevresel sürdürülebilirlik açısından ne kadar kritik olduğu vurgulanmıştır. Malzeme seçimi, havalimanı yapılarının enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde etkiler. Bu da malzeme süreçlerinde dikkatli bir değerlendirme ve kapsamlı bir yaşam döngüsü analizi (YDA) yaklaşımının uygulanması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Ahşap, çelik, beton gibi farklı yapı bileşen kategorilerindeki malzemelerin yaşam döngüsü dengesine önemli etkileri bulunmaktadır. Yapı malzemeleri seçimi, sürdürülebilirlik anlamında büyük bir etkiye sahiptir. (Takano vd., 2015). Sürdürülebilir malzeme seçiminde sosyal yaşam döngüsü değerlendirmesi kullanılarak malzemelerin ekonomik, sosyal ve çevresel etkilerinin yanı sıra ilgili paydaşların koşullarının iyileştirilmesi hedeflenmektedir (Hosseiniyou vd., 2014).

Sürdürülebilir yapı malzemeleri seçiminde önemli bir rol oynayan başka bir tartışma ise havalimanı yapılarının insan sağlığına potansiyel olumsuz etkileri ve yaşam döngüsü analizlerinin gerçekçiliği üzerinedir. Çevresel sürdürülebilirlik odaklı tasarımların yanı sıra, bu yapıların insan sağlığı üzerindeki etkilerinin de dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, büyük havalimanlarının altyapı sistemleri ve endüstriyel faaliyetleri; çevresel faktörlerin neden olduğu genellikle olumsuz sağlık etkileri nedeniyle seyahat eden, havalimanında yaşayan ve çalışan nüfusun sağlığını etkilemektedir (Passchier vd., 2000).

YDA metodolojisinin inşaat sektöründe sürdürülebilir yapı malzemelerinin seçimi ve yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin değerlendirilmesinde önemli bir araç olduğu kabul edilmektedir. Ancak, YDA'nın uygulanabilirliği ve gerçekçiliği, spesifik malzeme türleri, enerji tüketimi modelleri ve atık yönetimi stratejileri gibi faktörlerin doğru bir şekilde hesaplanması ve değerlendirilmesine bağlıdır. YDA çalışmalarında karşılaşılan zorluklardan biri, farklı fonksiyonel birimlerin kullanımı ve farklı çalışmalardan elde edilen sonuçların önceki çalışmalarla veya referanslarla karşılaştırılmasını zorlaştıran veri setlerinin tutarsızlığıdır (Chau vd., 2015). Bu tartışma, havalimanı yapılarının sürdürülebilirlik çalışmalarının sadece çevresel boyutlarını değil, aynı zamanda bu yapıların insan sağlığı üzerindeki potansiyel olumsuz etkilerini de dikkate alması gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, YDA uygulamalarının ve sonuçlarının, gerçek dünya koşullarını ve karmaşık çevresel etkileşimleri doğru bir şekilde yansıtabilecek şekilde geliştirilmesi ve uyarlanması gerektiğini göstermektedir. Bu, sürdürülebilir havalimanı yapılarının tasarımı ve inşaatı sürecinde karar vericiler için önemli bir yönlendirme sağlayabilir.

Tüm bu bilgiler ışığında bu çalışma sırasında, sürdürülebilir havalimanlarındaki yapı malzemelerinin sürdürülebilirlik kavramına etkisini araştırmak amaçlanmıştır. Amaca uygun olarak detaylı bir literatür taraması yapıldıktan sonra sürdürülebilir olduğu, uluslararası geçerliliği olan kuruluşların sertifikasyon sistemi ile belgelenmiş havalimanı yapıları incelenmiştir. İncelenen havalimanı yapılarında kullanılan inşaat malzemeleri irdelenmiş ve bu malzemelerden oranca fazla kullanılanlar seçilerek yaşam döngüsü analizi yapılmıştır. Yaşam döngüsü analizi için yapı malzemelerinin kabul edilen değerleri OpenLCA programına işlenmiş ve ECOinvent veri tabanı üzerinden hesaplamaları yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda malzemelerin çevresel etki değerleri görülmüştür. Bu etki değerleri malzemenin sürdürülebilirliğe katkısını okumak açısından yol gösterici olmuştur. Ek olarak bu çalışmada, malzeme seçiminde çevresel etkilerin nasıl değerlendirildiği, hangi malzemelerin daha sürdürülebilir olduğu ve YDA metodolojisinin bu süreçte nasıl bir yol gösterici olarak kullanılabileceği detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Yapılan literatür taramasında, sürdürülebilir havalimanı yapılarında kullanılan yapı malzemeleri ve yaşam döngüsü analizi üzerine hazırlanan araştırmalar incelenerek, bu alandaki mevcut bilgi birikimini ve metodolojik yaklaşımları özetlenmiştir. Bu taramayla, sürdürülebilir havalimanı yapılarının tasarımı ve inşaatı süreçlerinde karar vericilere ve araştırmacılara değerli bilgiler sunarak, daha yeşil ve yaşanabilir havalimanları yaratma hedefine katkıda bulunan çalışmalar irdelenerek, literatürde bu alandaki boşluğun tespit edilmesine katkı sağlanmıştır.

1.1. Literatür Taraması

Yang ve Al Qadi (2017), çalışmasında havalimanı yapı malzemelerinin YDA konusunda Chicago O'Hare Uluslararası Havaalanı'nda, pist örneğini incelemiştir. İncelediği örnekte ISO 14040 serisinde tanımlanan nicel bir metodoloji ve olasılıksal bir YDA kullanmıştır. Bunun sonucunda; çevresel etkileri açısından, geri dönüştürülmüş malzemelerin veya sıcak karışım asfalt teknolojisinin kullanıldığı bir tasarım daha düşük TPE (Termoplastik Elastomer) tüketimi ve GHG (Greenhouse Gas) emisyonlarına sahip olduğu belirlenmiştir (Yang & Al Qadi, 2017).

Xie, (2023) çalışmasında havaalanı bina sisteminin çevresel sürdürülebilirliğini değerlendirme konusunda bir havaalanı bina sistemi örneğini enerji açısından incelemiştir. Çalışmasında, yaşam döngüsü analizi ve yapay sinir ağları (YSA) entegre edilerek bir çerçeve oluşturulmuş ve bu çerçeve yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda; inşaat ve işletme sırasında kullanılan enerji toplam enerjinin %92.4'ünü oluşturduğu ve bu değer in sürdürülebilir olmayan bir durumu işaret ettiği sonucuna ulaşılmıştır (Xie vd., 2023).

Fuente (2016), çalışmasında sürdürülebilir havalimanı inşaatları konusunda Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya demiryolu hattının Barcelona El Prat Havalimanı Terminal 1'e uzatılması örneğini incelemiştir. Bu çalışmada sürdürülebilirliği değerlendirmek için çok kriterli karar verme yaklaşımı olan MIVES yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda; beton ve fiber takviyeli betonun kullanıldığı yapılandırmaların sürdürülebilirlik açısından doğru bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır (Fuente vd., 2016).

Douglas (2003), çalışmasında havalimanı inşaatlarında kullanılan malzemeler konusunda, mevcut yapıların denize doğru dolgu yöntemi ile genişletildiği 3 farklı havalimanı yapısı seçmiştir. Manchester Havalimanı, Hong Kong'daki Chek Lap Kok Havalimanı ve Japonya'daki Osaka Körfezi'nde bulunan Kansai Uluslararası Havalimanı örneklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda; yeniden kullanılabilir malzemelerin doldurma işlemlerinde kullanılmasının daha büyük bir sürdürülebilirlik sağladığına ulaşılmıştır (Douglas, 2003).

Greer (2020), çalışmasında dünya genelindeki havalimanlarının çevresel sürdürülebilirliği konusunda havalimanları için çevresel sürdürülebilirlik metrikleri incelemiştir. Çalışmasında, çevresel sürdürülebilirlik metrikleri mevcut bir havalimanı sürdürülebilirlik değerlendirme çerçevesinin altı kategorisine (enerji ve atmosfer, konfor ve sağlık, su ve atıksu, site ve habitat, malzeme ve kaynaklar, çok boyutluluk) göre gruplandırma yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda; düşük emisyonlu elektrik kaynakları kullanmak ve yer hizmetleri ile kapı ekipmanlarını elektrikli hale getirmek gibi etkili pratikler, kısa vadede havalimanlarını sürdürülebilirlik hedeflerine yönlendirebileceği bilgisine ulaşılmıştır (Greer vd., 2020).

Ding (2014), çalışmasında sürdürülebilir bina malzemelerinin yaşam döngüsü analizi (YDA) ve çevresel etkileri konusunda özel bir olay örneğini incelemiştir. Çalışmasında yaşam döngüsü analizi (YDA) yöntemi kullanılmıştır. Bunun sonucunda; sürdürülebilir bina malzemelerinin seçimi ve kullanımının, yeşil bina tasarımı ve inşasında önemli bir rol oynadığı görülmüştür (Ding, 2014).

Khan ve Ali (2020), çalışmasında sürdürülebilir inşaat konusunda altı farklı beton karışımı örneğini incelemiştir. Çalışmasında yaşam döngüsü analizi (YDA) ve yaşam döngüsü maliyet analizi yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda; hava emisyonlarının düşük miktarı ve uygun fiyatlar nedeniyle betonda ek iyileştirici kullanılması önerilmektedir (Khan & Ali, 2020).

Kaçar (2022), çalışmasında havalimanı operasyon yönetimi için yeşil bina sertifikasyonlarını incelemiştir. Çalışmasında LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM (Building Research Establishment Environmental

Assessment Method), CASBEE (Comprehensive Assessment for Building Environmental Efficiency), SBTool (Sustainable Building Tool) ve ACA (Airport Carbon Accreditation) sertifikasyonları karşılaştırılmıştır. Bu sertifikasyon sistemlerinin çevresel zararı analiz etme, ölçme ve puanlamaları Hong Kong Uluslararası Havalimanı üzerinden incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda; enerji ve atmosfer kategorisinin tüm sertifikasyon sistemleri için hayati olduğu sonucuna varılmıştır. (Kaçar vd., 2022)

Hafliger (2017), çalışmasında inşaat malzemelerinin yaşam döngüsü analizi (YDA) modelleme seçeneklerine olan duyarlılıklarını ve bina ölçeğindeki sonuçları konusunu incelemiştir. Çalışmasında bir duyarlılık değerlendirmesi yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda; modelleme seçimlerinin önemi net bir şekilde ortaya konmuş, binaların genel değerlendirmesinde önemli varyasyonlar gözlenmiş, ancak malzeme ölçeğinde yapılan detaylı incelemeler tüm malzemelerin bu seçeneklere benzer şekilde duyarlı olmadığını göstermiştir (Hafliger vd., 2017).

Devaki ve Shanmugapriya (2022), çalışmasında ülkeler bazında inşaat, yıkım ve atık yönetimi yaklaşımlarında yaşam döngüsü analizi (YDA) kullanımını gözden geçirmiş ve sürdürülebilir atık yönetimine odaklanmıştır. Çalışmada yöntem olarak; içerik tabanlı bir literatür analizi yapılarak, geçmiş yirmi yılda yayımlanmış uluslararası makaleler incelenmiş ve YDA tarihi, kavramları ve metodolojisi tartışılmıştır. Çalışma sonucunda; YDA çalışmalarının yaklaşık %70'inin Avrupa ülkelerinde yapıldığı, özellikle Hindistan gibi gelişmekte olan ülkelerde bu alanda araştırma eksikliklerinin olduğu sonucu bulunmuştur (Devaki & Shanmugapriya, 2022).

Rocamora (2016), çalışmasında inşaat malzemeleri için yaşam döngüsü analizi (YDA) veri tabanı örneklerini incelemiştir. Çalışmasında bilinen YDA veritabanları için bir özellikler ve kriterler listesi geliştirilmiş ve veritabanları birbiriyle kıyaslanmıştır. Çalışmanın sonucunda; YDA alanında bir çok veri tabanı olmasına rağmen, yalnızca birkaçının inşaat malzemeleri üzerine doğru veri içerdiği görülmüştür. GaBi veri tabanı ve ECOinvent, bütünlükleri, kullanılabilirlikleri ve gerçekçi kaynaklarıyla öne çıkmaktadır (Rocamora vd., 2016).

Kylili (2017), çalışmasında sürdürülebilir inşaatlar için bina bilgi modellemesi (BIM) ile yaşam döngüsü analizi (YDA) entegrasyonunu ele alır. Su tedarik sisteminde kullanılan çeşitli malzemeler üzerine incelenmiştir. Çalışmasında, yaşam döngüsü analizi (YDA) ile bina bilgi modellemesi (BIM) entegre edilerek kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda; çapraz bağlı termoplastik su tedarik sistemi, iklim değişikliği açısından çelik sistemden %87 ve bakır sistemden %88 daha iyi performans göstermiştir (Kylili vd., 2017).

Akadiri (2013), çalışmasında bina projeleri için sürdürülebilir malzemelerin seçimine yönelik çok kriterli bir değerlendirme modeli konusunu ele alır. Çalışmasında, değerlendirme modelinin uygulanışını gösteren sayısal bir örnek paylaşmış ve bina uzmanları arasında bir anket çalışması uygulamıştır. Çalışmanın sonucunda; önerilen değerlendirme modelinin, sürdürülebilirlik prensipleri temelinde doğru bir değerlendirme sağladığı ve bina tasarımcılarına sürdürülebilir bina malzeme seçiminde rehberlik edebileceği sonucuna ulaşılmıştır. (Akadiri vd., 2013). Ek olarak, Akadiri ve Olomolaiye (2012), bir diğer çalışmada ise yapı malzemeleri seçiminde sürdürülebilirlik kriterlerinin belirlenmesi konusunda, kriterlerin geliştirme aşamalarını incelemiştir. Çalışmasında mimar ve tasarımcılara yönelik bir anket yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda; seçim kriterlerinin detaylı açıklamalarının yanı sıra bina paydaşlarına malzeme seçiminde yeni bir yol sunarak yapı projelerinin sürdürülebilirliğini kolaylaştırmaktadır (Akadiri & Olomolaiye., 2012).

Alkheder (2021), çalışmasında Kuveyt Uluslararası Havalimanında yeni bir pist inşa etmek üzere iki farklı malzeme alternatifi arasında seçim yapmada tasarım ekibine yardımcı olacak sürdürülebilir değerlendirme kriterleri geliştirmektedir. Örnek olarak yeni bir pistin inşası için iki farklı malzeme alternatifi, asfalt ve beton ele alınmıştır. Bu çalışmada üç ana kriterden türetilen 24 alt kriter ile bulanık analitik hiyerarşi süreci yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda; bulanık analitik hiyerarşi süreci kullanımıyla, asfalt malzemenin yapım ve bakım kolaylığına ek olarak ilk maliyet ve enerji tasarrufu açısından beton malzemeye göre daha iyi bir alternatif olduğu sonucuna varılmıştır (Alkheder vd., 2021).

Carabano (2017), çalışmasında bina malzemelerinin yaşam döngüsü analizi (YDA) kullanımını konu alır. Termal yalıtım malzemelerinin çevresel etkisi, yaşam döngüsü analizi (YDA) metodolojisi kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, incelenen tüm etki kategorileri için çevresel açıdan en iyi ürünün olmadığı; bir malzeme veya başka bir malzemenin seçiminin, küresel bir taahhüt çözümü benimseyerek değerlendirilmesi gerektiği bulunmuştur (Carabano vd., 2017).

Mattinzioli (2020), çalışmasında kara yollarının sürdürülebilir tasarımı konusunda kapsamı, kriteri, teknik olarak üç sütunlu yapısı ve varlık yönetimi etkinliği açısından ortak olarak analiz edilebilecek örnek projeleri incelemiştir. Çalışmasında CEEQUAL (The Civil Engineering Environmental Quality Assessment and Awards Scheme) ve Greenroads gibi global pazarda mevcut farklı derecelendirme sistemlerinin detaylı incelemesi yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda; incelenen sistemlerin tanımlanan kategorileri sürdürülebilirlik açısından daha homojen bir şekilde değerlendirdiği ve derecelendirme sistemlerinin projelerin sosyal değerlendirmesi için güçlü bir potansiyele sahip olduğu, ancak yaşam döngüsü değerlendirmesinin daha sonuç odaklı olabileceği bulunmuştur (Mattinzioli vd., 2020).

Jamshidi (2014), çalışmasında havaalanında kullanılan betonun yapısal performansı ve sürdürülebilirliği konusunda çeşitli malzeme yüzdeleri içeren beton örneklerini incelemiştir. Çalışmasında betonların mikro düzeyde içerik yüzdeleri ve sürdürülebilirlik performansı incelenmesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda; sürdürülebilirlik kriterleri kullanılarak elde edilen sonuçlara dayanarak, beton için ön malzeme olan beton içeriğinin seçimi hakkında senaryolar önerilmiştir (Jamshidi vd., 2014).

Asdrubali (2015), çalışmasında geleneksel olmayan sürdürülebilir bina malzemeleri konusunda, doğal veya geri dönüştürülmüş malzemelerden yapılan yapı malzemeleri örneklerini incelemiştir. Çalışmasında yaşam döngüsü analizi (YDA) yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda; belirlenen malzemelerin, üretim ve atık yönetimi aşamalarında çevreye olan olumsuz etkileri azaltma potansiyeline sahip olduğu ve sürdürülebilir yapı tasarımı sürecinde önemli avantajlar sunduğu gözlenmiştir (Asdrubali vd., 2015).

Yukarıda belirtildiği şekilde sürdürülebilirlik odaklı olarak yapılarda kullanılan malzemeler bir çok kez incelenmiş olsa da, kullanılan örnek yapı ve malzemeler sınırlıdır. Yeşil bina sertifikalı havalimanı binaları enerji bakımından bir çok çalışmada değerlendirilmiş ancak yapı malzemeleri üzerinden sürdürülebilirlik için spesifik bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, daha önce yapı malzemeleri açısından incelemesine rastlanmayan, yeşil bina sertifikalı, sekiz farklı havalimanı yapısının sürdürülebilirliği değerlendirilmiştir ve bu açıdan diğer çalışmalardan farklıdır. Havalimanı yapılarında kullanıldığı belirlenen üç farklı malzemenin çevresel etki performansını da inceleyen bu çalışma; malzemelerin yaşam döngüsü değerlendirmesini OpenLCA programı ve ECOinvent veri tabanı üzerinden gerçekleştirmiştir. Daha önce GaBi programı ve ECOinvent veritabanı, SustainPro programı ve ELCD veritabanı, GaBi programı ve ECOinvent veritabanı, kombinasyonları kullanılmış olmasına rağmen (Kurian vd., 2021; Kalakul vd., 2014; Fazio vd., 2015; Pauer vd., 2020), OpenLCA programı ve ECOinvent veri tabanı üzerinden bir yaşam döngüsü analizi hesaplaması yapılmamıştır. Sonuç olarak; yapılan bu çalışma her iki yöntem ve veritabanının birlikte kullanıldığı ilk çalışma olma özelliğini taşımaktadır.

