



SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPI ÜRETİMİNDE YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRME (LCA) HESAPLAMALARININ YAPI BİLGİ MODELLEMESİ (BIM) İLE ENTEGRASYONUNA YÖNELİK BİR ARAŞTIRMA*

A RESEARCH ON THE INTEGRATION OF LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) CALCULATIONS WITH
BUILDING INFORMATION MODELING (BIM) IN SUSTAINABLE BUILDING PRODUCTION

Mehmet Oğuz DURU, İlhan KOÇ

Gönderim Tarihi: 16.10.2021

Kabul Tarihi: 30.11.2021

Öz Abstract

Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA-life cycle assessment) hammaddelerin çıkarılması, işlenmesi, yapı bileşenlerinin üretimi, yapıların kullanımı ve kullanım ömrü sonuna kadar yapıların bütün yaşam döngüsünü kapsayan bir çevresel etki tahmin yöntemidir. Yapı sektöründe LCA hesaplaması oldukça fazla bilgi gerektirmesi ve mevcut olan yöntemlerin zaman alıcı metodolojisi nedeniyle karmaşık bir yapıya sahiptir. Özellikle yapı malzemelerinin metraj listelerinin oluşturulması ve LCA hesaplamasının esas alındığı veri tabanından doğru veri kümelerinin bulunması çok büyük zaman ve çaba ihtiyacına neden olmaktadır. Günümüzde dünya çapında büyük ilgi gören, devamlı gelişen bir teknoloji olan Yapı Bilgi Modellemesine (BIM-Building Information Modelling) dayalı dijital araçlar, LCA hesaplamaları için gerekli olan çabayı azaltma ve süreci oldukça hızlandırma potansiyeli taşımaktadır. Kapsamlı literatür analizi yöntemine dayanan bu çalışmanın amacı; geleneksel olarak elle yapılan yoğun LCA analizleri hesaplaması yerine, LCA sürecini basitleştiren, girdi verilerinin azaltılmasına yardımcı olan ve sınırlı bilgi düzeyine sahip tasarımcılar için sonuçların yorumlanmasını kolaylaştıran bir entegrasyona yönelik, uluslararası literatürde yayımlanan kuramsal yaklaşımları, kapsamlı olarak analiz etmektir.

Anahtar Sözcükler: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA), Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), Bütünlük Tasarım, Sürdürülebilirlik, Çevresel Etki

Life cycle assessment (LCA) is an environmental impact estimation method that covers the entire life cycle of constructions from raw material extraction, processing, production of building components, use of buildings and end of their lives. Calculation of LCA in the construction sector has a complex structure since it requires a lot of knowledge and the time-consuming methodology of the existing methods. In particular, creating the bill of quantities for building materials and finding the right datasets from the database on which the LCA calculation is based, require a great deal of time and effort. Digital tools based on Building Information Modeling (BIM-building information modelling), as an emerging technology that attracts worldwide attention today, have the potential to reduce the effort required by LCA calculations and accelerate the process considerably. The aim of this study based on the comprehensive literature analysis method, is to analyze the theoretical approaches published in the international literature, comprehensively, for an integration that simplifies the LCA process, helps to reduce the input data and facilitates the interpretation of the results for designers with limited knowledge, instead of the traditional manual computational LCA analysis as analysis.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA), Building Information Modeling (BIM), Integrated Design, Sustainability, Environmental Impact

*Bu çalışma, 21-22 Haziran 2021 tarihleri arasında gerçekleştirilen Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Uluslararası Sanat ve Tasarım Araştırmaları Kongresi çerçevesinde bildiri olarak sunulmuştur ve birinci yazarın ikinci yazar danışmanlığında hazırladığı doktora tezinden üretilmiştir.

- **Alıntılama:** Duru, M.O ve Koç, İ. (2021). Sürdürülebilir Yapı Üretiminde Yaşam Döngüsü Değerlendirme (LCA) Hesaplamalarının Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ile Entegrasyonuna Yönelik Bir Araştırma. STAR - Sanat ve Tasarım Araştırmaları Dergisi, 2(3), 107-121.
- **Sorumlu Yazar:** Arş. Gör. Mehmet Oğuz DURU, Konya Teknik Üniversitesi, moduru@ktun.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-0583-0439.

Giriş

Özellikle son yirmi yıl içerisinde, atmosferde ciddi karbon salınımına neden olan insan kaynaklı faaliyetler, küresel iklim değişikliklerine yol açmıştır. Fiziki çevreyi oluşturan yapılar, inşa edilme (construction), işletilme (operation) ve yaşam sonu (end-of-life) aşamaları içerisinde, küresel karbon emisyonuna önemli düzeyde etki etmektedir. Dolayısıyla, yapıların çevresel etkilerinin (environmental impacts) bilinmesine yönelik çalışmalar, küresel iklim değişikliği bağlamında, kritik öneme sahiptir. 1990'lardan itibaren, ürün ve hizmetlerin çevresel etkilerini değerlendirmek için uygun ve temel bir metodoloji olarak kabul edilen Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA-life cycle assessment), yapı, yapı malzemeleri ve diğer pek çok endüstriyel ürünün çevresel etki analizinde kullanılmaktadır. Yapı proje verilerinin 3 boyutlu (3-Dimensional) bir şekilde dijital olarak oluşturulduğu ve yönetildiği bir süreç olan Yapı Bilgi Modellemesi (BIM-building information modelling), yapının kavramsal tasarımından yıkımına kadar tüm yaşam döngüsü içinde koordinasyonunu sağlamaktadır. Uluslararası literatürde, BIM araçlarının gelişimiyle birlikte çok sayıda bilimsel çalışmada, LCA metodolojisiyle BIM modeli arasında entegrasyonun önemi vurgulanmıştır. Bu çalışmada, uluslararası literatürde, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) metodolojisinin, yapı bilgi modellemesi (BIM) olgusuyla birleştirilmesine yönelik izlenen süreçlerin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, LCA-BIM entegrasyonunun gerekliliğini vurgulayabilmek için LCA ve BIM kavramları analiz edilmiş, daha sonra ise entegrasyona yönelik yaklaşımlar ele alınmıştır. Bu çalışmada, ayrıca, ülkemiz özelinde fiziki çevrenin oluşumuna yönelik, çevresel etkileri önceleyen çok boyutlu (multi-dimensional) yaklaşımların benimsenmesine bir farkındalık oluşturulması hedeflenmiştir.