Bu maksatla yapılan bu çalışma literatürde sürdürülebilir havalimanlarının, malzeme analizlerini ISO standartları doğrultusunda değerlendirirken, analiz yöntemi ile de boşluğu dolduracaktır.

Gelecek çalışmalarda farklı yapılar yada farklı malzemeler seçilebilir, sürdürülebilirlik açısından hesaplamalar farklı program yada veritabanları üzerinden yapılabilir. Bu çalışmada malzeme değerleri için genel kabuller kullanılmıştır. Sonraki çalışmalarda daha spesifik değerler kullanılabilmesi için laboratuvar test sonuçları referans alınabilir.

1.2. Sürdürülebilirlik Kavramı

Sürdürülebilirlik, çeşitli disiplinlerin odak noktasında yer alan önemli bir araştırma konusudur ve ilk kez 1972 yılında Stockholm'deki "İnsan ve Çevre" konferansında ele alınmıştır (Basiago, 1995). İlk adımlarını takiben, 1987'de Dünya

Çevre ve Kalkınma Komisyonu'nun "Ortak Geleceğimiz" raporu olan Brundtland Raporu ile sürdürülebilirlik, günümüzde genel kabul görmüş bir tanıma kavuşmuştur. Brutland Raporu, "Sürdürülebilir kalkınma; şimdiki neslin ihtiyaçlarını, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneklerini tehlikeye atmadan sağlama sürecidir." şeklinde sürdürülebilir kalkınmayı tanımlar (Brundtland, 1987). Bu tanım, çevresel, sosyal ve ekonomik boyutları iç içe geçen bir bütün olarak ele alır. Sürdürülebilirliğin küresel çaptaki öneminin bir diğer örneği ise 1997 yılında kabul edilen Kyoto Protokolü'dür. Bu uluslararası anlaşma, sera gazı emisyonlarının azaltılmasını hedefleyerek iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir adım olmuştur. Kyoto Protokolü, ülkeleri emisyonları azaltma konusunda hukuki olarak bağlayıcı hedefler koymaya teşvik ederek sürdürülebilir kalkınmanın çevresel boyutunu güçlendirmiştir. (Hill, 2001)

İklim değişikliği, günümüzde küresel boyutta karşımıza çıkan en büyük problemlerden biri olarak görülmektedir. Bu problemin çoğalarak artmasıyla beraber enerji tüketiminde yüksek bir paya sahip olan yapıların, tasarım aşamasından itibaren, yapım, kullanım ve faydalı ömrünü tamamlamasına kadar olan tüm aşamalarda alınacak ekolojik ve sürdürülebilir tasarım önlemleri ile çevreye verdiği olumsuz etkinin ortadan kalkması hedeflenmektedir (Koçhan, 2017).

Sürdürülebilirlik ilkelerinin inşaat sektörüne entegrasyonu ile birlikte, yapıda sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir inşaat gibi kavramlar birçok ülke tarafından benimsenmiş, bu alanda yapılacak çalışmaların ve alınacak önlemlerin özenle incelenmesi zorunlu hale gelmiştir. Çevreye duyarlı binalar; alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarını etkin kullanımı, çevreyle uyumlu oluşu, çevre kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlaması ve sürdürülebilir malzemelerin kullanımı gibi özellikleri sayesinde ulusal politikalarda, yukarıda da belirtildiği gibi, önemli bir yer edinmiştir. Binaların çevresel ayak izinin küçültülmesi, ekonomik, sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önem taşır. Yapı malzemelerinin seçimi, çevreye olan etkileri açısından kritik bir rol oynar; çünkü bu malzemelerin üretiminden kullanıma kadar olan süreç, hava, su ve toprak kirliliğine neden olabilen atıklar üretir (Zari, 2019). Dolayısıyla, yapı malzemelerinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi ve bu etkilerin minimize edilmesine yönelik çalışmalar büyük önem arz eder. Bu çerçevede,

ulusal ve uluslararası alanda yapılan çevre dostu havalimanı yapı örneklerinde, yatay ve düşey strüktürel elemanlar ile detay bölümlerinde kullanılan malzemelerden seçilen birer örnek bu çalışmada detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Bu malzeme örnekleri sonraki bölümlerde de incelenebileceği üzere; çelik, beton ve ahşap olarak sıralanmaktadır.

1.3. Sürdürülebilir Yapılar ve Sertifikalar

Sürdürülebilir kalkınma, inşaat malzemeleri endüstrisinde önemli bir hedef olarak öne çıkmaktadır. İnşaat sektöründe malzeme üretimi, kullanımı ve yeniden değerlendirilmesi ciddi çevresel etkilere yol açmakta, bu durum sürdürülebilir metodlar ve malzeme geliştirmenin önemini artırmaktadır. Çevre üzerindeki etkiyi minimize etmek, enerji tasarrufu sağlamak ve malzemeleri yeniden kullanabilmek gibi avantajlar sunan sürdürülebilir yapı malzemeleri, aynı zamanda binaların estetik, rahatlık ve sağlamlık gibi ihtiyaçlarını da karşılamaktadır. Sürdürülebilir malzeme seçiminin altında yatan fikir, yaşam döngüsü analizi (YDA) gibi araçlarla malzemelerin çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarını detaylı bir şekilde incelemektir. Bu strateji, inşaat sektörünün uzun vadeli sürdürülebilirliğini garanti altına almanın kritik bir yolu olarak kabul edilmektedir (Abeyundara vd., 2009).

İnşaat sektörünün sürdürülebilir kalkınma alanında önemli bir rolü vardır. Doğal kaynakların büyük bir bölümü insanların barınmaları veya çalıştıkları yapıların yapımları sırasında kullanılmaktadır. Bu yapıların kullanımı sırasında yapım sürecinin verimli yönetilmesi, yenilenebilir kaynakların kullanılması ve sözleşme kurallarına bağlı kalınarak kullanılan doğal kaynakların en aza indirilmesi durumu sürdürülebilir kalkınmaya önemli derecede katkı sağlamış olur (Müftüoğlu, 2017).

Waris (2014), çalışmasında sürdürülebilirlik kavramına dayalı olarak inşaat sahasındaki ekipman seçimi için kriterler belirlemeyi ve bir değerlendirme çerçevesi sağlamayı konu alır. Çalışmasında; inşaat malzemelerinin seçim sürecini sürdürülebilirlik üzerinden değerlendirmenin, enerji korunumu, verimlilik, yeşil çevre, ekonomi ve insan refahı açısından önemini vurgulamıştır (Waris vd., 2014)

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÖLÇÜTLERİ	
Çevresel Boyut	Atıklarda azalma var mı?
	Hava kirliliği engellenebiliyor mu?
	Üretilen malzeme çevre için zehirli mi?
	CO2 emisyonunu azaltıyor mu?
	Doğada var olan biyolojik çeşitliliğinin korunmasını sağlıyor mu?
	Malzeme toprağın niteliği için zararlı etkisi var mı?
	Malzeme çevredeki kokuların emilimini sağlıyor mu?
	Üretilen malzeme geri dönüştürülebilir özelliğine sahip mi?
	Yeniden kullanılabilirlik kapasitesi yüksek mi?
	Görsel açıdan çevre kirliliği engellenebiliyor mu?
	Gürültü kirliliğinin oluşmamasını sağlıyor mu?
	Tüketilen enerji miktarı az mı?
	Doğal ve yerel kaynaklardan elde edilebiliyor mu?
	Su kirliliği engellenebiliyor mu?
Ekonomik Boyut	Ham maddelerin depolanacağı yere taşınması sırasında tüketilen enerji miktarının az olması sağlanabiliyor mu?
	Taşıma maliyeti azaltılabiliyor mu?
	Bakım onarımı kolay mı?
	Dayanıklı ve uzun ömürlü mü?
	Mal ve hizmet sunumunda daha az materyal kullanılmasını sağlıyor mu?
Sosyal Boyut	Malzeme bölgenin sosyal dokusuna uygun mu?
	Sağlıklı bir çevre sağlayabiliyor mu?
	Malzeme insanoğlu için güvenliği sağlayabiliyor mu?
	İnsanların barınma ihtiyacını karşılıyor mu?
	İnsan gereksinimleri olan eğitim, kültürel etkinlikler, uygun iş ve ev gibi sosyal dengeleri sağlayabiliyor mu?
	Yerel iş gücünün desteklenmesini sağlıyor mu?

Tablo 1. Sürdürülebilirlik Ölçütleri

Sürdürülebilirlik ölçütlerinin etki boyutlarına göre paylaşıldığı yukarıdaki Tablo 1., proje aşamasında malzeme seçimini gerçekleştirirken doğru soruları sormakta yardımcı olur (Tufan & Özel, 2018).

1.3.1. LEED Sertifikası

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) sertifikası, binaların çevre dostu tasarım, inşaat ve işletme pratiklerini teşvik eden, uluslararası tanınmış bir yeşil bina derecelendirme sistemidir. Amerika Birleşik Devletleri merkezli olan bu sertifika, ABD Yeşil Bina Konseyi (USGBC) tarafından geliştirilmiştir. LEED sertifikası, sürdürülebilir arazi kullanımı, su tasarrufu, enerji verimliliği, malzeme seçimi ve iç hava kalitesi gibi çok sayıda kriteri kapsayan bir değerlendirme sistemi üzerinden binalara verilir. İnşaat sektöründe LEED sertifikalı binalar, çevresel etkileri azaltma, işletme maliyetlerini düşürme ve kullanıcıların sağlık ve refahını iyileştirme gibi avantajlar sağlar (Champagne & Aktaş., 2016).

İlk olarak LEED sürüm 1.0 olarak yayınlanan serfika, başlangıçta yalnızca yeni inşaatlara yönelik bir bina derecelendirme sistemi olarak geliştirilmiştir. 2001'de LEED 2. versiyon, 2005'te LEED 2.2. versiyon yayınlanmıştır (Sabapathy, 2010). En son versiyon 2013 yılında LEED 4. versiyon olarak yayınlanmıştır. LEED beş ana sertifikasyon türünü içermektedir. Bunlar; bina tasarımı ve inşaatı, iç tasarım ve inşaat, çevre gelişimi, bina işletme ve bakımı ve evler için LEED şeklinde sıralanmaktadır. Sertifika düzeyi, bir binanın farklı değerlendirme kategorilerindeki kriterleri ne kadar iyi yerine getirdiğine bağlı olarak tahsis edilen puanlara bağlı olup puanlamalara göre sertifika türleri şu şekildedir; sertifikalı (40-49 puan), gümüş (50-59 puan), altın (60-79 puan) ve platin (80+puan) şeklindedir. Puanlar altı kategoriye ayrılmıştır: sürdürülebilir bölümler, enerji, hava kalitesi, su verimliliği, iç mekan çevre kalitesi, kullanılan malzemeler. Bu kategoriler arasında enerjiyle ilgili krediler, genel sertifika puanının neredeyse %30'luk payına hakimdir (Wu vd., 2017; Stoppel vd., 2013).

Havalimanı yapıları, büyük enerji tüketicileri ve karbon emisyonu kaynaklarıdır. LEED sertifikası; havalimanlarını enerji, su, sürdürülebilir malzeme kullanımı açısından denetlerken, yolcu konforu ile yolcu sağlığını ön planda tutarak yapıların çevresel ayak izini azaltmayı hedefler. LEED sertifikalı havalimanları, sürdürülebilirlik konusunda bir taahhüdü temsil eder ve yolcular ile diğer paydaşlara çevre dostu operasyonlarına dair güçlü bir mesaj gönderir (Kaçar vd., 2022).

LEED; yenilenebilir, geri dönüştürülebilir ve düşük emisyonlu malzemelerin kullanımını önceliklendirerek sürdürülebilir malzeme seçimini teşvik eder. Bu sistem,

malzemelerin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendirir ve sağlıklı iç mekan ortamlarını destekleyen ürünleri tercih etmeyi önerir (Lessard vd., 2017).

LEED sertifikası, çeşitli uluslararası standartlara ve uygulamalara dayanır, ancak doğrudan belirli ISO standartlarına atıfta bulunmak yerine, geniş bir sürdürülebilirlik ve çevre yönetimi kavramı çerçevesinde geliştirilmiştir. Bununla birlikte, LEED süreci sırasında ISO 14001 (Çevre Yönetim Sistemi) gibi standartlar dolaylı olarak ele alınabilir, çünkü bu tür standartlar sürdürülebilir operasyonlar ve çevre yönetimi pratikleri ile uyumludur. LEED, global sürdürülebilir inşaat hareketinde önemli bir rol oynar ve havalimanlarının da dahil olduğu geniş bir yelpazede çevresel sürdürülebilirlik standartların yükselmesini sağlar.

1.3.2. BREEAM Sertifikası

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), dünya genelinde kabul gören öncü bir yeşil bina değerlendirme ve sertifikalandırma sistemidir. 1990 yılında İngiltere'de Bina Araştırma Kurumu (BRE) tarafından geliştirilen BREEAM, binaların çevresel performansını ölçmek ve iyileştirmek için tasarlanmıştır. Bu sistem, sürdürülebilir inşaat uygulamalarını teşvik eder ve geniş bir kriter yelpazesini kapsar. BREEAM, inşaat projelerinin çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından kapsamlı bir değerlendirilmesini; enerji kullanımı, su tasarrufu, iç hava kalitesi, malzeme seçimi, atık yönetimi ve ekolojik etkiler gibi çeşitli alanlarda ölçer (Ilhan vd., 2016). Buna göre BREEAM sertifikalı binalar, yüksek çevresel performans standartlarına ulaştıklarını ve sürdürülebilirlik açısından üstün olduklarını kanıtlar.

BREEAM 2016 yayınlanan sonuncu versiyon olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemin değerlendirmesi, toplam puan üzerinden başarı yüzdesi olarak ifade edilir. Geçme sınıflandırması için %30, iyi için %45, çok iyi için %55, mükemmel için %70 ve üstün sınıflandırma için %85 puan alınması gerekir. Yeni inşaat projelerinin kategorileri ise; yönetim, sağlık ve refah, enerji, ulaşım, su, kullanılan malzemeler, atık yönetimi, arazi kullanımı ve ekoloji, kirlilik ve inovasyon şeklindedir. (Awadh, 2017).

BREEAM, yeşil bina hareketinin öncülerinden biri olarak, dünya genelinde sürdürülebilir inşaat uygulamalarının benimsenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. İnşaat sektöründe çevresel sürdürülebilirliği teşvik eden ve çeşitli yapı türlerinde, havalimanları dahil olmak üzere, yüksek çevresel standartlara ulaşmayı hedefleyen bir değerlendirme aracıdır. BREEAM, havalimanları gibi büyük ölçekli yapılar için de uygulanabilir. Havalimanlarının BREEAM sertifikası alması, enerji ve su verimliliğinin artırılması, karbon emisyonlarının azaltılması, atık yönetiminin iyileştirilmesi ve ekolojik değerin korunması gibi konularda mükemmeliyeti temsil eder. Bu, havalimanlarının operasyonel verimliliğini artırırken çevresel ayak izlerini azaltmalarına yardımcı olur. BREEAM, sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen, geri dönüştürülebilir ve düşük çevresel etkiye sahip malzemelerin kullanımını teşvik eder. Malzeme seçiminde yaşam döngüsü değerlendirme (YDA) kriterlerini dikkate alır ve yapının çevresel etkilerini azaltmayı amaçlar. Bu, yapı malzemelerinin seçimi ve kullanımında sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesine yönelik kapsamlı bir yaklaşım sunar. (Ilhan vd., 2016). BREEAM doğrudan belirli ISO standartlarına atıfta bulunmasa da, ISO 14001 (Çevre Yönetim Sistemleri) ve ISO 50001 (Enerji Yönetim Sistemleri) gibi standartlarla uyumlu sürdürülebilirlik ilkelerini benimser. Bu standartlar, BREEAM değerlendirme sürecinde çevresel yönetim ve enerji verimliliği uygulamalarının geliştirilmesine katkıda bulunur.

1.4. Sürdürülebilir Malzeme Seçimi ve Standartlar

Çevresel Ürün Beyanı (EPD), inşaat malzemeleri alanında sürdürülebilir gelişmeyi destekleyen önemli bir ölçüttür. EPD, malzemelerin çevreye olan etkilerini standart bir yöntemle değerlendirerek sunan ve bağımsız bir şekilde doğrulanmış bir rapordur. Çevresel Ürün Beyanı, malzemelerin yaşam süreci boyunca enerji ve su tüketimi, sera gazı salınımı gibi çevresel yüklerin detaylı bir analizini sağlar. İnşaat sektöründeki uzmanlar için EPD'ler, malzeme seçimleri ve daha yeşil bina tasarımları yapabilmek adına önemli bir referans noktasıdır. Malzemenin seçiminden, bina tasarımına kadar alınan kararlarda bilinçli bir yol gösterici olan EPD, yeşil bina sertifikaları ile uyumlu olarak çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilir inşaat malzemeleri piyasasında doğruluğun ve şeffaflığın artırılmasına yardımcı olur.

EPD'ler bu bağlamda, inşaat malzemelerinin çevresel etkinliğinin ölçümü ve iyileştirilmesinde hayati bir işlev görür (Bovea vd., 2014).

Aghazadeh ve Yıldırım (2021), çalışmasında inşaat projelerinde sürdürülebilir malzeme seçimini etkileyen etkin parametrelerin değerlendirilmesini konu alır. Çalışmasının sonucunda; istatistiksel ve çıkarımsal analizler kullanılarak, EPD faktörlerinin sürdürülebilir malzeme seçim sürecini etkilediğini göstermiştir (Aghazadeh & Yıldırım, 2021).

İnşaat malzemeleri için EPD standardı, ISO 14025 ve EN 15804 yönetmeliklerine uygun olarak, ürünün çevresel etkilerini ayrıntılı bir şekilde ifade eden bir belgedir. Bu standartlar, ürünlerin çevresel performansının yaşam döngüsü değerlendirmesi ile analiz edilmesine dayanır. EPD, çevresel etkileri, kullanılan malzemelerin içeriğini, enerji ve atık yönetimi pratiklerini ayrıntılı olarak ele alır. LEED gibi yeşil bina sertifikaları tarafından kabul gören bu belgeler, sürdürülebilir yapı sektörüne katkı sağlar ve malzeme seçimlerinde ve bina tasarımında bilinçli kararlar alınmasını kolaylaştırır.

1.5. Yaşam Döngüsü Analizi Yaklaşımları ve Araçları

Yaşam döngüsü analizi, malzemelerin ham madde olarak çıkarılması aşamasından, kullanım ömrünün sonuna ve atık yönetim süreçlerine kadar olan tüm evrelerdeki çevresel etkilerinin detaylı olarak araştırılmasıdır. YDA, insanların çevreye olan etkilerini azaltma yönünde daha bilinçli adımlar atılmasına olanak tanıyan, sürdürülebilir gelişme çabalarında temel bir araçtır. (Kalakul vd., 2014)

Duru ve Koç (2021), çalışmasında yapı bilgi modellemesi (BIM) ile yaşam döngüsü analizi hesaplamalarının entegrasyonunu konu almıştır. Çalışmasının sonucunda; BIM tabanlı dijital araçların, YDA hesaplamaları için süreci hızlandırma potansiyeline sahip olduğu bulunmuştur. Geleneksel elle yapılan YDA analizleri yerine, YDA sürecini basitleştiren ve tasarımcılar için sonuçların yorumlanmasını kolaylaştıran bir entegrasyonun mümkün olduğu sonucuna varılmıştır (Duru & Koç, 2021). Butt (2020), çalışmasında Nashville Uluslararası Havalimanı'nı ele almış ve YDA çerçevesini kullanmıştır. Havalimanı operasyon yetkililerinin enerji kullanımı ve çevre ile ilgili etkileri karar alma sürecinde YDA hesaplamalarını dikkate almasının

önemini vurgulamıştır (Butt vd., 2020). Yaşam döngüsü analizinin teorik ile pratik yönlerini belirleyen uluslararası standartlar ISO 14040 Çevre Yönetimi ve buna bağlı yönergeler ile tanımlanmıştır. Bu belgeler, YDA uygulanma biçimini ve izlenmesi gereken yönergeleri ortaya koymaktadır.

YDA, incelenecek sistemin veya malzemenin sınırlarını, daha sonra ise analizin amacını tanımlayarak başlar. Bu ön aşama, değerlendirme sürecinin odak noktasını kesinleştirir ve gerekli verilerin toplanması için yönlendirme sağlar. Envanter değerlendirmesi evresinde, ürünün yaşam döngüsü boyunca doğrudan ve dolaylı tüm çevresel girdi ve çıktıları detaylandırılır. Bu aşamada, enerji ve su kullanımı, atmosfer ve su kirliliğine katkıda bulunan emisyonlar gibi çeşitli faktörler incelenir. Envanter değerlendirmesinden elde edilen bilgiler, belirlenen çevresel etki kategorileri üzerindeki potansiyel etkiler açısından değerlendirilir. Bu aşamada, küresel ısınma, ozon tabakası zararı ve asit yağmuru gibi farklı çevresel sorunlar göz önünde bulundurulur. Analiz edilen verilerin, çevresel performansı geliştirmek adına alınacak stratejik eylemlere nasıl katkıda bulunabileceği değerlendirilir ve bu sonuçlar raporlanır (Finnveden vd.,2009). YDA, yeni ürün tasarımı, proje planlama ve satınalma zinciri yönetimi gibi çeşitli sahalarda değerli bir araçtır. Sürdürülebilir ürün geliştirme, çevresel sertifika programları, yeşil tedarik zinciri yönetimi ve çevre politikası oluşturma gibi alanlarda önemli bir role sahiptir. YDA, çevresel etkilerin minimizasyonu ve kaynakların etkin kullanımı için bilinçli kararlar alınmasında önemli bir dayanak noktasıdır. Bu değerlendirmeler, çevresel etkileri azaltma stratejilerinin geliştirilmesine zemin hazırlar (Oğuz, 2021). YDA için bir çok farklı yazılım ve veri tabanı alternatifi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları ücretli bazıları yarı ücretli olarak kullanıma sunulmaktadır. YDA için kullanılacak yazılım ve veri tabanı kombinasyonlarında ham maddelerin çıkarılması, üretim süreçleri, kullanım ve ürünün ömrünün sona ermesi gibi aşamalar çevresel etkisi bakımından incelenebilir. Ham maddenin çıkarılarak üretim tesisine taşınması ve üretiminin tamamlanması aşamaları beşikten kapıya olarak tanımlanmaktadır. Ham maddenin çıkarılmasından, uygulanması ve ömrünü tamamlaması sonunda imha edilmesi yada geri dönüştürülmesi süreçleri ise beşikten mezara olarak ifade edilmektedir (Bhatt vd., 2019).

Yapı Sektöründe Çoğunlukla Kullanılan Yaşam Döngüsü Veritabanları					
Veritabanı	Bölgesi	Kuruluş	Ücret Durumu	YDA Sistem Sınırları	Açıklama
AusLCI	Avustralya	Building Product Innovation Council	Ücretsiz	Beşikten Kapıya	Herkese açık, tutarlı bir bilgi kaynağı, sadece Avustralya bölgesine özgü.
Base Carbone	Fransa	French Environment and Energy Management Agency	Ücretsiz	Beşikten Mezara	Bir çok kamusal emisyon faktörü ve veri kaynağı mevcut, sadece Fransa'da uygulanabilir.
BEDEC	İspanya	Institute of Technology of Construction	Ücretsiz	Beşikten Kapıya	Ürün fiyatı ve çevresel bilgileri içeren veriler mevcut, teknik açıklama raporları açık kaynak değildir.
CLCD	Çin	Sichuan University IKE Environmental Technology	Ücretsiz	Beşikten Kapıya	600'den fazla veri kümesi içerir, Çin içinde farklı sektörlerin birleşimidir. Açık kaynak kodlu değildir ve sadece Çin'dir.
ECOinvent	İsviçre	Swiss Centre for Life Cycle Inventories	Ücretli	Beşikten Mezara	Dünyanın en büyük ve en tutarlı veri tabanına sahiptir. Lisans ve yıllık kullanım ücreti zorunludur.
EF Databases	Avrupa	European Commission	Ücretli	Beşikten Mezara	3200 veri kümesi ile ticari bir yazılım olan SimaPro içerisine gömülü kullanılabilir.
ELCD	Avrupa	EU Joint Research Centre	Ücretsiz	Beşikten Mezara	330 veri kümesi mevcuttur. Raporlar, diyagramlar vd. Sonuçlar ile dijital bağlantısı eksiktir.
ICE Inventory of Carbon & Energy	İngiltere	University of Bath	Ücretsiz	Beşikten Kapıya	Yapı malzemeleri için önde gelen, çok kullanılan bir veri tabanıdır. Sadece gömülü karbon bilgi mevcuttur.
IVAM LCA Data	Hollanda	IVAM Environmental Research	Ücretli	Beşikten Mezara	Farklı sektörlere uygulanabilen veri tabanı SimaPro içinde gömülü gelmektedir. Lisans ve yıllık ücret zorunludur.
Oekobaudat.de	Almanya	Federal Ministry of the Interior, Building and Community	Ücretsiz	Beşikten Mezara	1200den fazla veri kümesine sahip, ücretsiz, Almanya'nın ulusal yaşam döngüsü envanteridir. Yapı malzemeleri konusunda özelleşmiştir.
U.S. LCI	Birleşik Devletler	National Renewable Energy Laboratory	Ücretsiz	Farklı sistem sınırları içermektedir.	Farklı sistem sınırlarını içeren, ABD özelinde yaşam döngüsü envanteri devamlı güncellenmektedir.

Tablo 2. YDA İçin Kullanılan Veritabanı Alternatifleri ve Açıklamalar

(Pan & Teng, 2021)

Tablo 2.'de paylaşıldığı şekilde YDA hesaplamaları için uluslararası alanda pek çok veri tabanı alternatifleri bulunmaktadır (Pan & Teng, 2021). Bu veritabanları bazen ulusal alanda aktif olsa da çoğu zaman uluslararası alanda hizmet vermektedir. Bununla birlikte, ücret sınırlamaları da yazılımdan yazılıma farklılık göstermektedir. Ek olarak, paylaşılan veritabanları birbirinden farklı programlar üzerinde çalıştırılabilir.

Yaşam döngüsü analiz edilen bir malzemenin çevresel etki değerinin gerçekçi olabilmesi için seçilen yazılım ve veri tabanı kombinasyonu önemlidir. Bu çalışmada OpenLCA yazılımı üzerinde ECOinvent veri tabanı çalıştırılacaktır. OpenLCA, ECOinvent veri tabanı ile birlikte, malzemelerin yaşam döngüsünün çevresel etkilerini belirleme ve azaltma konusunda kapsamlı ve esnek bir platform sağlar. Tablo 3.'te alternatif YDA programları ve açıklamaları paylaşılmıştır.

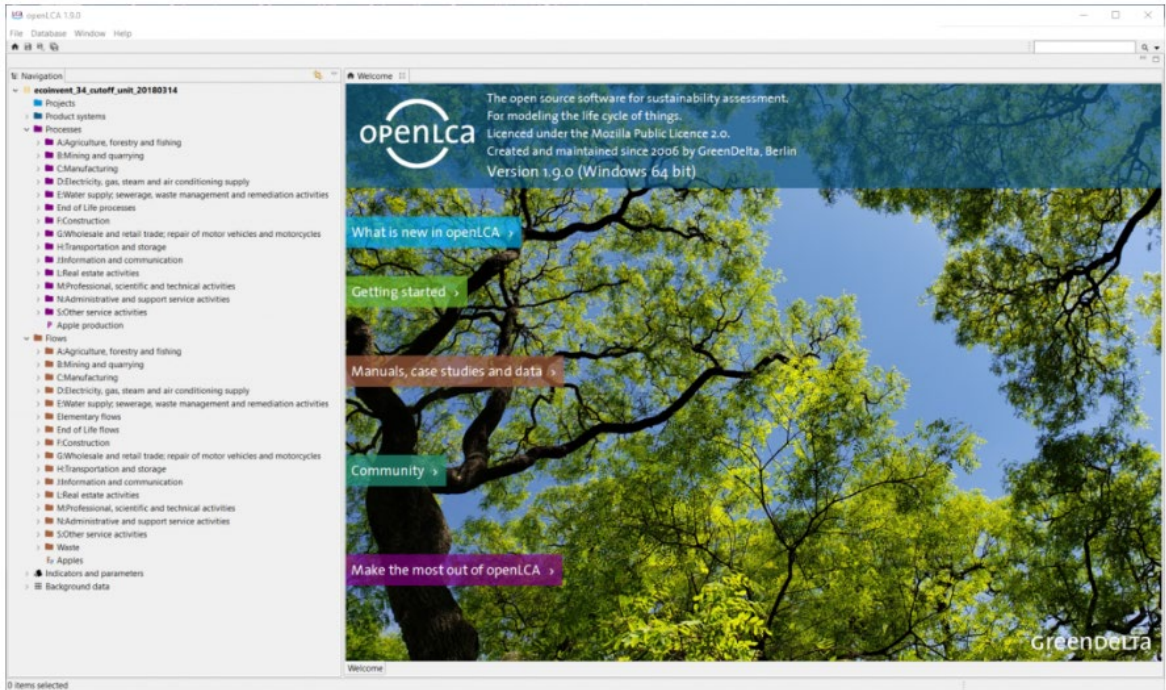
Yapı Sektöründe Çoğunlukla Kullanılan Yaşam Döngüsü Hesaplama Programları					
Yazılım	Bölgesi	Kuruluş	Ücret Durumu	YDA Sistem Sınırları	Açıklama
SimaPro	Hollanda	Pre Sustainability	Ücretli	Beşikten Mezara	Çevresel etkilerin değerlendirilmesi ve sürdürülebilirlik analizleri için dünya çapında önde gelen yazılımdır.
OpenLCA	Almanya	GreenDelta	Ücretli	Beşikten Mezara	Açık kaynaklı ve kapsamlı bir YDA aracıdır. Dünya genelinde kapsamlı kullanımıyla yaygındır.
Ces Edupack	İngiltere	Granta Design	Ücretli	Beşikten Mezara	Mühendislik ve tasarım öğrencilerine malzeme seçimi ve sürdürülebilir tasarım konularında rehberlik eder.
SolidWorks Sustainability	ABD	Dassault Systemes	Ücretli	Beşikten Mezara	SolidWorks CAD yazılımının bir uzantısı olarak, çevresel etki değerlendirmelerinde kullanılır.
Sustainable Minds	ABD	Sustainable Minds LLC	Ücretli	Beşikten Mezara	Çevresel etki değerlendirmelerini kolaylaştırmak amacıyla kullanılır.
Umberto NXT LCA	Almanya	IfU Hamburg	Ücretli	Beşikten Mezara	Süreçlerin çevresel performansının değerlendirilmesinde tercih edilir.
EIME	Fransa	GreenDelta& CODDE	Ücretli	Beşikten Mezara	Elektronik ve elektrik sektörlerinde çevresel ve sağlık etki değerlendirmeleri yapar.
GaBi Databases	Almanya	PE International	Ücretli	Beşikten Mezara	5000 yaşam döngüsü envanteri mevcuttur. Lisans ve yıllık kullanım ücreti zorunludur.

Tablo 3. YDA İçin Kullanılan Program Alternatifleri ve Açıklamalar

(Herrmann & Moltesen, 2015)

OpenLCA; yaşam döngüsü değerlendirme çalışmaları için tasarlanmış kapsamlı bir açık kaynak yazılımdır (Pan & Teng, 2021). GreenDelta firması tarafından geliştirilmiş olan bu platform, malzemelerin ve süreçlerin çevresel performansını değerlendirme ve analiz etme imkanı sağlar. Örneğin, Rezaei ve arkadaşlarının (2019), yapmış olduğu bir çalışmada, OpenLCA yazılımı kullanılarak Kanada'nın Québec kentindeki bir konut binasında kullanılan malzemelerin metrajları BIM modeli ile ölçümlenerek çevresel etkileri değerlendirilmiştir (Rezaei vd., 2019). Bu ve benzeri çalışmalar, OpenLCA'nın çeşitli üretim süreçlerinin ve malzemelerin çevresel ayak izlerinin değerlendirilmesinde nasıl etkili bir araç olabileceğini göstermektedir. En geniş veri ağını sunan ECOinvent ve en yaygın yazılım olan OpenLCA bu sebeple çalışmada kullanılmak üzere seçilmiştir.

OpenLCA dışında da bir çok program alternatifi bulunmaktadır. Bu alternatifler bir malzemenin yada bir sürecin çevresel etki değerini farklı yöntemlerle ölçmektedir. Tümünün çalışma sınırları beşikten mezara şeklindedir. Veritabanı alternatifleri bu yazılımlar üzerinde çalıştırılır. OpenLCA yazılımı üzerinde ECOinvent veritabanının çalıştırıldığı durum Şekil 1.'de paylaşılmıştır.



Şekil 1. OpenLCA Programı ve ECOinvent Veritabanı

ECOinvent; inşaat sektöründe malzeme ve enerji akışlarının çevresel etkilerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan küresel bir veri tabanıdır. Bu veri tabanı, inşaat malzemelerinin üretimi, kullanımı ve atık olarak atılması ile ilişkili çevresel verileri sağlayarak, binaların ve diğer inşaat projelerinin yaşam döngüsü değerlendirmelerinin gerçekleştirilmesine olanak tanır. (Pan & Teng, 2021) Örneğin, Sanoop ve arkadaşlarının (2024), gerçekleştirdiği bir çalışmada, geri dönüştürülmüş atık malzemeleri kullanarak inşaa edilen branda kapama sisteminin sürdürülebilirliği, ECOinvent veri tabanından alınan malzeme, enerji akışları ve emisyon verileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışma, inşaat sektöründe sürdürülebilirlik analizlerinin ve karar verme süreçlerinin desteklenmesinde ECOinvent veri tabanının önemini vurgulamaktadır (Sanoop vd., 2024).

OpenLCA ve ECOinvent ile birlikte bir malzemenin yaşam döngüsü analizi online olarak yapılabilir. Analizin sonucunda yaşam döngüsünün tüm aşamaları hakkında bir çevresel etki değeri elde edilebilir. Yaşam döngüsü modülleri; üretim, uygulama, kullanım, yaşam sonu ve yeniden üretim olmak üzere 5 başlıktan ve bunlara bağlı alt kategorilerden oluşmaktadır. Üretim modülü; A1 (ham madde tedariki), A2 (üreticiye nakliye), A3 (üretim) olmak üzere 3 kategoriden oluşmaktadır. Uygulama modülü; A4 (inşaat alanına ulaşım), A5 (bina içine kurulum) kategorilerinden oluşmaktadır. Kullanım modülü; B1 (kullanım/uygulama), B2 (bakım), B3 (tadilat), B4 (değiştirme), B5 (yenileme), B6 (operasyonel enerji kullanımı), B7 (operasyonel su kullanımı) kategorilerinden oluşmaktadır. Yaşam sonu modülü; C1 (yapı sökülme/yıkım), C2 (EoL'ye ulaşım), C3 (yeniden kullanım için atık işleme), C4 (bertaraf) kategorilerinden oluşmaktadır. Yeniden üretim modülü ise tek bir kategori olan D (yeniden kullanım, geri kazanım veya dönüşüm potansiyeli) kategorisinden oluşmaktadır. Tablo 4.'te yaşam döngüsü analizi modülleri belirtilmiştir.

Yaşam döngüsü analizi yapılacak bir malzemenin çevresel etkileri bir çok farklı kategoride değerlendirilebilir. Bu kategorilerden bazıları; GWP (küresel Isınma potansiyeli; global warming potential), ODP (stratosferik ozon tabakasının tükenme potansiyeli; depletion potential of the stratospheric ozone layer), AP (arazi ve suyun asitleşme potansiyeli; acidification potential of land and water), EP (ötrofikasyon potansiyeli; eutrophication potential), POCP (troposferik ozon fotokimyasal oksidanların oluşum potansiyeli; formation potential of tropospheric ozone photochemical oxidants), ADPE (Fosil olmayan kaynaklar için abiyotik tükenme

potansiyeli; abiotic depletion potential for non-fossil resources), ADPF (fossil kaynaklar için abiyotik tükenme potansiyeli; abiotic depletion potential for fossil resources) şeklinde sıralanabilir. Bu çalışmada belirtilen etki kategorilerinin 3 tanesi seçilmiştir. Seçilen kategoriler GWP, ODP ve AP olup, bu etki kategorileri üzerinden ilerlenmiştir.