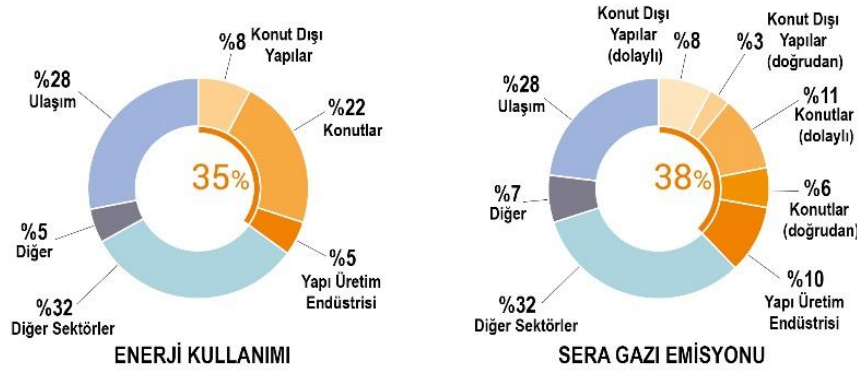
Yöntem

Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) hesaplarının ve Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ile entegrasyonuna yönelik bir araştırma olan bu çalışmada, uluslararası literatür detaylı olarak analiz edilmiştir. Özellikle son on yıl içinde gerçekleştirilen birçok bilimsel çalışmanın analizi ile elde edilen veriler, çalışma amaç ve kapsamına uygun olacak biçimde, sentezlenmiştir. Literatür taramasının temel yöntem olarak seçildiği bu çalışmada veriler, ayrıca mukayeseli analiz metodolojisi yardımı ile de irdelenmiştir.

Bulgular ve Tartışma

Küresel olarak gerçekleştirilen çevresel istatistikler ve ölçümler, insan faaliyetleri kaynaklı iklim değişikliği etkisinin, günümüzün çözülmeyi bekleyen en önemli sorunu haline geldiğini belirtmektedir. Bütün sektörlerin, iklim değişikliğinin geri dönüşü olmayan sonuçlarıyla mücadele edebilmesi ve kontrol altına alabilmesi için ürün ve hizmetleriyle ilgili sera gazı emisyonlarını azaltması gerekmektedir. Birleşmiş Milletler tarafından hazırlanan çevre raporlarına göre küresel enerji tüketiminde yaklaşık %35'lik paya sahip olan yapı sektörü, malzeme üretimi, yapım, işletme, bakım ve yıkım gibi farklı yaşam döngüsü aşamalarında önemli miktarda enerji tüketerek, küresel çapta salınan sera gazlarının yaklaşık %38'inden sorumlu tutulmaktadır (Görsel 1) (UNEP, 2020) Dolayısıyla bu durum iklim değişikliğinin

hızlanmasına oldukça fazla etki etmektedir. Nüfus artışına bağlı olarak artan yeni yapı üretimi ve mevcut yapıların düşük enerji verimliliği, iklim değişikliğini daha da kötüleştirmektedir.



Görsel 1. Yapı sektörünün enerji kullanımı ve sera gazı emisyonu durumu (UNEP, 2020).

Birçok bilimsel çalışmada, ülkelerin yeni ve mevcut yapıları düzenleyen yönetim politikalarında değişikliğe gidilmemesi durumunda, yapı sektörü kaynaklı sera gazı emisyonlarının önümüzdeki 20 yıl içinde yaklaşık olarak iki katına çıkacağı ön görülmektedir (Rezaei, Bulle, & Lesage, 2019).