Üretim			Uygulama		Kullanım							Yaşam Sonu				Yeniden Üretim
Ham madde tedariki (çıkarma, işleme)	Üreticiye nakliye	Üretim	İnşaat alanına ulaşım	Bina içine kurulum	Kullanım / uygulama	Bakım	Tadilat	Değiştirme	Yenileme	Operasyonel enerji kullanımı	Operasyonel su kullanımı	Yapı söküm / yıkım	EoL'ye ulaşım	Yeniden kullanım için atık işleme	Bertaraf	Yeniden kullanım, geri kazanım veya geri dönüşüm potansiyeli
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

Tablo 4. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Modülleri

Bu bilgiler ışığında, bu çalışma için kullanılacak olan hesaplama yöntemi OpenLCA ve ECOinvent olarak belirlenmiştir. Çünkü OpenLCA ve ECOinvent, malzeme ve süreçlerin çevresel etkileri ile ilgili bilgilendirmeler sağlayarak, sürdürülebilir tasarım ve karar verme süreçlerinde önemli bir araç haline gelmiştir. İnşai yapılar, kentleşme ve modern yaşamın vazgeçilmez unsurları olmakla birlikte, doğal kaynakların tüketimi ve çevresel etkiler açısından önemli bir yere sahiptir. Yapı malzemelerinin üretimi, taşınması, kullanımı ve atık haline gelmesi sırasında oluşan enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları, iklim değişikliğine önemli etkilerde bulunmaktadır. OpenLCA ve ECOinvent gibi araçlar, bu etkilerin tespit edilmesi, azaltılması ve daha sürdürülebilir yapı malzemeleri ve tekniklerinin seçilmesi konusunda değerli bilgiler sunar (Shrestha, 2021).

Bir yapının tasarım aşamasında, malzeme seçiminden enerji verimliliğine kadar birçok önemli karar alınır. OpenLCA yazılımı ve ECOinvent veri tabanı kullanılarak yapılan YDA çalışmaları, çeşitli malzeme ve tekniklerin çevresel etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirerek, karbon ayak izi daha düşük, enerji verimliliği daha yüksek ve doğal kaynakları daha az tüketen seçeneklerin belirlenmesine yardımcı olur. Bu sayede, sürdürülebilir yapı tasarımı ve inşaatı için bilinçli kararlar alınabilir (Shrestha, 2021). Örneğin, beton ve çelik gibi geleneksel yapı malzemelerinin yanı sıra, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen ahşap veya bambu gibi malzemelerin kullanımı, karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir. OpenLCA yazılımı ve ECOinvent veri tabanı ile yapılan analizler, bu tür malzemelerin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini detaylı bir şekilde ortaya koyarak, daha yeşil ve sürdürülebilir bina tasarımlarının geliştirilmesine olanak tanır.

Ayrıca, enerji verimliliği yüksek binaların tasarımı, ısıtma, soğutma ve aydınlatma gibi alanlarda enerji tüketimini azaltarak, uzun vadede hem çevresel hem de ekonomik faydalar sağlar. OpenLCA ve ECOinvent ile yapılan YDA çalışmaları, farklı yalıtım malzemeleri, cam türleri ve enerji verimli sistemlerin çevresel etkilerini analiz ederek, enerji tüketimini en aza indiren ve sera gazı emisyonlarını azaltan çözümlerin belirlenmesine katkıda bulunur.

Sonuç olarak, OpenLCA yazılımı ve ECOinvent veri tabanı, yapıların tasarım ve inşaat aşamalarında sürdürülebilirlik kriterlerini entegre etmek için güçlü araçlar sunar. Bu araçlar, çevresel etkileri azaltmak, enerji verimliliğini artırmak ve doğal kaynakları korumak adına bilinçli malzeme ve teknik seçimleri yapılmasını sağlayarak, daha yeşil ve sürdürülebilir bir geleceğe katkıda bulunur.

2. AMAÇ

Sürdürülebilir havalimanlarının malzemeleri bakımından incelenmesi, yapının çevresel etkilerini ölçümlemek açısından önemlidir. Bu çalışmada yapı malzemelerinin çevresel etkilerini ölçümlemek için sürdürülebilir olduğu sertifikalanmış havalimanı yapılarında kullanılan yapı malzemelerinden seçilen üç örnek incelenmiştir. Yapı malzemeleri “Yaşam Döngüsü Analizi Yaklaşımları ve Araçları” bölümünde bahsedildiği üzere OpenLCA yazılımı ve ECOinvent veri tabanı

aracılığı üzerinden değerlendirilmiş, çevresel etkileri ölçümlenmiştir. Böylece yapılarda çevreye duyarlı malzemelerin tespiti yapılmıştır.

2.1. Sürdürülebilir Havalimanları Yapılarının İncelenmesi

Sürdürülebilir havalimanı inşaatı; çevre dostu yapı malzemelerinin kullanımı, uzun vadeli yapı ömrü planlaması ve iklim koşullarına uyum sağlama yeteneği gibi unsurları öne çıkarır. Bu tür havalimanları, karbon ayak izini minimize etmek, enerji verimliliğini maksimize etmek ve su tasarrufu sağlamak için yenilenebilir kaynaklardan elde edilen malzemelerin kullanımını teşvik eder. İnşaatta kullanılan malzemeler, sürdürülebilir orman yönetiminden elde edilen ahşap, geri dönüştürülmüş çelik ve düşük karbonlu beton gibi çevre üzerinde minimal etkiye sahip seçeneklerden oluşur. Ayrıca, yapının ömrü boyunca enerji tüketimini azaltacak şekilde tasarlanır ve iklim değişikliğine karşı dirençli olacak biçimde inşa edilir. Bu, havalimanının sıcaklık değişimleri, şiddetli hava olayları ve diğer çevresel stres faktörlerine karşı dayanıklılığını artırır. Sürdürülebilir havalimanı inşaatı, böylelikle hem çevresel etkiyi azaltmayı hem de uzun vadeli operasyonel verimliliği ve dayanıklılığı hedefleyen bir yaklaşımı temsil eder. (De Brito & Kurda, 2021)

Kono (2018), çalışmasında yapı malzemelerinin sürdürülebilir olması konusunda mevcut sürdürülebilirlik değerlendirme metodlarını temel almıştır. Çalışmasında; bölgesel koşullar ve bina işletmesi arasındaki sürdürülebilirlik bağlantısını göstermiştir. Çalışmasının sonucunda; projenin erken dönemlerinde rehberlik etmek için sürdürülebilirlik metodlarının malzeme seçimi konusunda yönlendirici olabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Kono, 2018).

Bocci (2014), çalışmasında İtaly Treviso Havaalanı pistinin yenilenmesinde kullanılan yenilikçi yaklaşımı ve malzeme geri dönüşümünü konu almaktadır. Çalışmasında, sürdürülebilirlik açısından çeşitli geri dönüşüm yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmasının sonucunda; geri dönüştürülmüş malzeme kullanımının, çevresel etkinin minimize edilmesi açısından başarılı bir örnek olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Bocci, 2014).

Güner (2017), çalışmasında yapılarda malzeme seçiminin, sürdürülebilir kalkınma modeli açısından incelenmesini konu alır. Ulusal ve uluslararası literatürde

yer alan çevreye duyarlı yapı örneklerini incelemiştir. Çalışmasının sonucunda görülmüştür ki; malzemelerin üretim sürecinden başlayarak kullanım sonu sürecine kadar çevre ile olan ilişkisi, enerji tasarrufundaki rolü ve yapının uygulandığı bölgeye aidiyetini sağlayan fiziksel ilişkisi, sürdürülebilir kalkınmanın gelişimine önemli katkılar sağlamaktadır (Güner, 2017).

Havalimanı yapılarında kullanılan malzemelerin çevresel etkilerini tespit edebilmek için öncelikli olarak havalimanı örneklerinin ve kullanılan malzemelerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, aşağıdaki tablolarda (Tablo 5.-8.) uluslararası alanda yeşil bina sertifikası edinmiş havalimanları ve bu havalimanlarına ait önemli bilgilendirmeler paylaşılmıştır. Bu bilgilendirmeler yapı ismi ile başlayarak, konum, iklim, inşaatın tamamlandığı yıl, sürdürülebilirlik sertifikası ve inşai yapı malzemelerini içermektedir. Yapılarda kullanılan malzemeler sonraki bölümlerde işlenecektir.

Havalimanları dünyanın her yerinden seçilmiş olup, tablo sıralamasına göre isimleri aşağıdaki şekildedir;

-İstanbul Havalimanı

-Shenzhen Bao'an Uluslararası Havalimanı

-San Francisco Havalimanı

-Adnan Menderes Havalimanı

-Jewel Changi Havalimanı

-Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı

-Heathrow Havalimanı

-Helsinki Vantaa Havalimanı

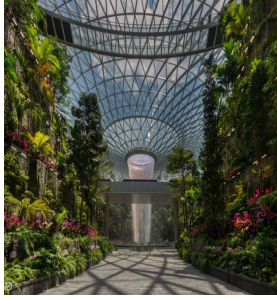
Tablo 5. Sürdürülebilir Havalimanı Yapıları (İstanbul, Shenzhen)

Çevre Duyarlı Yapı Örnekleri Künyesi	Görseli		1	2
	Adı		İstanbul Havalimanı	Shenzhen Bao'an Uluslararası Havalimanı
	Kullanım Tipi		Terminal Binası, Uluslararası Uçuşlar, Giden ve Gelen Yolcu Katı	Terminal Binası, Tüm Uçuşlar, Giden ve Gelen Yolcu Katı
	İnşaat Alanı (m2)		1.294.082 m2	500.000 m2
	Açılış		2018	2013
	Konum		Türkiye / İstanbul	Çin / Guandong / Shenzhen
	Bölgenin İklimi		Ilıman İklim	Muson İklimi
	Sürdürülebilirlik Sertifikası		LEED GOLD	LEED CERTIFIED
Yapıda Kullanıldığı Yere Göre Malzemeler	Strüktürel Malzemeler	Cephe	Çelik, Cam, Ahşap	Çelik, Cam
		Duvarlar	Beton, Tuğla	Çelik, Beton
		Kolon	Beton, Çelik	Çelik, Beton
		Kiriş	Beton, Çelik	Çelik
		Döşeme	Beton	Beton
		Çatı	Çelik	Çelik
	Detay Malzemeler	Zemin Kaplama	Granit, Mermer, Ahşap, Halı, Seramik	Seramik, Vinil, Ahşap
		Duvar Kaplama	Ahşap, Metal, Alçıpan, Cam	Metal, Cam, Ahşap
		Tavan	Çelik, Metal, Alçıpan, Ahşap	Çelik, Alçıpan

Tablo 6. Sürdürülebilir Havalimanı Yapıları (Californiya, İzmir)

Çevre Duyarlı Yapı Örnekleri Künyesi	Görseli			
			3	4
	Adı		San Francisco Havalimanı	Adnan Menderes Havalimanı
	Kullanım Tipi		Terminal Binası, Uluslararası Uçuşlar, Giden ve Gelen Yolcu Katı	Terminal Binası, İç Hat Uçuşlar, Giden ve Gelen Yolcu Katı
	İnşaat Alanı (m2)		55.747 m2	200.000 m2
	Açılış		2011	2014
	Konum		ABD / Californiya	Türkiye / İzmir
	Bölgenin İklimi		Akdeniz İklimi	Akdeniz İklimi
Yapıda Kullanıldığı Yere Göre Malzemeler	Strüktürel Malzemeler	Sürdürülebilirlik Sertifikası	LEED GOLD	LEED SILVER
		Cephe	Çelik, Metal, Cam	Çelik, Metal, Cam, Ahşap
		Duvarlar	Beton, Tuğla	Beton
		Kolon	Beton	Çelik
		Kiriş	Beton	Çelik
		Döşeme	Beton	Beton
		Çatı	Beton	Çelik, Cam
	Detay Malzemeler	Zemin Kaplama	Vinil, Seramik, Ahşap	Granit, Ahşap, Seramik
		Duvar Kaplama	Ahşap, Seramik, Alçıpan	Mermer, Cam, Alçıpan, Ahşap, Halı
		Tavan	Alçıpan	Çelik, Cam

Tablo 7. Sürdürülebilir Havalimanı Yapıları (Changi, Pekin)

Çevre Duyarlı Yapı Örnekleri Künyesi	Görseli			
			5	6
	Adı		Jewel Changi Havalimanı	Beijing Daxing Uluslararası Havalimanı
	Kullanım Tipi		Terminal Binası, Uluslararası Uçuşlar, Giden ve Gelen Yolcu Katı	Terminal Binası, Uluslararası Uçuşlar, Giden ve Gelen Yolcu Katı
	İnşaat Alanı (m2)		135.700 m2	700.000 m2
	Açılış		2019	2019
	Konum		Singapur / Changi	Çin / Pekin
	Bölgenin İklimi		Tropikal İklim	Muson İklimi
Yapıda Kullanıldığı Yere Göre Malzemeler	Sürdürülebilirlik Sertifikası		LEED CERTIFIED	LEED PRECERTIFIED PLATINUM
	Strüktürel Malzemeler	Cephe	Çelik, Cam	Çelik, Cam
		Duvarlar	Beton, Tuğla	Çelik
		Kolon	Beton	Çelik
		Kiriş	Beton	Çelik
		Döşeme	Beton	Beton
		Çatı	Çelik, Cam	Çelik, Cam
	Detay Malzemeler	Zemin Kaplama	Granit, Seramik, Doğal Taş, Ahşap	Granit, Doğal Taş, Ahşap, Halı, Seramik
		Duvar Kaplama	Doğal Taş, Alçıpan, Ahşap	Alçıpan, Cam, Ahşap
		Tavan	Çelik, Cam, Alçıpan	Metal, Cam

Tablo 8. Sürdürülebilir Havalimanı Yapıları (Londra, Vantaa)

Çevre Duyarlı Yapı Örnekleri Künyesi	Görseli			
		7	8	
	Adı	Heathrow Havalimanı - Terminal 2A	Helsinki - Vantaa Havalimanı - Terminal 2	
	Kullanım Tipi	Terminal Binası, Uluslararası Uçuşlar, Giden ve Gelen Yolcu Katı	Terminal Binası, Uluslararası Uçuşlar, Giden ve Gelen Yolcu Katı	
	İnşaat Alanı (m2)	56.000 m2	43.000 m2	
	Açılış	2014	2021	
	Konum	İngiltere / Londra	Finland / Vantaa	
	Bölgenin İklimi	Okyanus İklimi	Ilıman İklim	
Sürdürülebilirlik Sertifikası	BREEAM EXCELLENT	BREEAM EXCELLENT		
Yapıda Kullanıldığı Yere Göre Malzemeler	Strüktürel Malzemeler	Cephe	Çelik, Metal, Cam	Çelik, Metal, Cam, Ahşap, Plywood
		Duvarlar	Metal, Beton	Çelik, Beton
		Kolon	Çelik	Çelik
		Kiriş	Çelik	Çelik
		Döşeme	Beton, Çelik	Beton
		Çatı	Çelik, Cam	Çelik, Ahşap
	Detay Malzemeler	Zemin Kaplama	Seramik, Ahşap	Seramik, Ahşap
		Duvar Kaplama	Alçıpan, Cam, Ahşap	Ahşap, Plywood
		Tavan	Çelik, Metal, Cam	Ahşap, Plywood

2.2. Havalimanı Yapılarında Kullanılan İnşai Malzemelerin Tespiti

Sürdürülebilir havalimanlarında kullanılan yapı malzemelerinin belirlenmesi için Tablo 5.-8.'den faydalanılmıştır. Tablo 9., farklı iklim koşullarına sahip bölgelerde yer alan ve aynı kullanım amacı için tasarlanmış çevre dostu sekiz havalimanı yapısının malzemelerini göstermektedir. Tablo 9. incelendiğinde, (Tablo 5.-8. ile bağlantılı olacak şekilde) havalimanı numaralarını takiben, malzemelerin yapıda bulunduğu noktalar, kabul edilen adetler üzerinden tabloya eklenmiştir. Bu adetler tüm havalimanları için toplanarak bir toplam sayıya ulaşılmıştır. Buna göre en fazla kullanılan çelik, beton ve ahşap malzeme olarak kabul edilmiştir. Bu aşamanın akabinde beton, çelik ve ahşap için yaşam döngüsü analizi yapılmış ve malzemelerin çevresel etkileri hesaplanmıştır.

MALZEME LİSTESİ										
Sıra No.	Havalimanı No.	1.	2.	3	4	5	6	7	8	Toplam
	Malzeme									
1	Çelik	5	6	1	5	3	5	6	5	36
2	Cam	2	2	1	4	3	4	4	1	21
3	Beton	4	3	5	2	4	1	2	2	23
4	Tuğla	1	0	1	0	1	0	0	0	3
5	Granit	1	0	0	1	1	1	0	0	4
6	Mermer	1	0	0	1	0	0	0	0	2
7	Ahşap	4	2	2	3	2	2	2	5	22
8	Halı	1	0	0	1	0	1	0	0	3
9	Seramik	1	1	2	1	1	1	1	1	9
10	Metal	2	1	1	1	0	1	3	1	10
11	Alçıpan	2	1	2	1	2	1	1	0	10
12	Vinil	0	1	1	0	0	0	0	0	2
13	Doğal Taş	0	0	0	0	2	1	0	0	3
14	Plywood	0	0	0	0	0	0	0	3	3
	Toplam	24	17	16	20	19	18	19	18	151

Tablo 9. Belirlenen Sekiz Farklı Sürdürülebilir Havalimanında Kullanılan Bazı Malzemeler ve Kullanım Nokta Adetleri

Doğal çevreyi gelecek nesillere sağlıklı bir şekilde bırakabilmek için onu en az zararlar korumak sürdürülebilir kalkınmanın anahtarlarından biridir. İnşai projeler, yapı malzemelerinin üretimden geri dönüşüme kadar olan verimliliği ile bu sürece önemli bir katkı sağlamaktadır. İncelenen sekiz çevre dostu yapının malzeme seçimlerine dair çıkarımlar ve literatürde yapılan yaşam döngüsü analizi araştırmalarını entegre edecek şekilde bir sonraki bölümde değerlendirmeler yapılmıştır.

Plati (2019), çalışmasında inşaat malzemeleri stratejilerindeki sürdürülebilirlik faktörlerini uluslararası deneyim ve uygulamalar çerçevesinde konu edinmiştir. Çalışmasının sonucunda; malzemelerin sürdürülebilirlik anlamında önemli bir etken olduğu sonucuna varılmıştır (Plati, 2019).

3. YÖNTEM

Sürdürülebilir havalimanlarında kullanılan yapı malzemelerinin çevresel etkilerini görmek amacıyla kullanabileceğimiz program ve veritabanları “Yaşam Döngüsü Analizi Yaklaşımları ve Araçları” bölümünde tanıtılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde yöntem olarak kullanılan OpenLCA yazılımı ve ECOinvent veri tabanının çalışma sistemi anlatılmıştır.

OpenLCA, karmaşık YDA hesaplamalarını kolaylaştıran güçlü bir araçtır. OpenLCA'nın çalışma prensibi, genel olarak YDA metodolojisinin temel adımlarını takip eder. Bunlar sırası ile; hedef ve kapsam belirleme, yaşam döngüsü envanteri analizi, yaşam döngüsü etki değerlendirme raporu şeklindedir.

Hedef ve kapsam belirleme aşamasında; projenin sisteme tanıtımı yapılır. İncelenecek malzeme ve değerlendirilmesi beklenen çevresel etki birimleri belirlenir.

Yaşam döngüsü envanteri analizi aşamasında; verilerin sisteme girişi yapılır. Malzemenin yaşam döngüsü boyunca, ham madde çıkarımından son kullanımına ve atık yönetimine kadar olan tüm aşamaları için gerekli veriler burada karşımıza çıkar. Bu veriler envanter veri tabanına girdi olarak sağlanır. Bu çalışmada kullanılacak veri tabanı ECOinvent olacaktır.

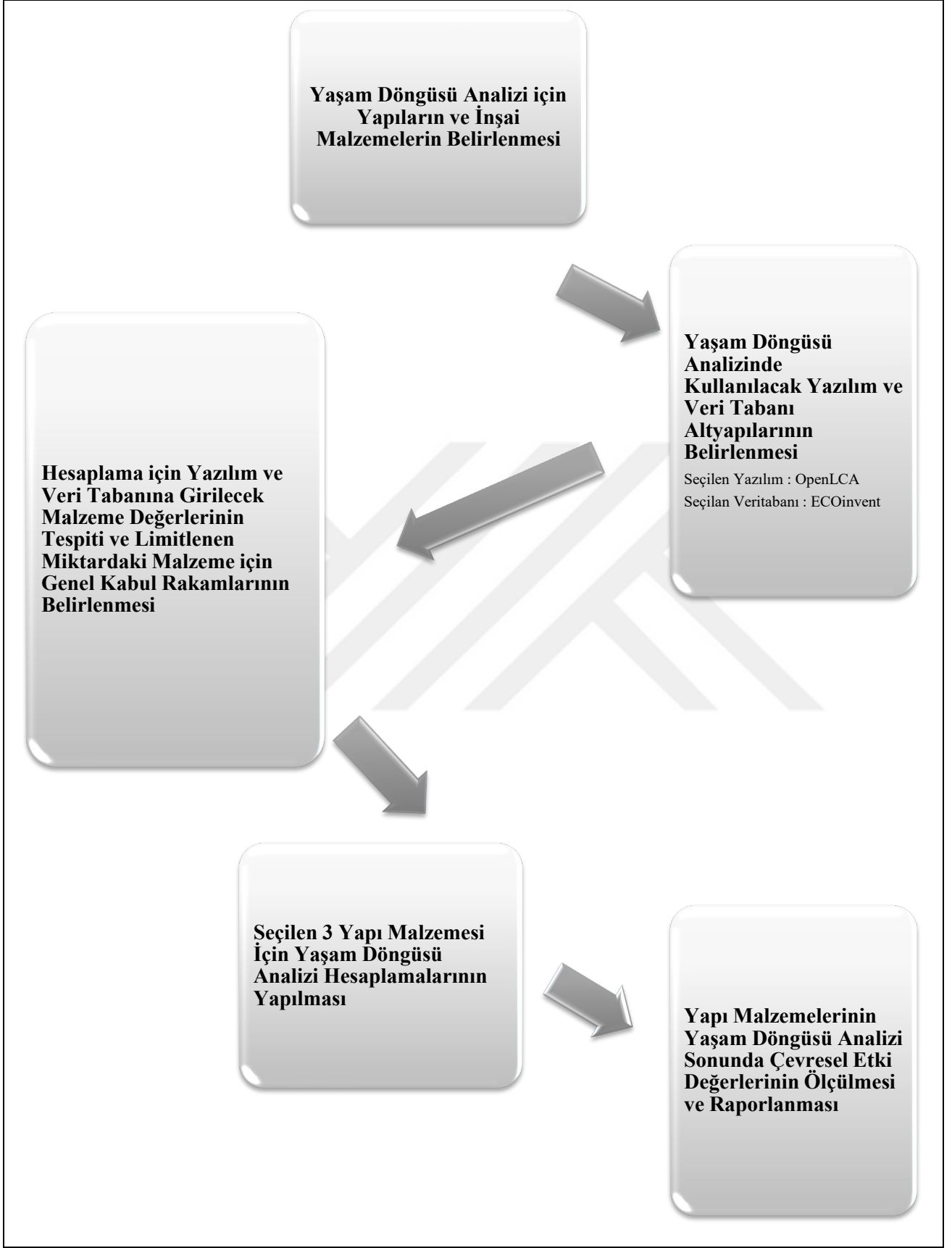
Yaşam döngüsü etki değerlendirme raporu aşamasında ise, küresel ısınma potansiyeli yada su kullanımı gibi etki kategorileri seçilir. OpenLCA yazılımı,

malzemelerin (beton, çelik, ahşap) çevresel etkilerini hesaplar. Sonuçta ise bu hesaplamanın sonucunu gösteren veriler bir tablo üzerinde raporlanır.

ECOinvent veri tabanı, ham madde çıkarımından son kullanım ve atık yönetimine kadar, bir malzemenin veya sürecin yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan enerji kullanımı, hava ve su emisyonları, atık oluşumu gibi çevresel yükleri içeren geniş bir veri seti sunar. Bu veriler, YDA analizlerinde kullanılmak üzere detaylı ve güvenilir bir temel oluşturur. Ayrıca; ECOinvent gibi kapsamlı bir veri tabanı kullanmak, kullanıcıların sıfırdan veri toplama ihtiyacını azaltır ve bu da zaman ve maliyet tasarrufu anlamına gelir. Ayrıca, veri tabanındaki verilerin uzmanlar tarafından toplanmış ve doğrulanmış olması, analizin güvenilirliğini artırır (Sanoop vd., 2024).

Malzemelerin yaşam döngüsü analizi hesaplamaları için yeşil bina sertifikalı sürdürülebilir havalimanı yapıları referans alınmıştır. Bu yapılarda yoğun olarak kullanılan üç malzeme, beton, çelik ve ahşap seçilmiştir. Çalışmanın bu noktasında malzemelerin yaşam döngüsü analizine geçilmiştir. Yöntemin daha detaylı olarak anlaşılabilmesi için bir sonraki sayfada bulunan Tablo 10.'da çalışmanın yol haritası paylaşılmaktadır.

Tablo 10.'a göre tüm adımlar sırası ve önemli detayları ile vurgulanmıştır. Sırası ile 5 adımdan oluşan tablonun adımları şöyledir; Yaşam Döngüsü Analizi için Yapılan ve İnşai Malzemelerin Belirlenmesi, Yaşam Döngüsü Analizinde Kullanılacak Yazılım ve Veritabanı Altyapılarının Belirlenmesi, Hesaplama için Yazılım ve Veri Tabanına Girilecek Malzeme Değerlerinin Tespiti ve Limitlenen Miktardaki Malzeme için Genel Kabul Rakamlarının Belirlenmesi, Seçilen 3 Yapı Malzemesi için Yaşam Döngüsü Analizi Hesaplamaların Yapılması, Yapı Malzemelerinin Yaşam Döngüsü Analizi Sonunda Çevresel Etki Değerlerinin Ölçülmesi ve Raporlanması.



Tablo 10. Yöntemin Yol Haritası

3.1. Beton Malzemesinin Yaşam Döngüsü Analizi

Beton üretimi, modern yapı sektörünün temel taşlarından biri olup, kapsamlı bir malzeme yaşam döngüsü analizi (YDA) gerektirir. Bu analiz, beton üretiminin çevresel ayak izini anlamak ve sürdürülebilirlik yönünden iyileştirmeler yapmak için kritik öneme sahiptir. Yelton (2004), çalışmasında Denver'in Stapleton Havalimanı'nın yenilenmesi sırasında sürdürülebilir malzeme olarak beton örneğini incelemiştir. Çalışmasında Colorado School of Mines tarafından yapılan laboratuvar test yöntemleri kullanılmıştır. Bunun sonucunda; betonun sürdürülebilir bir bina malzemesi olarak etiketlenmiştir (Yelton, 2004).

OpenLCA yazılımı ve EConvent veri tabanı beton ile ilgili; ham madde çıkarımından başlayarak, üretim tesisine getirilmesi ve son halini alana kadar detaylı bir şekilde incelenmesini sağlayan güçlü araçlar sunmaktadır. Bu araçlar, beton sektöründe çevresel etkileri azaltma potansiyelini ortaya çıkarmak ve daha yeşil, daha sürdürülebilir üretim yöntemleri geliştirmek için gereken bilgileri sağlar. Bu hesaplama ile, beton üretiminin çevresel etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmeyi ve bu süreçte ortaya çıkan emisyonları, enerji kullanımını ve doğal kaynak tüketimini azaltacak stratejileri belirlemek amaçlanmaktadır.

Programın malzemeye bağlı rakamsal girdileri genel kabuller üzerinden elde edilmiştir. Sonuçlar ISO 14025 ve EN15804 standartlarına göre belirlenen program ve veri tabanı ile gerçekleştirilmiş bir değerlendirme içermektedir. Çalışma Tablo 11.'de paylaşıldığı üzere, daha önce açıklanan yaşam döngüsü analizi modüllerinden beton malzeme için kullanılacak olan kategoriler seçilerek işaretlenmiştir. Buradaki YDA çalışmasının türü beşikten mezara şeklindedir. Sistem sınırı, ham maddenin çıkarılmasından, fabrika kapısında bitmiş paketlenmiş malzemenin teslimine ve son aşamada malzemenin geri dönüşüm aşamasına kadar (beşikten mezara) olan süreci kapsamaktadır. Ürün aşaması bilgi modülleri A1, A2, A3, A5 ve D dikkate alınmıştır. Bu modüller ham madde tedariki (A1), ham maddelerin üreticiye nakliyesi (A2), malzemenin üretimi (A3), bina içinde kullanım/kurulum (A5) ve malzemenin geri dönüşümü (D) süreçlerini içermektedir. Bu modüllerin beton malzemesinin yaşam döngüsünü en iyi ifade edecek aşamalar olduğu düşünülmüştür.

Üretim			Uygulama		Kullanım							Yaşam Sonu				Yeniden Üretim
Ham madde tedariki	Üreticiye nakliye	Üretim	İnşaat alanına ulaşım	Bina içine kurulum	Kullanım / uygulama	Bakım	Tadilat	Değiştirme	Yenileme	Operasyonel enerji kullanımı	Operasyonel su kullanımı	Yapı söküm / yıkım	EoL'ye ulaşım	Yeniden kullanım için atık işleme	Bertaraf	Yeniden kullanım, geri kazanım veya geri dönüşüm potansiyeli
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X

Tablo 11. Beton için YDA Değerlendirme Modülleri (X: Hesaplaması Yapılacak Modüller)

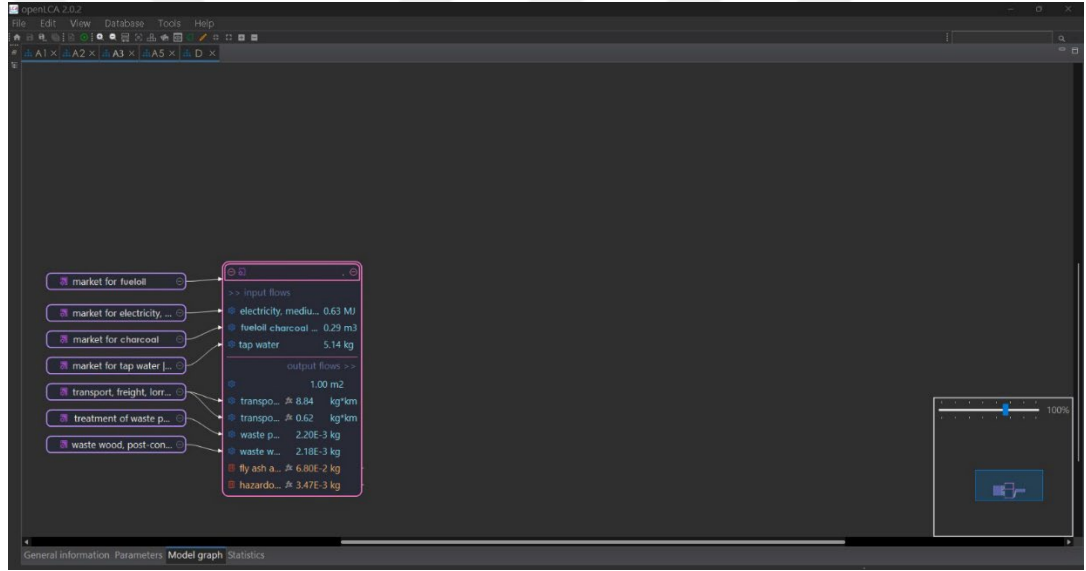
Üretim aşamasında beton malzemesinin hammadesi, ham maddenin kaynaktan çıkarılarak üretimhaneye nakliyesi ve üretimhanedeki üretim süreci detayları incelenmektedir. Örneğin; betonun ana ham maddeleri arasında çimento, kum ve çakıl gibi agregalar ile su bulunmaktadır. Çevresel performansı artırmak için uçucu kül ve geri dönüştürülmüş beton agregaları gibi ek malzemeler de kullanılabilir (Vieira vd., 2016).

Betonun yaşam döngüsü aşamaları için, ham madde dışındaki biricil enerji girdisi, elektriktir. Elektrik girdisi için veriler sayaçtan elde edilir. İkincil enerji girdileri kömür ve fuel oil olarak tanımlanmıştır. Kömür ve fuel oil verileri yakıt akış ölçerleri ile elde edilmiştir. YDA sürecinde kullanılan su, sahadaki yeraltı suyudur. Yeraltı suyu su sayacı ile ölçülmektedir. 1 ton beton malzemenin YDA süreci için OpenLCA programına girdisi yapılan miktarlar Tablo 12.'de gösterilmiştir.

Beton Malzeme için Girdiler		
Adı	Değeri	Miktarı
Elektrik	201,24	kWh
Kömür	94,107	kg
Yakıt (Fuel oil)	0,36	L
Yeraltı Suyu	110	m3

Tablo 12. Beton İçin Program Girdileri

Bu girdilerin sonucunda ECOinvent veritabanı, OpenLCA programına otomatik olarak hesaplama değerlerini sağlamaktadır. Program üzerindeki modelleme görüntüsü aşağıdaki Şekil 2.'de gösterilmiştir.



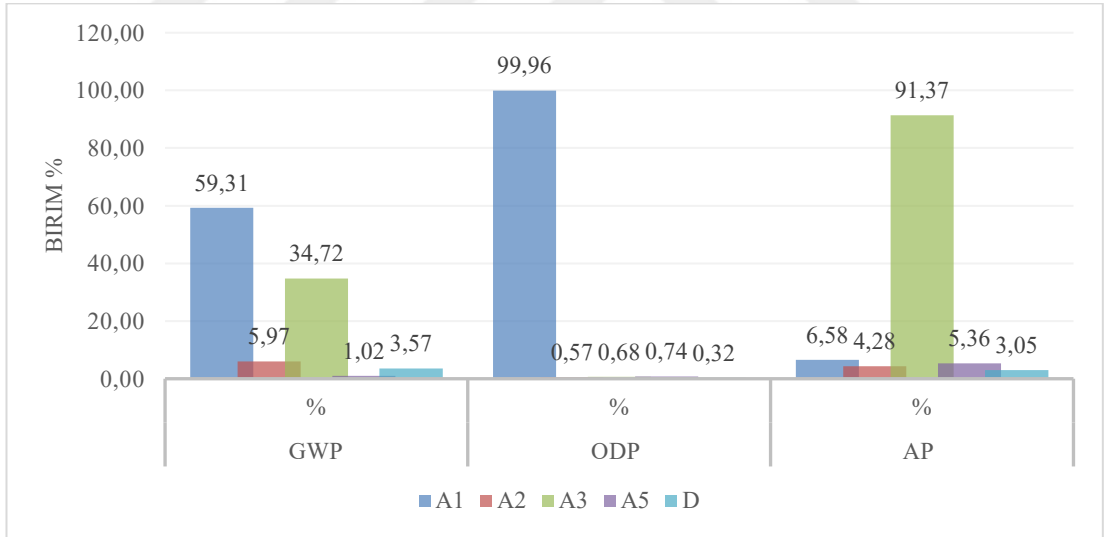
Şekil 2. OpenLCA ve ECOinvent Üzerinde Beton İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Analizi

Hesaplamalar sonucunda elde edilen YDA analizi sonuçları Tablo 13.'te rapora dönüştürülmüş olarak paylaşılmıştır.

Beton için Yaşam Döngüsü Analizi Sonuçları						
Parametre	Birim	A1	A2	A3	A5	D
		Ham madde Tedariği	Üreticiye Nakliye	Üretim	Bina İçine Kurulum	Geri Dönüşüm
GWP	[kg CO ₂ -Eq.]	3,37E+02	3,39E+01	1,97E+02	2,31E+00	2,31E+00
ODP	[kg CFC11-Eq.]	1,64E-06	2,41E-10	4,84E-10	7,76E-12	7,76E-12
AP	[kg SO ₂ -Eq.]	1,25E-01	3,90E-02	1,74E+00	8,75E-04	8,75E-04
GWP = Küresel Isınma (Global warming potential); ODP = Stratosferik ozon tabakasının tükenme potansiyeli (Depletion potential of the stratospheric ozone layer); AP = Arazi ve suyun asitleşme potansiyeli (Acidification potential of land and water)						

Tablo 13. Beton İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Analizi Sonuçları

Şekil 1.'de hesaplamalar sonucu ortaya çıkan değerler yine OpenLCA aracılığı ile yüzdesel bir grafik haline getirilmiştir. Grafik raporu Şekil 3.'de paylaşılmıştır.