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) Kavramı

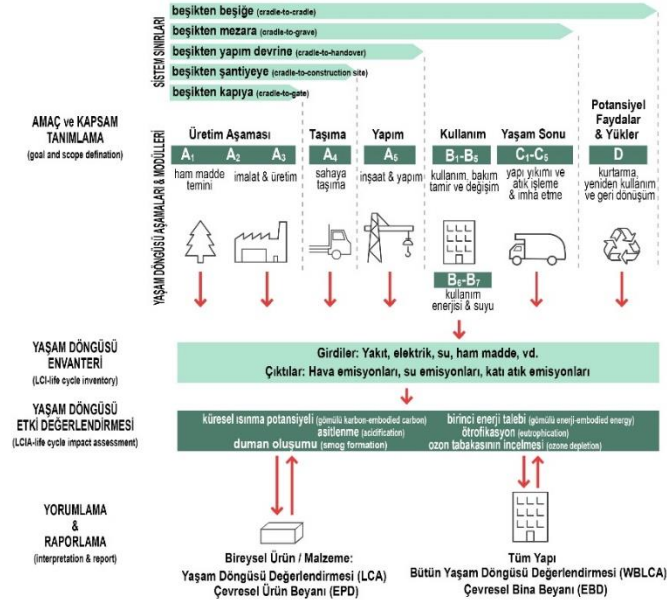
Sürdürülebilir mimarlık yaklaşımı, yapı sektörü kaynaklı çevresel etkilerin azaltılmasında en önemli stratejilerden biri olarak görülmektedir. Bu yaklaşımın, yapıyı çevreye uygulanmasına yardımcı olan çeşitli yöntem ve araçlar bulunmaktadır. Bilimsel çalışmalarda giderek artan bir öneme sahip olan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA-Life Cycle Assessment), yapıların yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirliğini değerlendirmek için eksiksiz bir yöntem olarak kabul edilmektedir. LCA, bir yapının üretilebilmesi için ilk adım olan hammaddelerin çıkarılmasından başlayarak, yapı üretimi, kullanımı ve kullanım ömrü sonunda yok edilmesi aşamaları boyunca meydana getirdiği çevresel etkilerin hesaplanabilmesini mümkün kılmaktadır (Görsel 2) (Bruce-Hyrkäs, 2021).



Görsel 2. Yapı üretiminde yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) süreci (Bruce-Hyrkäs, 2021).

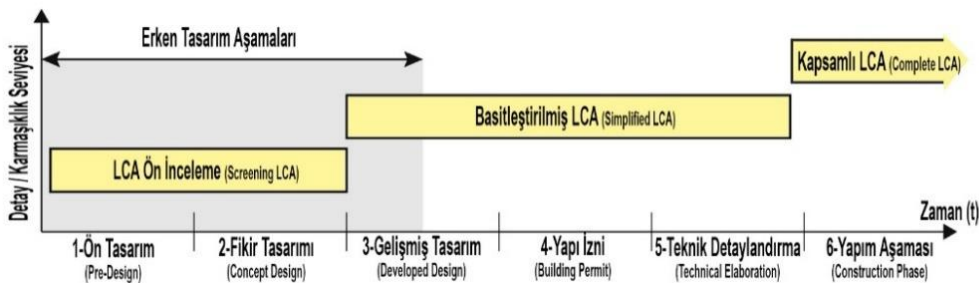
ISO 14040'a göre LCA metodolojisi; amaç ve kapsam (goal and scope), yaşam döngüsü envanteri (LCI-life cycle inventory), yaşam döngüsü etki değerlendirme (LCIA-life cycle

impact assessment) ve yorumlama-raporlama (interpretation-report) olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır (Görsel 3) (Soust-Verdaguer, Llatas, & García-Martínez, 2017).



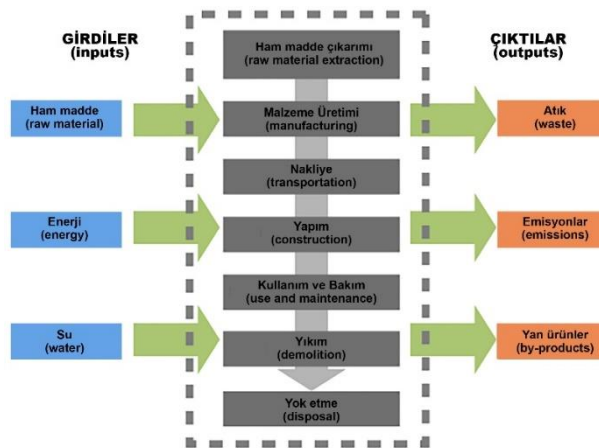
Görsel 3. LCA hesaplama metodolojisinin dört ana safhası ve birbiri ile olan ilişkileri (Soust-Verdaguer, Llatas, & García-Martínez, 2017).

Diğer endüstriyel sektörlerin aksine, uzun kullanım ömrü başta olmak üzere birçok dinamik niteliklere haiz olan yapı sektörü çok farklı unsurlardan oluşmaktadır. Dolayısıyla bu durum, zaten doğası gereği karmaşık ve zaman alıcı bir yapıya sahip olan LCA hesaplamalarının yapı sektörüne uygulanması konusunda ciddi bir ön yargı oluşturmaktadır. Sektörel bazlı LCA raporları, yapı sektöründe yaşam döngüsü değerlendirmesinin diğer sektörlerdeki kadar ayrıntılı geliştirilemeyeceğini ifade etmektedir (EeBGuideProject, 2012). Bu belirsizlikten dolayı, LCA hesaplamalarının yapı üretiminin her aşamasında yapılarak çevresel etkilerin değerlendirilmesine imkân veren yöntemler geliştirilmiştir. Analizin amacı ve kapsamı, uygulamacının bilgi düzeyi, yaşam döngüsü envanterinin mevcudiyeti ve yapının gelişme düzeyi (LoD-level of development) gibi kriterleri esas alan üç farklı LCA hesaplama aşaması bilimsel çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Görsel 4) (Meex, Hollberg, Knapen, Hildebrand, & Verbeeck, 2018).



Görsel 4. Yapının farklı tasarım aşamaları ile LCA hesaplamalarının ilişkisi (Meex, Hollberg, Knapen, Hildebrand, & Verbeeck, 2018).