Şekil 3. Beton İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Grafik Analizi

Sonuçlar sadece kabul edilen değerlere dayalı yaşam döngüsü etki kategorisi parametrelerinin miktarını içermektedir. Bu YDA çalışmasının kabul edilen üretim birimi 1 ton betondur. Çevresel etki değerleri grafik üzerinde incelendiğinde beton malzemesinin yaşam döngüsü sırasında çevreye en fazla etki ettiği noktalar tespit

edilmektedir. Buna göre GWP deęerleri incelendięinde; %59,31 ile A1 yani ham madde tedariki ařamasında çevresel etkinin en fazla olduęu, A5 yani bina içine kurulum ařamasında ise çevresel etkinin %1,02 ile en dūřuk olduęu tespit edilmiřtir. ODP deęerleri incelendięinde; %99,96 ile A1 yani ham madde tedariki ařamasında çevresel etkinin en fazla olduęu, ve dięer ařamalarda daha az etkilendięi tespit edilmiřtir. AP deęerlerinde ise; %91,37 oranla A3 yani üretim ařamasında çevresel etki deęerinin en fazla olduęu görülmektedir.

3.2. elik Malzemenin Yaşam Döngüsü Analizi

elik, inşaat ve imalat endüstrilerinde geniş çapta kullanılan, dayanıklılığı ve esnekliği ile bilinen bir malzemedir. Bu malzemenin üretimi ve kullanımı, enerji tüketimi ve karbon emisyonları gibi çevresel etkilere neden olmaktadır. Bu bağlamda, elik malzemenin yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan çevresel etkilerin detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. OpenLCA yazılımı ve ECOinvent veri tabanının entegrasyonu, malzemenin çevresel boyutunu derinlemesine analiz etmek için mükemmel bir platform sunar. Bu analiz, elik için enerji verimliliğinin artırılması, emisyonların azaltılması ve kaynak kullanımının optimizasyonu gibi sürdürülebilir uygulamaların belirlenmesine olanak tanır. Bu alışma, elik üretiminin çevresel performansını geliştirmek ve bu süreçte sürdürülebilirlik ilkelerini daha etkin bir şekilde entegre etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Yaşam döngüsü analizi için değerlendirme modüllerine girdisi yapılacak olan detaylar öncelikli olarak incelenmelidir. Üretim modülü (A1,A2,A3) için ön bilgiler şu şekildedir; elik borular öncelikle sıcak haddelenmiş rulo, kaynak tozu ve elik tel gibi ham maddelerden yapılmakta olup, ürünlerin ölçüleri, kullanım amacına ve talebe bağlı olarak farklı uzunluk, kalınlık ve çaplar arasında değişebilmektedir. Uygun genişlik ve kalınlıktaki sıcak haddelenmiş şeritler, kangal olarak sarılır ve boyuna kaynaklı elik boru üretimi için n malzeme olarak kullanılır. Isıtılan şerit kenarları preslenerek birbirine kaynaklanır, borular yuvarlatılır ve düzleştirilir. Boru dizisi daha sonra gerekli uzunlukta kesilir ve nihai ürün elik borudur. Bu çalışmada nihai ürün olan elik borunun yaşam döngüsü analizi incelenecektir.

Uygulama modülü olan A5 yani bina içine kurulum ile ilgili ön bilgilendirme ise şöyledir; önceden şekillendirilmiş çelik bileşenler, planlanan yapısal düzene göre bir araya getirilir ve kaynak, cıvatalama gibi yöntemlerle sabitlenir. Bu işlemler, binanın dayanıklılığı ve stabilitesi için kritik öneme sahiptir, bu yüzden büyük bir dikkat ve hassasiyet gerektirir. Yeniden üretim modülü olan D modülü ile ilgili ön bilgi; çelik boruların kullanım ömrü, ilgili yapısal tasarıma, kullanıma ve bakıma bağlı olduğudur.

Buradaki YDA çalışmasının türü malzemenin çoğu yaşam modüllerini inceleyebilmek adına beşikten mezara şeklindedir. Sistem sınırı, ham maddenin çıkarılmasından fabrika kapısında bitmiş ürünün teslimine ve ardından uygulanması akabinde geri dönüştürülmesi (beşikten mezara) olan süreci kapsamaktadır. Bu çalışmada, ürün aşaması bilgi modülleri A1, A2, A3, A5, D dikkate alınmıştır. Bu modüller ham madde tedariki (A1), ham maddelerin üreticiye nakliyesi (A2), malzemenin üretimi (A3), bina içinde kullanım/kurulum (A5) ve malzemenin geri dönüşümü (D) süreçlerini içermektedir. Bu modüllerin çelik malzemesinin yaşam döngüsünü en iyi ifade edecek aşamalar olduğu düşünülmüştür. Tablo 14.'te detaylı olarak YDA hesaplaması yapılacak modüller belirtilerek X ile işaretlenmiştir.

Üretim			Uygulama		Kullanım							Yaşam Sonu				Yeniden Üretim
Ham madde tedariki (çıkarma, işlemi)	Üreticiye nakliye	Üretim	İnşaat alanına ulaşım	Bina içine kurulum	Kullanım / uygulama	Bakım	Tadilat	Değiştirme	Yenileme	Operasyonel enerji kullanımı	Operasyonel su kullanımı	Yapı söktüm / yıkım	EoL'ye ulaşım	Yeniden kullanım için atık işleme	Bertaraf	Yeniden kullanım, geri kazanım veya geri dönüşüm potansiyeli
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X

Tablo 14. Çelik için Değerlendirme Modülleri (X: Hesaplaması Yapılacak Modüller)

Çıplak çelik boru üretiminde birincil enerji girdisi olarak elektrik, doğal gaz ve LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı) ve yeraltı suyu kullanılmaktadır. Üretim sahasında her birimin kendi enerji sayacı olduğundan enerji tüketimleri her birim için ayrı ayrı ölçülmektedir. Öte yandan, çelik boru üretimi sırasında ısınan ürünü soğutmak için su kullanılmaktadır. Bu su sistemde devirdaim halinde olduğundan su tüketimi sadece buharlaşmadan kaynaklanmaktadır. Su tüketimi, su sayaçları ile şebeke suyu ölçülerek tespit edilir.

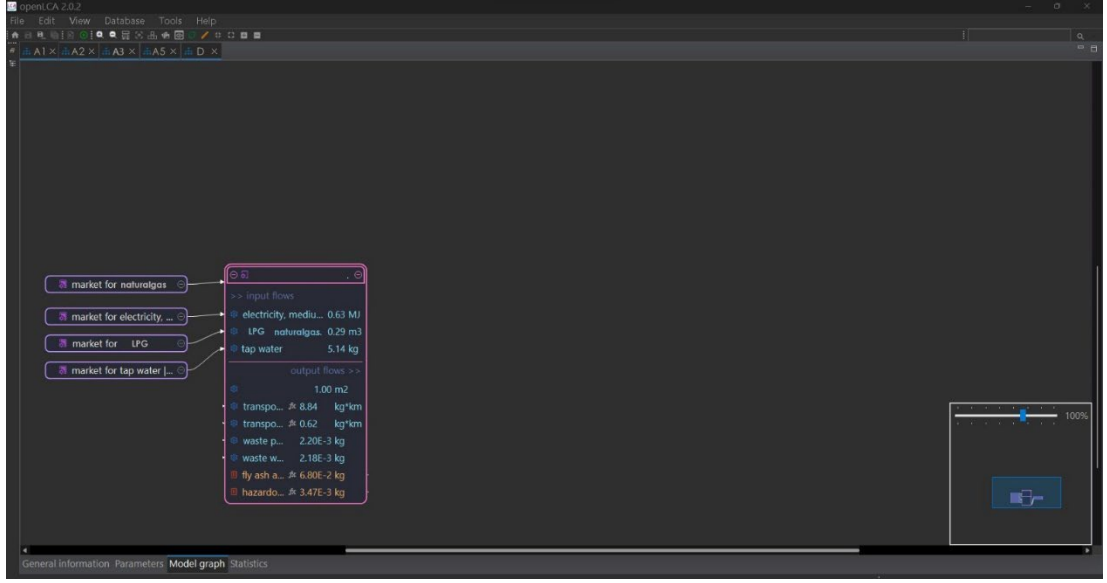
Tüm hesaplamalar genellemelere dayanan yıllık verilere göre yapılmıştır. Veriler ISO 14025 ve EN15804'e uygun olarak toplanmış ve standartlaştırılmış hesaplama prosedürü uygulanmıştır. 1 ton çelik için programa girdisi yapılan değerler Tablo 15.'te paylaşılmıştır.

Çelik Malzeme için Girdiler		
Adı	Değeri	Miktarı
Elektrik	20	kWh
Doğal Gaz	4,14	m ³
Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (LPG)	0,24	L
Yeraltı Suyu	3	m ³

Tablo 15. Çelik İçin Program Girdileri

Bu YDA çalışmasında, sonuçlar sadece kabul edilen birime dayalı yaşam döngüsü etki kategorisi parametrelerinin miktarını içermektedir. Bu YDA çalışmasının kabul edilen birimi 1 ton çelik borudur. Bu girdilerin sonucunda veri tabanının sağladığı değerler üzerinden program gerekli hesaplamaları gerçekleştirmekte ve rapora dönüştürmektedir.

Program üzerindeki modelleme görüntüsü aşağıdaki Şekil 4.'te gösterilmiştir.



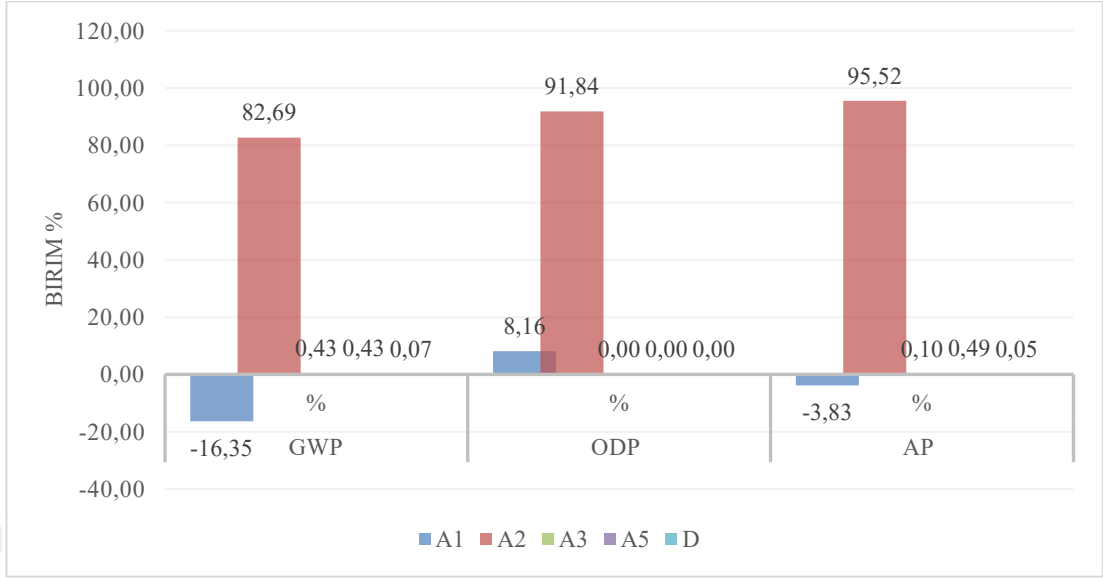
Şekil 4. OpenLCA ve ECOinvent Üzerinde Çelik İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Analizi

Hesaplamalar sonucunda elde edilen YDA analizi sonuçları Tablo 16.'da rapora dönüştürülmüş olarak paylaşılmıştır.

Çelik için Yaşam Döngüsü Analizi Sonuçları						
Parametre	Birim	A1	A2	A3	A5	D
		Ham madde Tedariği	Üreticiye Nakliye	Üretim	Bina İçine Kurulum	Geri Dönüşüm
GWP	[kg CO ₂ -Eq.]	2,92E+03	1,51E+01	1,52E+01	2,62E+00	-5,77E+02
ODP	[kg CFC11-Eq.]	2,07E-04	1,08E-10	1,17E-11	2,68E-11	1,84E-05
AP	[kg SO ₂ -Eq.]	3,43E+01	3,67E-02	1,76E-01	1,78E-02	-1,37E+00
GWP = Küresel Isınma (Global warming potential); ODP = Stratosferik ozon tabakasının tükenme potansiyeli (Depletion potential of the stratospheric ozone layer); AP = Arazi ve suyun asitleşme potansiyeli (Acidification potential of land and water)						

Tablo 16. Çelik İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Analizi Sonuçları

Tablo 16.'da hesaplamalar sonucu ortaya çıkan değerler yine OpenLCA aracılığı ile yüzdesel bir grafik haline getirilmiştir. Grafik raporu Şekil 5.'te paylaşılmıştır.



Şekil 5. Çelik İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Grafik Analizi

Ürün aşaması modülleri A1, A2, A3, A5 ve D incelendiğinde, üreticiye nakliye modülünün (A2) etkisinin tüm kategorilerde %80’den fazla olduğu görülmektedir.

Çevresel etki değerleri grafik üzerinde incelendiğinde çelik malzemesinin yaşam döngüsü sırasında çevreye en fazla etki ettiği noktalar tespit edilmektedir. Buna göre GWP değerleri incelendiğinde; %82,69 ile A2 yani üreticiye nakliye aşamasında çevresel etkinin en fazla olduğu, diğer yaşam modüllerinde ise çevresel etkinin %1’in altında olması sebebiyle çevresel etkisinin fazla olmadığı tespit edilmiştir. ODP değerleri incelendiğinde; %91,84 ile GWP’de olduğu gibi ODP’de de çevresel etkinin en fazla A2 yani üreticiye nakliye modülünde olduğu görülmüştür. AP değerleri incelendiğinde; diğer etki kategorilerinde olduğu gibi yine A2 modülünün en fazla çevresel etkisi olduğu görülmüştür.

3.3. Ahşap Malzemenin Yaşam Döngüsü Analizi

Ahşap, yenilenebilir bir kaynak olması ve karbon depolama kapasitesi ile çevre dostu bir yapı malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Yapı sektöründe, mobilya üretiminde ve birçok diğer alanda geniş bir kullanım alanına sahip olan ahşap,

sürdürülebilir orman yönetimi ve işlenmesi süreçleri ile çevresel etkileri minimize etme potansiyeline sahiptir (Asdrubali vd., 2017).

Bu kapsamda, ahşap malzemenin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin, karbon ayak izinin ve sürdürülebilirlik performansının detaylı bir şekilde analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır. OpenLCA yazılımı ve ECOinvent veri tabanı kullanılarak yapılacak olan malzeme yaşam döngüsü analizi (YDA), ahşabın çevresel boyutlarını aydınlatmayı hedeflemektedir. Bu analiz, ahşap malzemenin daha sürdürülebilir kullanımı için stratejilerin geliştirilmesine katkıda bulunarak, ahşabın çevresel avantajlarını maksimize etmeyi amaçlamaktadır.

Buradaki YDA çalışmasının türü beşikten mezara şeklindedir. Sistem sınırı, ham maddenin çıkarılmasından, geri dönüşüm aşamasına kadar olan modülleri kapsamaktadır. Bu çalışmada, ürün aşaması bilgi modülleri A1, A2, A3, A5 ve D dikkate alınmıştır. Bu modüller ham madde tedariki (A1), ham maddelerin üreticiye nakliyesi (A2), malzemenin üretimi (A3), bina içinde kullanım/kurulum (A5) ve malzemenin geri dönüşümü (D) süreçlerini içermektedir. Bu modüllerin ahşap malzemesinin yaşam döngüsünü en iyi ifade edecek aşamalar olduğu düşünülmüştür.

Tablo 17.'de detaylı olarak YDA hesaplaması yapılacak modüller belirtilmiş ve X ile işaretlenmiştir.

Üretim			Uygulama		Kullanım							Yaşam Sonu				Yeniden Üretim
Ham madde tedariki (çıkarma, işleme)	Üreticiye nakliye	Üretim	İnşaat alanına ulaşım	Bina içine kurulum	Kullanım / uygulama	Bakım	Tadilat	Değiştirme	Yenileme	Operasyonel enerji kullanımı	Operasyonel su kullanımı	Yapı söküm / yıkım	EoL'ye ulaşım	Yeniden kullanım için atık işleme	Bertaraf	Yeniden kullanım, geri kazanım veya geri dönüşüm potansiyeli
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X

Tablo 17. Ahşap için Değerlendirme Modülleri (X: Hesaplama Yapılacak Modüller)

A1-A3 Modülleri hem ham madde ve enerji kaynaklarının üretim ve tedarik zincirini hem de bunların tesise taşınmasını ve burada oluşan enerji giderlerini kapsamaktadır. Ahşap %50 selüloz, %23 hemiselüloz, %20 lignin ve %7 ekstraktifler olarak adlandırılan diğer organik bileşiklerden oluşur. Isıl işlem reçineyi, diğer ekstraktifleri ve bunlara bağlı OH (Hidroksil) gruplarını ahşaptan uzaklaştırır. Bu işlem ahşabın su emilimini azaltarak çürüme direncini artırırken şişme ve büzülmeyi azaltır. Ahşabın yüksek dayanıklılığına katkıda bulunan bir diğer faktör de selülozun kristalleşmesidir. Hemiselülozdaki değişim dayanıklılığı artırır. Hemiselüloz furfural ve karboksilik aside ayrılır. Ligninin ısıdan kaynaklanan karamelizasyonu daha koyu bir renkle sonuçlanır. (Asdrubali vd., 2017).

Uygulama aşamalarından bu çalışmaya yalnızca A5 (bina içine kurulum) dahil edilmiştir.

Geri dönüşüm modülü yani D ile ilgili, malzemenin kullanım ömrü sonunda geri dönüştürüldüğü kabul edilmiştir.

Verilerin tutarlılığı ve eksiksizliği için OpenLCA yazılımı ve ECOinvent veri tabanı kullanılmaktadır. Tüm girdi ve çıktı akışları, kullanılan malzemelerin türü, enerji tüketimi, nakliye ve atıklar kabullere dayanan birincil verilerdir.

Ahşap üretiminde enerji kaynağı olarak sadece elektrik kullanılmaktadır. Enerji tüketimleri her ünite için ayrı ayrı ölçülmekte olup, her ünitenin kendi enerji sayacı vardır. Öte yandan, ahşap üretimi sırasında ürünü şekillendirmek için su kullanılır. Su tüketimi, su sayaçları ile şebeke suyu ölçülerek tespit edilir.

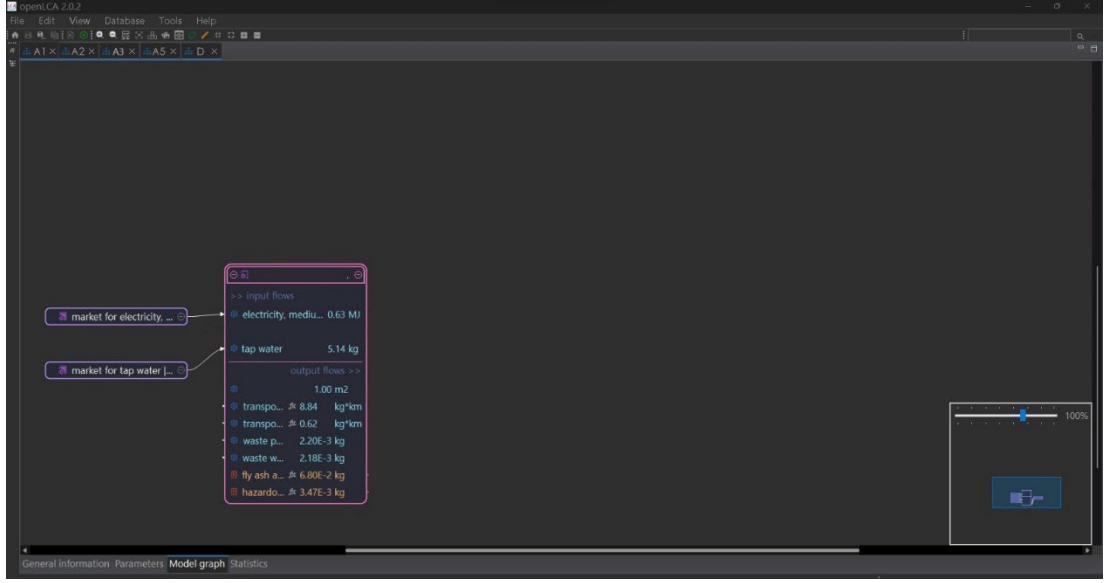
1 Ton ahşap üretimi için programa girdisi yapılan değerler Tablo 18.'de paylaşılmıştır.

Ahşap Malzeme için Girdiler		
Adı	Değeri	Miktarı
Elektrik	140	kWh
Su	0,6	m3

Tablo 18. Ahşap İçin Program Girdileri

Bu YDA çalışmasında, sonuçlar sadece kabul edilen birime dayalı yaşam döngüsü etki kategorisi parametrelerinin miktarını içermektedir. Bu girdilerin sonucunda veri tabanının sağladığı değerler üzerinden program gerekli hesaplamaları gerçekleştirmekte ve rapora dönüştürmektedir.

Program üzerindeki modelleme görüntüsü aşağıdaki Şekil 6.'da gösterilmiştir.



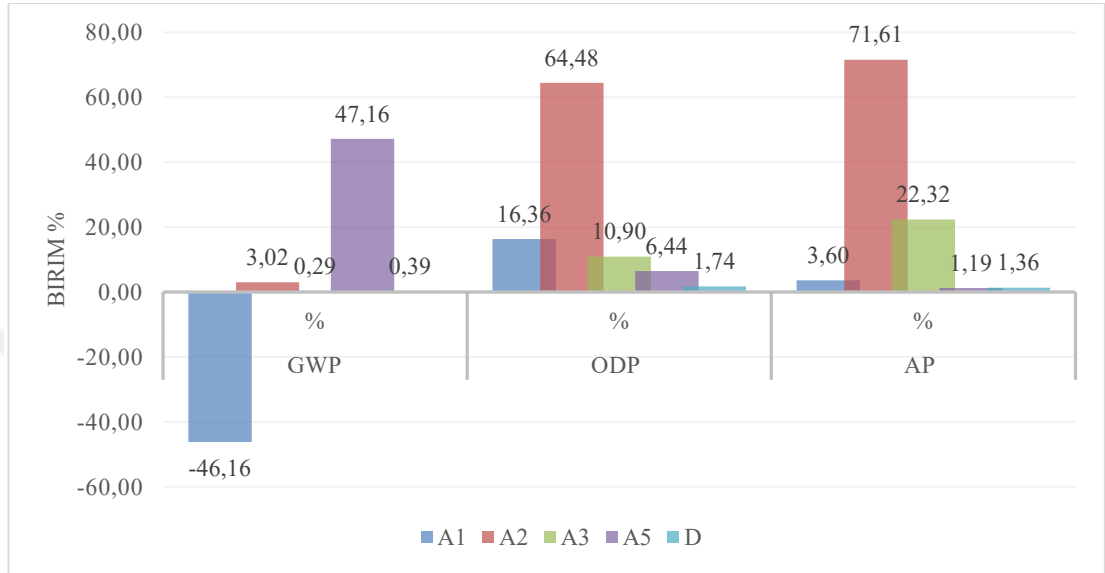
Şekil 6. OpenLCA ve ECOinvent Üzerinde Ahşap İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Analizi

Odunun sürdürülebilir şekilde yönetilen ormanlardan elde edilmesi önemlidir. Aşağıda bulunan Tablo 19., 1 m3 ahşabın yaşam döngüsü aşamalarından toplam küresel ısınma potansiyeline (GWP), ozon tüketim potansiyeline (ODP) ve asitleşme potansiyeline (AP) ait hesaplanan etkileri göstermektedir. Etki tahmini sonuçları göreceli ifadelerdir. Girdilerin sonucunda veri tabanının sağladığı değerler üzerinden program gerekli hesaplamaları gerçekleştirmekte ve rapora dönüştürmektedir.

Ahşap için Yaşam Döngüsü Analizi Sonuçları						
Parametre	Birim	A1	A2	A3	A5	D
		Ham madde Tedarigi	Üreticiye Nakliye	Üretim	Bina İçine Kurulum	Geri Dönüşüm
GWP	[kg CO2-Eq.]	-1.17E+03	7.63E+01	8.52E+01	0.00E+00	0,00E+00
ODP	[kg CFC11-Eq.]	3.22E-06	1.27E-05	2.17E-06	0.00E+00	0,00E+00
AP	[kg SO2-Eq.]	7.12E-02	1.42E+00	4.42E-01	0.00E+00	0,00E+00
GWP = Küresel Isınma (Global warming potential); ODP = Stratosferik ozon tabakasının tükenme potansiyeli (Depletion potential of the stratospheric ozone layer); AP = Arazi ve suyun asitleşme potansiyeli (Acidification potential of land and water)						

Tablo 19. Ahşap İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Analizi Sonuçları

Tablo 19.'da hesaplamalar sonucu ortaya çıkan değerler yine OpenLCA aracılığı ile yüzdesel bir grafik haline getirilmiştir. Grafik raporu Şekil 7.'de paylaşılmıştır.



Şekil 7. Ahşap İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirme Grafik Analizi

Hesaplanan sonuçlara göre çevresel etki öncelikli olarak A2 yani üreticiye nakliye modülünden kaynaklanmaktadır.

Çevresel etki değerleri grafik üzerinde incelendiğinde ahşap malzemesinin yaşam döngüsü sırasında çevreye en fazla etki ettiği noktalar tespit edilmektedir. Buna göre GWP değerleri incelendiğinde; %47,16 ile A5 yani bina içine kurulum aşamasında çevresel etkinin en fazla olduğu, diğer yaşam modüllerinde ise çevresel etkinin %1'in altında olması sebebiyle çevresel etkisinin fazla olmadığı tespit edilmiştir. ODP değerleri incelendiğinde; %64,48 ile çevresel etkinin en fazla A2 yani üreticiye nakliye modülünde olduğu görülmüştür. AP değerleri incelendiğinde; ODP etki kategorisinde olduğu gibi yine A2 modülünün en fazla çevresel etkisi olduğu görülmüştür.

4. BULGULAR

Yeşil bina sertifikalı havalimanlarında yapılan incelemeler sonucu seçilen beton, çelik ve ahşap malzemenin yaşam döngüsü değerlendirme analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda çıkan veriler çevresel etkileri görmemiz açısından yönlendirici olmuştur.

İnşaat sektörü, özellikle yapılarda kullanılan malzemeler aracılığıyla çevresel etkilere önemli ölçüde etkide bulunmaktadır. Bu çalışma, beton, çelik ve ahşap malzemelerin çevresel etki kategorilerinden seçilen GWP, ODP ve AP değerlerini, farklı yaşam döngüsü aşamaları açısından incelemektedir. Amaç, bu malzemelerin çevresel sonuçlarını açıklayarak sürdürülebilir inşaat uygulamaları için bilgi sağlamaktır.

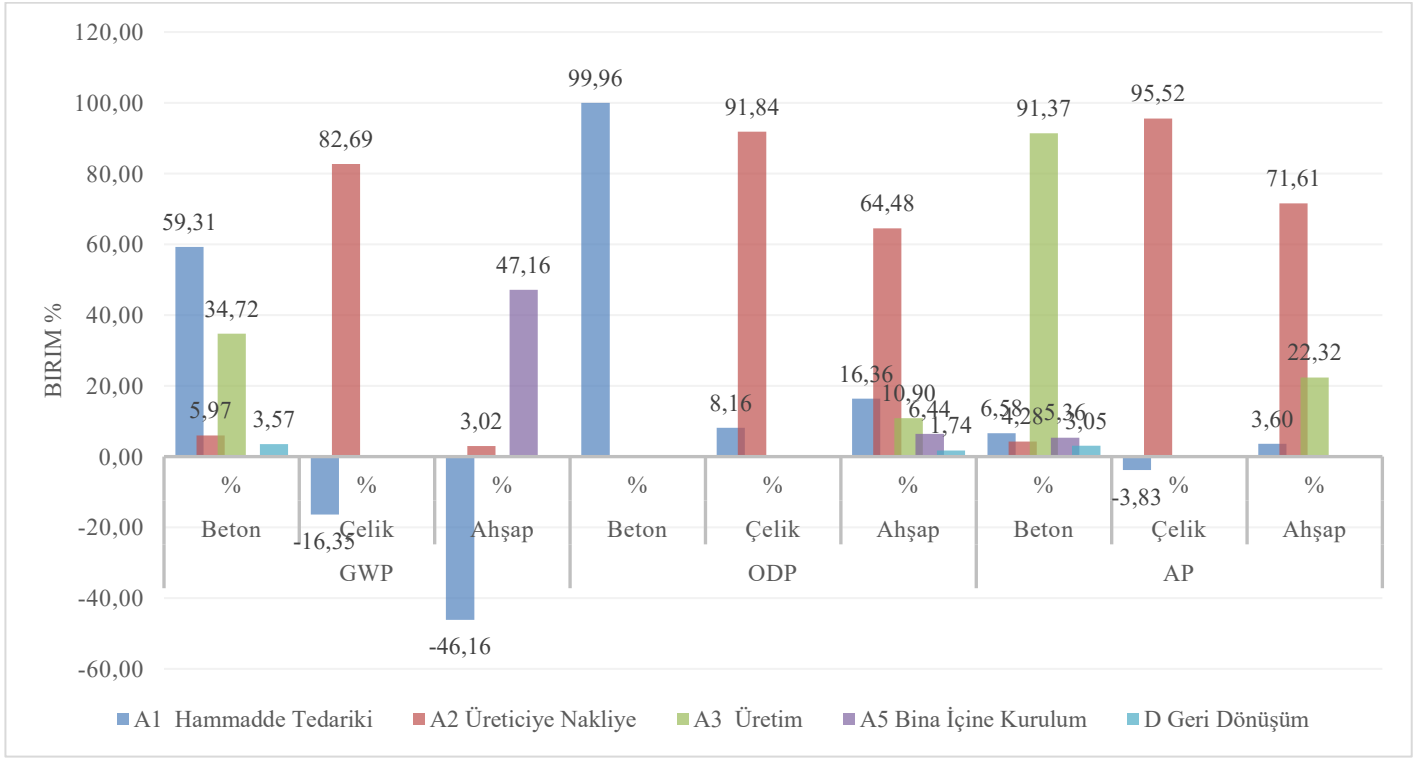
4.1. Çevresel Etki Kıyaslamaları Bulgularının Değerlendirilmesi

Bulgular beton, çelik ve ahşap malzemelerin GWP, ODP, AP değerlerine odaklanan yaşam döngüsü değerlendirmeleri (YDA) üzerine geniş bir literatür incelemesine ve önceki bölümlerde elde edilen yaşam döngüsü analizi verilerine dayanmaktadır. Bu kısımda, beton, çelik ve ahşap malzemelerinin tümünde ortak olarak hesaplaması yapılan değerler üzerine odaklanılmaktadır. Malzemelerin çevresel etkileri ve yaşam döngüsü fazları değerleri üzerinden ortaya çıkan bulgular paylaşılmıştır. Yaşam döngüsü fazları A1 (ham madde tedariği), A2 (üreticiye nakliye), A3 (üretim), A5 (bina içine kurulum) ve D (geri dönüşüm) olarak belirlenmiştir. Tablo 20.'de detaylı olarak değerler gösterilmiştir.

Parametre	Malzeme	Birim	A1	A2	A3	A5	D
			Ham madde Tedariği	Üreticiye Nakliye	Üretim	Bina İçine Kurulum	Geri Dönüşüm
GWP	Beton	[kg CO ₂ -Eq.]	3,37E+02	3,39E+01	1,97E+02	2,31E+00	2,31E+00
	Çelik	[kg CO ₂ -Eq.]	2,92E+03	1,51E+01	1,52E+01	2,62E+00	-5,77E+02
	Ahşap	[kg CO ₂ -Eq.]	-1.17E+03	7.63E+01	8.52E+01	0.00E+00	0,00E+00
ODP	Beton	[kg CO ₂ -Eq.]	1,64E-06	2,41E-10	4,84E-10	7,76E-12	7,76E-12
	Çelik	[kg CO ₂ -Eq.]	2,07E-04	1,08E-10	1,17E-11	2,68E-11	1,84E-05
	Ahşap	[kg CO ₂ -Eq.]	3.22E-06	1.27E-05	2.17E-06	0.00E+00	0,00E+00
AP	Beton	[kg CO ₂ -Eq.]	1,25E-01	3,90E-02	1,74E+00	8,75E-04	8,75E-04
	Çelik	[kg CO ₂ -Eq.]	3,43E+01	3,67E-02	1,76E-01	1,78E-02	-1,37E+00
	Ahşap	[kg CO ₂ -Eq.]	7.12E-02	1.42E+00	4.42E-01	0.00E+00	0,00E+00

Tablo 20. Seçilen Malzemelerin YDA Sonucundaki Çevresel Etki Değerleri (GWP,ODP,AP)

Tablo 20.'de hesaplamalar sonucu ortaya çıkan değerler yine OpenLCA aracılığı ile yüzdesel bir grafik haline getirilmiştir. Grafik raporu Şekil 8.'de paylaşılmıştır. Bu tablo üzerinde %1 ve altındaki değerler gösterilmemiştir.



Şekil 8. Seçilen Malzemelerin YDA Sonucundaki Çevresel Etki Değerleri

Beton; grafik değerleri incelendiğinde yaşam modülleri açısından değişken bir trend göstermektedir. GWP ve ODP etki kategorilerinde göze çarpan yüksek başlangıç değeri, ham maddelerin çıkarılması ve işlenmesi sırasında önemli etkileri işaret etmektedir. AP kategorisi en fazla A3 modülünde yani üretimde önemli ölçüde etkilenmiştir.

Çelik; YDA modülleri arasında A2 yani üreticiye nakliye modülünün yüksek etkisiyle tüm kategorilerde göze çarpmaktadır.

Ahşap; A1 aşamasında negatif bir GWP değeri göstererek çevresel etkisinin pozitif olduğunu göstermektedir. En yüksek GWP değeri %47,16 ile A5 (bina içine kurulum) modülündedir. ODP modülünde A2 (üreticiye nakliye) aşaması %91,84 ile

en yüksek çevresel etkiyi ifade etmektedir. AP kategorisinde ise %71,61 ile en yüksek çevresel etki yine A2 (üreticiye nakliye) modülünden kaynaklanmaktadır.

Bu karşılaştırmalı analiz, inşaat malzemelerinin çevresel etkilerini değerlendirirken bütünsel bir yaklaşımın gerekliliğini vurgulamaktadır. Ahşap, ilk aşamada pozitif bir etki sergilese de, taşıma ve üretim sırasında yaşanan artışlar YDA sonuçlarının karmaşıklığını ortaya koymaktadır. Beton ve çelik ile ilgili olarak, farklı yaşam döngüsü aşamaları boyunca değişen çevresel etkiler, dayanıklılık, geri dönüştürülebilirlik ve teknolojik ilerlemeler ile etkin lojistik aracılığıyla emisyonların azaltılması potansiyeli gibi hususlarla birlikte değerlendirilmenin önemini ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ

Yeşil bina sertifikası ile sürdürülebilir bir yapı olduğu resmileştirilmiş sekiz farklı havalimanı terminal yapısında kullanılan yapı malzemelerinden üç tanesi sistemsel olarak seçilerek bu çalışmada incelenmiştir. Birbirinden farklı iklim bölgelerinde bulunan bu sekiz farklı havalimanı inşaatında kullanılan malzemelerden ortak kullanılan üç malzeme tespit edilmiştir. OpenLCA programına seçilen malzemelerin kabul edilen değerleri girdi olarak sağlanmış ve ECOInvent veri tabanı kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar malzemelerin çevresel etkileri bakımından sürdürülebilirlik değerlerini ortaya koymaktadır. Böylece havalimanı yapıları için sürdürülebilir inşaat malzemelerinin ölçümü yapılmıştır. Araştırma sonucunda; malzemelerin yapıların sürdürülebilirliği açısından büyük bir potansiyel olduğu ve bu potansiyelin inşaatlarda etkili bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

Bu çalışmanın bulguları daha önce Kumanayake ve Luo'nun (2017) yılındaki çalışmasıyla sürdürülebilirlik anlamında paralellikler göstermektedir. Kumanayake ve Luo (2017), erken tasarım aşamasında binaların sürdürülebilirlik değerlendirme araçlarını incelemiştir. Benzer şekilde yöntem olarak SQL (Structured Query Language, yapılandırılmış sorgu dili) tabanlı yazılım ve ICE veri tabanı üzerinden ilerlemiştir. Çalışmasının sonucunda; karar vericilere çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından optimum bina malzeme kombinasyonunu seçmelerinde kolaylık sağlayabileceğine ulaşılmıştır (Kumanayake & Luo, 2017).