LCA hesaplamaları, farklı tasarım aşamalarına ayrılmış bile olsa, hala karmaşık ve zaman alıcı bir süreçtir. Bu durumun birçok nedeni vardır. Yapıları oluşturan yapı elemanları birçok farklı katmandan oluşmaktadır. Farklı malzemelerin, belirli miktarlarda bir araya getirilmesiyle oluşan bu katmanların değerlendirilmesi oldukça yorucu ve zaman alıcı olmasının yanı sıra hesaplama hatasına da açıktır. Kullanım aşamasının (the use phase) yanı sıra, kullanım ömrü sonu (the end of life) senaryosu belirsiz olan yapılar, süreç içerisinde yapılabilecek müdahaleler nedeniyle yüksek seviyede belirsizlik içeren, çok uzun bir kullanım ömrüne sahiptirler. Yapı üretiminin aksine, oluşumunda kullanılan malzeme ve bileşenlerin, belirli bir kullanım ömrü olacak biçimde, tek bir üretici tarafından tedarik edilen tüketim ürünleri, geri dönüştürülebilir veya kontrollü bir şekilde ortadan kaldırılabilir potansiyeliyle, çevresel etkilerinin kolaylıkla belirlenmesini sağlayan bir süreç geçirmektedir. Ancak, üretimin karmaşıklığı nedeniyle birbirinden oldukça farklı malzeme üreticilerinin devrede olduğu yapı üretme süreci için çevresel etki tahmini belirsiz veya çok düşüktür (Hollberg & Ruth, 2016). Diğer bir zorluk ise, bir ürün sistemi için girdiler (inputs) olarak su, enerji, ham madde vb. bilgileri ve çıktılar (outputs) olarak havaya, toprağa ve suya salınım bilgilerini içeren yaşam döngüsü envanteri (LCI-life cycle inventory) verilerinin eksikliği olmaktadır. Bir yapı bütününden ayrı olarak, ürün ve malzemelerin yaşam döngüsü boyunca girdi ve çıktı akışının haritalandığı ve ölçümlendiği bu süreç, sistemin tamamını kapsayan LCA hesaplamalarının doğruluğunun temelinde yer alan en önemli bileşenlerden biridir (Görsel 5) (GreenSpec, 2021).



Görsel 5. Yaşam döngüsü envanteri (LCI-life cycle inventory) haritalama ve ölçümleme süreci (GreenSpec, 2021).

Ülkemiz özeline ait tamamlanmış bir yaşam döngüsü veri tabanı olmamakla birlikte oluşturma faaliyetleri devam etmektedir. Ülkemizin aksine, Athena (Kuzey Amerika), GaBi (Almanya), KBOB Database (İsviçre), Korean Database (Güney Kore), Chinese Database (Çin), Ecoinvent (İsviçre), ICE (Inventory of Carbon & Energy-Birleşik Krallık), Oekobaudat (Almanya), U.S. LCI (Kuzey Amerika) gibi pek çok yaşam döngüsü veri tabanı (LCI) bulunmaktadır (Tablo 1) (Pan & Teng, 2021). Özellikle son on yılda artan çevresel kaygılar, ülke bazlı malzeme veri tabanlarının hızla oluşturulmasına sağlamıştır. Yukarıda ifade edilen zorlukları ek olarak, doğası gereği oldukça karmaşık olan mimari tasarım sürecini yöneten mimarların, LCA uygulamasını

yürütmek için gerekli bilgi ve deneyime sahip olmamaları da bulunmaktadır (Hollberg & Ruth, 2016).

Tablo 1

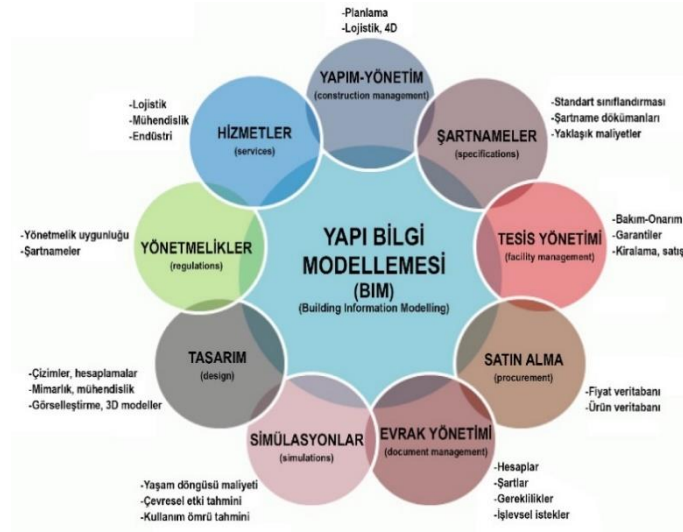
Yapı sektöründe çoğunlukla kullanılan yaşam döngüsü envanterleri (LCI) (Pan & Teng, 2021).