Sürdürülebilir havalimanı yapılarının tasarım ve inşaatında malzeme seçimi, çevresel sürdürülebilirliğin önemli bir boyutunu oluşturmaktadır. Beton, çelik ve ahşap malzemelerin çevresel etkilerinin ortalama değerleri, bu malzemelerin yaşam döngüsü boyunca çıkardıkları emisyonların bir ölçütünü sunmaktadır.

Yaşam modüllerine göre farklılık gösteren çevresel etki değerleri ortalama olarak incelendiğinde; beton malzemenin sürdürülebilir havalimanı yapılarında tercih edilebilecek nispeten yüksek etkiye sahip bir malzeme olduğu görülmektedir. Betonun dayanıklılığı ve yerel kullanıcılar tarafından olarak kolayca temin edilebilir olması, bu malzemenin yaygın olarak kullanılmasının nedenidir. Bu durum malzemenin çevresel etki potansiyelini artırabilir. İnşaat malzemeleri paylaşılan sekiz farklı havalimanından, beton malzemeyi en fazla kullanan San Francisco Havalimanı olarak tespit edilmiştir.

Çelik malzemenin çevresel etki değerleri incelendiğinde, oranların diğer iki malzeme olan beton ve ahşaba kıyasla orta seviyelerde yer aldığı görülmüştür. Çelik, yüksek mukavemeti ve geri dönüştürülebilirliği ile ön plana çıkmaktadır. Ancak üretim sürecindeki enerji yoğunluğu nedeniyle çevresel etkileri dengelenmektedir. İnşaat malzemeleri paylaşılan sekiz farklı havalimanından, çelik malzemeyi en fazla kullanan Heathrow Havalimanı olarak tespit edilmiştir.

Ahşap malzemenin çevresel etki değerlerine göre, incelenen malzemeler arasında en düşük değerlere sahiptir. Ancak, yenilenebilir bir kaynak olması ve geri dönüşüm kapasitesi nedeniyle, ahşabın sürdürülebilir havalimanı yapılarında dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. İnşaat malzemeleri paylaşılan sekiz farklı havalimanından, ahşap malzemeyi en fazla kullanan Helsinki Vantaa Havalimanı olarak tespit edilmiştir.

Çalışmanın limitlerinden bahsetmek gerekirse, burada seçilen havalimanı yapılarının yalnızca uluslararası geçerliliği olan sürdürülebilirlik sertifikalara sahip terminal binaları olmasına dikkat edilmiştir. Burada yaşam döngüsü analizi yapılan yapı malzemelerine ait çevresel etki değeri verileri 1 tonluk malzeme için kabul edilmiş değerlere dayalıdır. Müteakip araştırmacıların, seçilen malzemelerin kıyaslanabilir olmasına ve bu malzemeler için kabul olarak alınan değerlere dikkat etmesi gerekmektedir. Benzer çalışmalar için örneklem büyütülebilir, farklı yapı malzemeleri seçilebilir yada farklı bir program ve veri tabanı kombinasyonu

kullanılabilir. Bu çalışmada malzemelerin sadece çevresel etki boyutu göz önüne alınarak değerlendirme yapılmış olup; maliyet, malzeme ömrü, insan sağlığı kategorileri kapsam dışıdır.

Bu analiz, sürdürülebilir havalimanı yapılarında kullanılan malzemelerin seçiminde çevresel etkilerin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Her malzemenin avantajları ve dezavantajları, hem teknik özellikleri hem de çevresel etkileri açısından değerlendirilmelidir. Sürdürülebilirlik, yalnızca GWP, ODP, AP gibi kategori değerlerine dayanarak değil, aynı zamanda malzemenin maliyeti, insan sağlığına etkisi gibi daha geniş kriterler dikkate alınarak sağlanabilir. Sürdürülebilir havalimanı yapılarının tasarımı ve inşaatı, gelecek nesiller için çevresel açıdan daha az zararlı ve daha dayanıklı altyapılar yaratma hedefini taşımaktadır.

Bu değerlendirme, sürdürülebilir malzeme seçiminin önemini ve çevresel etkilerin karmaşıklığını ortaya koymaktadır. Malzeme seçiminde dengeli bir yaklaşım, sürdürülebilir havalimanı yapılarının çevresel ayak izini azaltma yolunda kritik bir adımdır.

6. KAYNAKLAR

- Abeyesundara, U. Y., Babel, S., & Gheewala, S. H. (2009). A matrix in life cycle perspective for selecting sustainable materials for buildings in Sri Lanka. *Building and Environment*, 44(5), 997–1004. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.005>
- Aghazadeh, E., & Yıldırım, H. (2021). Assessment the effective parameters influencing the sustainable materials selection in construction projects from the perspective of different stakeholders. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2443–2454. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.280>
- Akadiri, P. O., & Olomolaiye, P. (2012). Development of sustainable assessment criteria for building materials selection. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 19(6), 666–687. <https://doi.org/10.1108/09699981211277568>
- Akadiri, P. O., Olomolaiye, P., & Chinyio, E. (2013). Multi-criteria evaluation model for the selection of sustainable materials for building projects. *Automation in Construction*, 30, 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.004>
- Alkheder, S., Alkandari, D. R., & Alyatama, S. (2021). Sustainable assessment criteria for airport runway material selection: a fuzzy analytical hierarchy approach. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(8), 3091–3113. <https://doi.org/10.1108/ecam-01-2021-0052>
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
- Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., & Grazieschi, G. (2017). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building and Environment*, 114, 307–332. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>
- Awadh, O. (2017). Sustainability and green building rating systems: LEED, BREEAM, GSAS and Estidama critical analysis. *Journal of Building Engineering*, 11, 25–29. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.03.010>
- Basiago, A. D. (1995). Methods of defining ‘sustainability.’ *Sustainable Development*, 3(3), 109–119. <https://doi.org/10.1002/sd.3460030302>
- Bhatt, A., Bradford, A., & Abbassi, B. (2019). Cradle-to-grave life cycle assessment (LCA) of low-impact-development (LID) technologies in southern Ontario. *Journal of Environmental Management*, 231, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.033>
- Bocci, M., Manganaro, A., Stramazzo, V., & Grilli, A. (2013). Runway Pavement Reconstruction with Full Material Recycling: The Case of the Airport of Treviso. *Advanced Materials Research*, 723, 1044–1051. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.723.1044>

Bovea, M. D., Ibáñez-Forés, V., & Agustí-Juan, I. (2014). Environmental product declaration (EPD) labelling of construction and building materials. In Elsevier eBooks (pp. 125–150). <https://doi.org/10.1533/9780857097729.1.125>

Brundtland, 1987 Wikipedia contributors. (2024, February 28). Our common future. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Our_Common_Future

Butt, A. A., Harvey, J., Saboori, A., Ostovar, M., Bejarano, M., & Garg, N. (2020). Decision support in selecting airfield pavement design alternatives using life cycle assessment: Case study of nashville airport. *Sustainability*, 13(1), 299. <https://doi.org/10.3390/su13010299>

Carabano, R., Hernando, S., Ruíz, D. P., & Bedoya, C. (2017). Life Cycle Assessment (LCA) of building materials for the evaluation of building sustainability: the case of thermal insulation materials. *Revista De La Construcción*, 16(1), 22–33. <https://doi.org/10.7764/rdlc.16.1.22>

Champagne, C., & Aktaş, C. B. (2016). Assessing the resilience of LEED certified green buildings. *Procedia Engineering*, 145, 380–387. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.095>

Chau, C. K., Leung, T. M., & Ng, W. Y. (2015). A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings. *Applied energy*, 143, 395–413. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023>

De Brito, J., & Kurda, R. (2021). The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials. *Journal of Cleaner Production*, 281, 123558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123558>

De La Fuente, A., Blanco, A., Armengou, J., & Aguado, A. (2017b). Sustainability based-approach to determine the concrete type and reinforcement configuration of TBM tunnels linings. Case study: Extension line to Barcelona Airport T1. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 61, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.10.008>

Devaki, H., & Shanmugapriya, S. (2022). LCA on Construction and Demolition Waste Management Approaches: A review. *Materials Today: Proceedings*, 65, 764–770. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.286>

Ding, G. (2014). Life cycle assessment (LCA) of sustainable building materials: an overview. In Elsevier eBooks (pp. 38–62). <https://doi.org/10.1533/9780857097729.1.38>

Douglas, I. (2003). Airport construction: materials use and geomorphic change. *Journal of Air Transport Management*, 9(3), 177–185. [https://doi.org/10.1016/s0969-6997\(02\)00082-0](https://doi.org/10.1016/s0969-6997(02)00082-0)

Duru, M. O., Koç, İ. (2021). Sürdürülebilir Yapı Üretiminde Yaşam Döngüsü Değerlendirme (LCA) Hesaplamalarının Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) İle Entegrasyonuna Yönelik Bir Araştırma. *STAR Sanat Ve Tasarım Araştırmaları Dergisi*, 2(3), 107-121.

- Fazio, S., Garraín, D., Mathieux, F., De La Rúa, C., Recchioni, M., & Lechón, Y. (2015). Method applied to the background analysis of energy data to be considered for the European Reference Life Cycle Database (ELCD). *SpringerPlus*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40064-015-0914-x>
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J. B., Heijungs, R., Hellweg, S., Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Gökşen, F., Güner, C., & Koçhan, A. (2017). Sürdürülebilir Kalkınma İçin Ekolojik Yapı Tasarım Kriterleri. *Akademia Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Dergisi*, 3(1), 92-107.
- Greer, F., Rakas, J., & Horvath, A. (2020). Airports and environmental sustainability: a comprehensive review. *Environmental Research Letters*, 15(10), 103007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb42a>
- Güner, C., Gökşen, F., Koçhan, A. (2017). Sürdürülebilir Kalkınma Modeli için Çevre Duyarlı Yapılarda Malzeme Seçiminin İncelenmesi. *Akademia Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Dergisi*, 3(2), 1-14.
- Hafliger, I., John, V., Passer, A., Lasvaux, S., Hoxha, E., Saade, M. R. M., & Habert, G. (2017). Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials. *Journal of Cleaner Production*, 156, 805–816. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.052>
- Herrmann, I. T., & Moltesen, A. (2015). Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? – a comparative assessment of SimaPro and GaBi. *Journal of Cleaner Production*, 86, 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.004>
- Hill, M. (2001). Sustainability, greenhouse gas emissions and international operations management. *International Journal of Operations & Production Management*, 21(12), 1503–1520. <https://doi.org/10.1108/eum00000000006292>
- Hosseiniyou, S. A., Mansour, S., & Shirazi, M. A. (2014). Social life cycle assessment for material selection: a case study of building materials. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 620-645. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0658-1>
- Ilhan, B., & Yaman, H. (2016). Green building assessment tool (GBAT) for integrated BIM-based design decisions. *Automation in Construction*, 70, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.001>
- Jamshidi, A., Kurumisawa, K., Nawa, T., & Hamzah, M. O. (2015). Analysis of structural performance and sustainability of airport concrete pavements incorporating blast furnace slag. *Journal of Cleaner Production*, 90, 195–210. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.046>
- Kaçar, B., Turhan, E., Dalkıran, A., & Karakoç, T. H. (2022). Green Airport building certification comparison: a practical approach for Airport Management. *International Journal of Green Energy*, 20(6), 602–615. <https://doi.org/10.1080/15435075.2022.2076236>

- Kalakul, S., Malakul, P., Siemanond, K., & Gani, R. (2014). Integration of life cycle assessment software with tools for economic and sustainability analyses and process simulation for sustainable process design. *Journal of Cleaner Production*, 71, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.022>
- Khan, M. W., & Ali, Y. (2020). Sustainable construction. *Construction Innovation: Information, Process, Management*, 20(2), 191–207. <https://doi.org/10.1108/ci-05-2019-0040>
- Kono, J., Ostermeyer, Y., & Wallbaum, H. (2018). Investigation of regional conditions and sustainability indicators for sustainable product development of building materials. *Journal of Cleaner Production*, 196, 1356–1364. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.057>
- Kumanayake, R., & Luo, H. (2017). Development of an automated tool for buildings' sustainability assessment in early design stage. *Procedia Engineering*, 196, 903–910. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.023>
- Kurian, R., Kulkarni, K. S., Ramani, P. V., Meena, C. S., Kumar, A., & Cozzolino, R. (2021). Estimation of Carbon Footprint of Residential Building in Warm Humid Climate of India through BIM. *Energies*, 14(14), 4237. <https://doi.org/10.3390/en14144237>
- Kylili, A., Fokaides, P. A., Vaičiūnas, J., & Šeduikytė, L. (2016). Integration of Building Information Modelling (BIM) and Life Cycle Assessment (LCA) for sustainable constructions. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 13(4). <https://doi.org/10.5755/j01.sace.13.4.12862>
- Kyoto Protokolü, Wikipedia contributors. (2024b, April 1). Kyoto Protocol. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Kyoto_Protocol
- Lessard, Y., Anand, C., Blanchet, P., Frenette, C. D., & Amor, B. (2017). LEED v4: Where Are We Now? Critical Assessment through the LCA of an Office Building Using a Low Impact Energy Consumption Mix. *Journal of Industrial Ecology*, 22(5), 1105–1116. <https://doi.org/10.1111/jiec.12647>
- Martínez-Rocamora, A., Solís-Guzmán, J., & Marrero, M. (2016). LCA databases focused on construction materials: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 58, 565–573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.243>
- Mattinzioli, T., Sol-Sánchez, M., Martínez, G., & Rubio-Gámez, M. (2020). A critical review of roadway sustainable rating systems. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102447. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102447>
- Müftüoğlu, O. (2017). Sürdürülebilir Amaçlı İnşaat Projelerinin Temel Katılımcılarının Sürdürülebilirlik ile İlgili Görev ve Sorumlulukları. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Oğuz, C. Z. Yapı malzemesi yaşam döngüsü değerlendirmesi-envanter analizi üzerine bir model (Doctoral dissertation, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).

- Pan, W., & Teng, Y. (2021). A systematic investigation into the methodological variables of embodied carbon assessment of buildings. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 141, 110840. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110840>
- Passchier, W., Knottnerus, A., Albering, H., & Walda, I. (2000). Public health impact of large airports. *Reviews on environmental health*, 15(1-2), 83-96. <https://doi.org/10.1515/REVEH.2000.15.1-2.83>
- Pauer, E., Wohner, B., & Tacker, M. (2020). The influence of database selection on environmental impact results. Life cycle assessment of packaging using GABI, EcoInvent 3.6, and the Environmental Footprint Database. *Sustainability*, 12(23), 9948. <https://doi.org/10.3390/su12239948>
- Plati, C. (2019). Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. *Construction and Building Materials*, 211, 539–555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.242>
- Rezaei, F., Bulle, C., & Lesage, P. (2019). Integrating building information modeling and life cycle assessment in the early and detailed building design stages. *Building and Environment*, 153, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.034>
- Sabapathy, A., Ragavan, S., Vijendra, M., & Nataraja, A. G. (2010b). Energy efficiency benchmarks and the performance of LEED rated buildings for Information Technology facilities in Bangalore, India. *Energy and Buildings*, 42(11), 2206–2212. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.014>
- Sanoop, G., Cyrus, S., & Madhu, G. (2024). Sustainability Analysis of landfill cover system constructed using recycled waste materials by life cycle assessment. *Nature, Environment and Pollution Technology*, 23(1), 409–417. <https://doi.org/10.46488/nept.2024.v23i01.035>
- Shrestha, J. K. (2021). Assessment of energy demand and greenhouse gas emissions in low rise building systems: Case study of five building systems built after the Gorkha Earthquake in Nepal. *Journal of Building Engineering*, 34, 101831. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101831>
- Stoppel, C. M., & Leite, F. (2013). Evaluating building energy model performance of LEED buildings: Identifying potential sources of error through aggregate analysis. *Energy and Buildings*, 65, 185–196. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.016>
- Takano, A., Pal, S. K., Kuittinen, M., Alanne, K., Hughes, M., & Winter, S. (2015). The effect of material selection on life cycle energy balance: A case study on a hypothetical building model in Finland. *Building and Environment*, 89, 192-202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.001>
- Tufan, M. Z., & Özel, C. (2018). Sürdürülebilirlik Kavramı ve Yapı Malzemeleri İçin Sürdürülebilirlik Kriterleri. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik Ve Teknoloji Dergisi*, 2(1), 6-13.
- Wang, H., Thakkar, C., Chen, X., & Murrel, S. (2016). Life-cycle assessment of airport pavement design alternatives for energy and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 133, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.090>

- Waris, M., Liew, M. S., Khamidi, M. F., & Idrus, A. (2014). Criteria for the selection of sustainable onsite construction equipment. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 96–110. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2014.06.002>
- Wu, P., Song, Y., Shou, W., Chi, H., Chong, H., & Sutrisna, M. (2017). A comprehensive analysis of the credits obtained by LEED 2009 certified green buildings. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 68, 370–379. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.007>
- Vieira, D. R., Calmon, J. L., & Coelho, F. Z. (2016). Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. *Construction & Building Materials*, 124, 656–666. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125>
- Xie, F., Zhang, J., Wu, G., Zhang, C., & Wang, H. (2023). The environmental sustainability study of an airport building system based on an integrated LCA-Embodied Energy (Emergy)-ANN analysis. *Sustainability*, 15(9), 7626. <https://doi.org/10.3390/su15097626>
- Yang, R., & Al-Qadi, I. L. (2017). Development of a Life-Cycle Assessment Tool to quantify the environmental impacts of airport pavement construction. *Transportation Research Record*, 2603(1), 89–97. <https://doi.org/10.3141/2603-09>
- Yelton, R. (2004). Concrete recycling takes off: The renewal of Denver's Stapleton Airport showcases concrete's place as a sustainable material. *Concr. Producer*, 22, 28-31.
- Zari, M. P. (2019). Ecosystem services impacts as part of building materials selection criteria. *Materials Today Sustainability*, 3–4, 100010. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100010>