Yazılım	Bölgesi	Kuruluş	Ücret Durumu	LCA Sistem Sınırları	Açıklama
AusLCI	Avustralya	Building Product Innovation Council	Ücretsiz	Beşikten Kapiya (cradle-to-gate)	Herkes için açık, tutarlı bir bilgi kaynağı, sadece Avustralya bölgesine özgü.
Base Carbone	Fransa	French Environment and Energy Management Agency	Ücretsiz	Beşikten Mezara (cradle-to-grave)	Bir çok kamusal emisyon faktörü ve veri kaynağı mevcut, sadece Fransa'da uygulanabilir.
BEDEC	İspanya	Institute of Technology of Construction	Ücretsiz	Beşikten Kapiya (cradle-to-gate)	Ürün fiyatı ve çevresel bilgileri içeren veriler mevcut, teknik açıklama raporları açık kaynak değildir.
CLCD	Çin	Sichuan University IKE Environmental Technology	Ücretsiz	Beşikten Kapiya (cradle-to-gate)	600'den fazla veri kümesi içerir, Çin içinde farklı sektörlerin birleşimidir, Açık kaynak kodlu değildir ve sadece Çince'dir.
Ecoinvent	İsviçre	Swiss Centre for Life Cycle Inventories	Ücretli	Beşikten Mezara (cradle-to-grave)	Dünyanın en büyük ve en tutarlı veri tabanına sahiptir. Lisans ve yıllık kullanım ücreti zorunludur.
EF databases	Avrupa	European Commission	Ücretli	Beşikten Mezara (cradle-to-grave)	3200 veri kümesi ile ticari bir yazılım olan SimaPro içerisine gömülü kullanılabilir.
ELCD	Avrupa	EU Joint Research Centre	Ücretsiz	Beşikten Mezara (cradle-to-grave)	330 veri kümesi mevcuttur, raporlar, diyagramlar vd. sonuçla ile dijital bağlantısı eksiktir.
GaBi databases	Almanya	PE International	Ücretli	Beşikten Mezara (cradle-to-grave)	5000 yaşam döngüsü envanteri (LCI) mevcuttur, lisans ve yıllık ücret zorunludur.
ICE Inventory of Carbon & Energy	İngiltere	University of Bath	Ücretsiz	Beşikten Kapiya (cradle-to-gate)	Yapı malzemeleri için önde gelen, çok kullanılan bir veri tabanıdır. Sadece gömülü karbon (embodied carbon) bilgisi mevcuttur.
IVAM LCA data	Hollanda	IVAM Environmental Research	Ücretli	Beşikten Mezara (cradle-to-grave)	Farklı sektörlerde 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 (cradle-to-grave)	1200'den fazla veri kümesine sahip, ücretsiz, Almanya'nın ulusal yaşam döngüsü envanteri (LCI), 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 (LCI), devamlı güncellenmektedir.

Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) Kavramı

Günümüzde aralıksız yapılan çalışmalar ile geliştirilmeye devam edilen Yapı Bilgi Modellemesi (BIM-Building Information Modelling) teknolojileri, dünya çapında geniş kullanım alanlarıyla büyük ilgi görmektedir (Cavaliere, Habert, Dell'Osso, & Hollberg, 2019). AEC (Architecture Engineering Construction) olarak tanımlanan "Mimarlık Mühendislik Yapım" sektöründe BIM kullanımı küresel boyutta artmaktadır. Avrupa Birliği ülkeleri, İngiltere gibi bazı ülkeler 2016 yılından itibaren kabul etmesine rağmen, 2014/24/EU direktifine göre Ekim 2018'den itibaren kamu yapılarının projelendirilmesinde BIM kullanımını zorunlu hale getirmiştir (Soust-Verdager, Llatas, & García-Martínez, 2017). BIM araçları, geleneksel mimari yapı planlamasının aksine, yapıların üretiminden önce teknolojik, ekonomik ve çevresel yönlerinin değerlendirilmesine olanak sağlayarak, avantaj ve dezavantajların belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir yapılar ve çevreler elde edilebilmesi amacıyla yapı

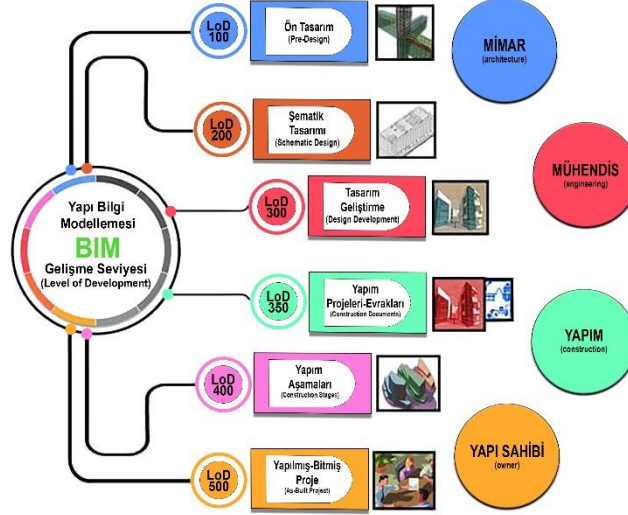
sektöründe BIM kullanımının yaygınlaştırılması gerektiği düşünülmektedir (Görsel 6) (Reizgevičius, Ustinovičius, Cibulskiene, Kutut & Nazarko, 2018).



Görsel 6. Yapı bilgi modellemesinin (BIM-building information modelling) yaşam döngüsü (Reizgevičius, Ustinovičius, Cibulskiene, Kutut & Nazarko, 2018).

Sürdürülebilirlik paradigmasını önceleyen BIM teknolojisi, yapıların tasarlanması, üretimi, bakımı ve yok edilmesinde çevresel etkin bir metodoloji sunmaktadır. Genel anlamda BIM kullanımının yapı sektörünün sürdürülebilirliği üzerindeki pozitif etkisi, kaynak verimliliği ve ekolojik tasarıma dayalı sağlıklı bir fiziki çevre oluşturan yeşil tasarım (green design) kavramı ile öne çıkmaktadır. Ancak BIM teknolojilerinin daha geniş çevreler tarafından kullanımıyla, sürdürülebilirliğin sadece çevresel yönüne değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal boyutlarına da olumlu bir etki yapması beklenmektedir. Çevresel sürdürülebilirlik bağlamında BIM, yapı ile ilgili her türlü veriyi depolayabilme, işleyebilme ve paylaşma kapasitesi sayesinde, yapının; enerji, su tüketimi, kullanılan malzemeler, atık yönetimi ve karbon ayak izi gibi çevresel etkilerinin en aza indirilmesini sağlayarak daha çevresel bilince sahip kararlar alınmasına yardım etmektedir. Ekonomik sürdürülebilirlik bağlamında BIM kullanımı; projelendirme aşamasında potansiyel olumsuzlukların erken tespiti, daha doğru mimarlık-mühendislik kararları, verimli lojistik politikaları ve yapının bütün yaşam döngüsü maliyetlerinin tahmin edilmesi gibi birçok kazanım sağlayarak, ekonomik varlığın korunması, üretkenliğin artırılması ve israfın azaltılmasına yönelik kazanımlar sağlamaktadır. Sosyal sürdürülebilirlik bağlamında BIM; atık yönetimi, iç hava kalitesi, gürültü kirliliği, şantiye sahasında güvenlik, kamusal altyapıya daha hassas ve kolay bağlantı, yapı bakım faaliyetlerinin tasarım aşamasında planlanması gibi iyileştirici araçlar sağlayarak, sağlıklı ve yaşanabilir yapılar-mekanlar üretilmesine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, BIM sayesinde sürdürülebilirlik ile ilgili veriler sürekli toplanabilmektedir. Analiz edilen bu veriler, geleceğe dönük fiziki çevre gelişim projeksiyonlarının planlanmasında yol gösterici bir nitelik taşımaktadır (Buildipedia, 2021). Dijital ortamda üretilecek olan yapının sanal bir modelini tanımlayan BIM araçları, yapıya ait malzemeler ve bileşenler hakkında detaylı veriler içerebilmektedir. Ancak, doğası gereği karışık ve zahmetli bir süreç olduğu daha önce ifade edilen mimari tasarım boyunca BIM modeli, uluslararası literatürde ayrıntı veya gelişme düzeyi (level of detail/development) kavramları ile

ifade edilen, farklı bilgi zenginliği göstermektedir (Volk, Stengel, & Schultmann, 2014). Nesne Tanım Düzeyi, Nesne Detay Seviyesi, Nesne Olgunluk Seviyesi, Nesne Gelişim Seviyesi (level of definition/detail/development-LoD) tanımlarıyla da ifade edilebilen LoD kavramı, BIM modelinin, projenin ön tasarımından yapım aşamasına kadar, hangi düzeyde içerikle ifade edileceğini belirtmektedir. Amerika Mimarlık Enstitüsü (AIA-American Institute of Architecture) bir BIM modeli için altı farklı gelişme seviyesi belirlemiştir (Görsel 7) (AIA, 2013).

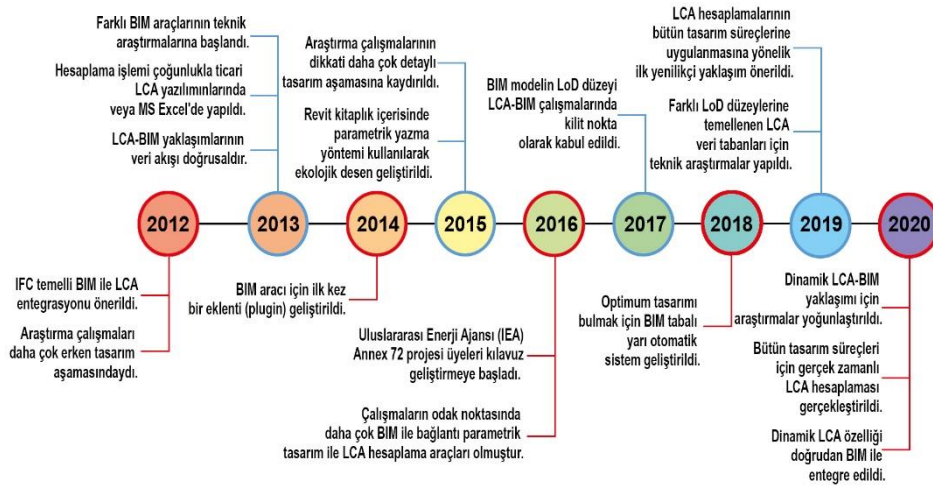


Görsel 7. BIM modelinin tasarım süreçlerine göre gelişme seviyeleri (LoD-Level of Development) (AIA, 2013).

Mimari tasarım başlangıcında alınan kararlar sıklıkla değişebilmektedir. Özellikle ön tasarım aşamasında daha çok mimari planlama kararları belirlenmektedir. Bu aşamalarda, LCA hesaplamalarının gerçekleştirileceği BIM modelleri, çoğunlukla varsayılan (default-generic) olarak gelen malzeme bilgisini kullanarak oluşturulmaktadır. Dolayısıyla gelişme seviyesi (LoD) yetersiz olan BIM modeli, yapının yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) hesaplamalarını gerçeklikten uzak tahmin edilmesine neden olabilmektedir. Tasarım kararları netleştikçe detay seviyesi (LoD) artan BIM modeli, daha gerçekçi çevresel etki tahminleri yapılabilmesini mümkün kılmaktadır. Ancak bu durum oldukça büyük bir ikilemi (dilemma) de birlikte getirmektedir. Şöyle ki, yapıya ilişkin verilerin yetersiz ve belirsiz olduğu ilk tasarım adımlarında (LoD-100/200) alınan kararlar, malzeme bilgisinin belirlendiği, metraj listelerinin oluşturulduğu, yapıya ilişkin bütün sistemlerin belirlendiği aşamaları (LoD-300/350) doğrudan etkilemektedir. Gelişme (detay) seviyesinin (LoD-300/350) ileri olduğu bir aşamadan, ilk kararların alındığı aşamalara (LoD-100/200) geri dönüş oldukça maliyetli olmaktadır. Birkaç yapı malzemesi bağlamında değişiklik yapılabilmesi mümkün olmasına rağmen, özellikle yapının geometrisinde çevresel etkinin önemli ölçüde azaltılabilmesine katkı sağlayacak değişikliklerin yapılması imkansızdır. Bu sebeplerden ötürü, LCA hesaplamalarının, tasarım ilk aşamasından itibaren eksiksiz ve gerçeğe yakın yapılabilmesi için BIM modelinin gelişme seviyesi (LoD) kavramı, tasarımcı mimar ve mühendisler tarafından dikkate alınmak zorundadır (Hollberg & Ruth, 2016).

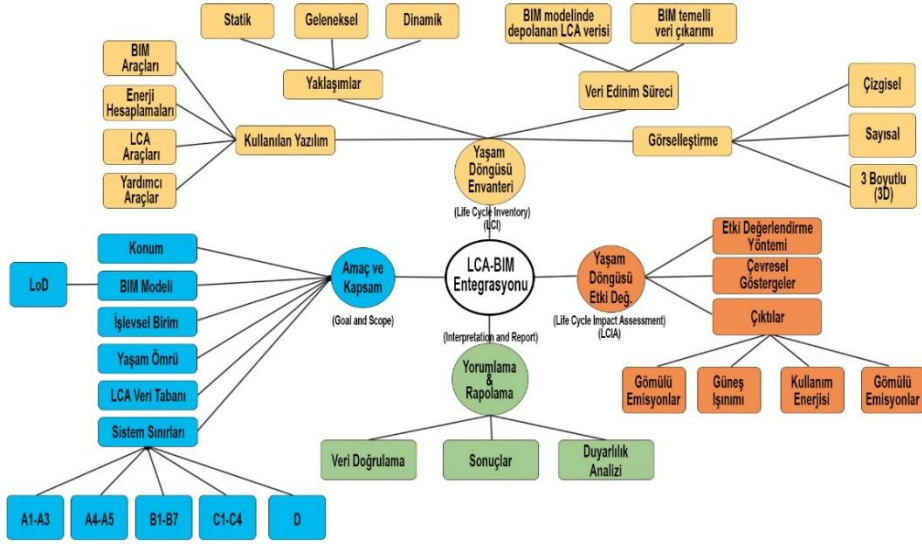
LCA-BIM Entegrasyonu

Günümüzde yapı sektöründe LCA ve BIM entegrasyonu birçok bilimsel çalışmanın konusu olmaktadır. Farklı detay seviyelerine göre yapının dijital bir modelinin oluşturulabildiği BIM ortamı, LCA hesaplamalarının kolayca yapılabilmesine yönelik birçok avantaj sağlamaktadır. LCA-BIM entegrasyonu, yapı tasarımının ilk aşamasından itibaren çevresel performansı iyileştirici kazanımlar elde edilmesine ve çevresel etki hesaplama süreçlerini kısaltılarak mimari tasarıma daha çok zaman ayrılabilmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca kullanıcı dostu bir ara yüze (user friendly interface) sahip olan BIM araçları, dijital modele veri girişini oldukça kolaylaştırmaktadır. LCA-BIM entegrasyonu, özellikle son on yıl içerisinde çok önemli gelişmeler kaydetmiştir (Görsel 8)(Safari & AzariJafari, 2021).



Görsel 8. 2012 yılından günümüze LCA-BIM entegrasyonun gelişim durumu (Safari & AzariJafari, 2021).

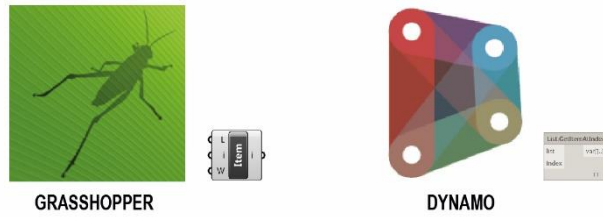
Uluslararası literatürde, LCA-BIM entegrasyonuna yönelik çeşitli yaklaşımlar önerilmektedir (Potrč Obrecht, Röck, Hoxha, & Passer, 2020). Bu yaklaşımlar, el ile yapılan girdi (input) sayısını azaltmak, LCA sürecini basitleştirmek ve çoğunlukla LCA konusunda sınırlı bilgi düzeyine sahip olan tasarımcıların çıkan sonuçları (output) yorumlayabilmesini kolaylaştırmak gibi birçok açıdan çevresel etki için önemli kazanımlar sağlamaktadır. Böylelikle, mimari tasarımın her aşaması için belirsizlik oldukça azalabilmekte ve elde edilen sonuçlar gerçeğe daha yakın özellikler göstermektedir. Ancak, yerel yaşam döngüsü envanterinin (LCI) kullanımı, girdi verilerinin (inputs) belirsizlik analizi ve çıktılarının (outputs) girdi verilerine duyarlılığı (sensitivity) gibi faktörler, sonuçların gerçekliğini arttırmak için dikkate alınması gerekmektedir. Bunlarla birlikte, son on yıl içinde bilimsel çalışmalarla şekillenen, LCA-BIM entegrasyonunun ilkesel teknik bilgisini, yaşam döngüsü aşamalarına göre, etkileyen birçok faktör bulunmaktadır (Görsel 9) (Safari & AzariJafari, 2021).



Görsel 9. LCA-BIM entegrasyonu etkileyen faktörlerin ilişkisi (Safari & AzariJafari, 2021).

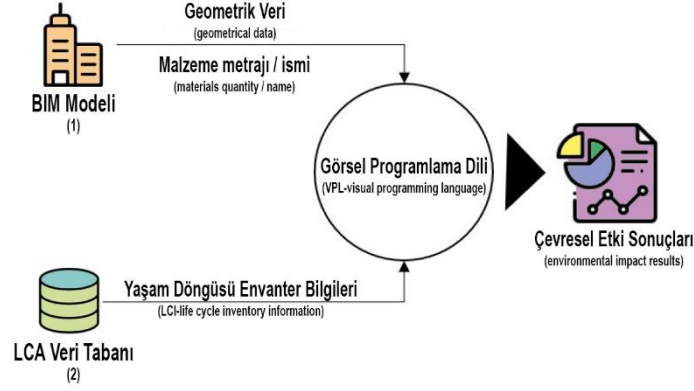
ISO 14040/14044 ve PAS (publicly available specification) 2050 gibi standartlarda belirtilen LCA metodolojileriyle tasarlanan, yapı sektörüne uygun, çoğu yazılım, süreç tabanlı (process based LCA) hesaplama yöntemini esas alınarak üretilmiştir. Bu yaklaşımın benimsendiği, Brightway2, CcaLc, Eco-Profiles, Ecobat, GEMIS, LCAiT, ProBas, Quantis ve Umberto gibi yazılımlar, şeffaflığı ve güvenilirliği arttırmak amacıyla yüksek nitelikli raporları, yorumları literatür referanslarıyla birlikte sağlamaktadır. Özellikle, LCA hesaplamaları Python üzerinde gerçekleştirilen ve kullanımı için uzmanlık gerektiren Brightway2 yazılımı, Monte Carlo duyarlılık analizi hesaplamalarında oldukça hızlı bir araç olarak diğerlerinden ayrılmaktadır. Fakat, Athena IE, BEES, OpenLCA gibi uzman bilgisi gerektirmeyen, sadece yapı malzemesi değişimine yönelik sınırlı sayıda seçenek sunabilen yazılımlar da kullanılabilir. Ayrıca, uzman olmayan tasarımcı kullanımına yönelik olan eBalance ve EQUER yazılımları, sınırlı uygulamaya izin vererek, sadece belirli bir bölge ve dil seçenekleri sunmaktadır. Açık kaynak kodlu programların dışında, yapı projeleri için oldukça uygun olan, gömülü envanter bilgisi içeren, üst düzey raporlama ve akış şemaları sağlayan GaBi, SimaPro, Umberto, OneClick LCA gibi yazılımlar sektörün lideri durumda bulunmaktadır. Söz konusu yazılımlar ile BIM modelinin entegrasyonuna yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Gerekli verilerin nasıl elde edilip kullanıldığı, LCA programları ile BIM modeli arasında veri alışverişi ve hesaplama türlerine göre temellenen entegrasyon süreci, kapsamlı bir sınıflandırma sağlayabilmek amacıyla, el ile girilen verilerin sayısı ve LCA sürecinin karmaşıklığı esas alınarak geleneksel (conventional), statik (static) ve dinamik (dynamic) olacak şekilde üç farklı kategoride sınıflandırılmaktadır (Safari & AzariJafari, 2021). Geleneksel (conventional) yaklaşımda, BIM modelinden gelen veriler bir MS Excel elektronik tablosuna çıkartılır. Daha sonra, çoğunluğu yapı elemanlarının metrajı (bill of quantities-BoQ) olan bu veriler, SimaPro, OneClick LCA gibi ticari veya OpenLCA gibi açık kaynak yazılımlarda çevresel etkilerin hesaplanabilmesi için girdi veri kaynağı (inputs) olarak kullanılmaktadır. Çevresel etki sonuçlarının görüleceği çıktı verisi (outputs) olan raporlar, girdi verisine benzer şekilde, MS Excel dosyası olarak üretilmektedir. Verilerin LCA programlarına el ile girildiği geleneksel (conventional) yaklaşım, uygulayıcının iş yükünü arttırmakta ve bunun

sonucu olarak insan kaynaklı hataların çoğalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, veri kaybı olasılığı yüksek olan bu yaklaşım, yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) hesapları konusunda çok az bilgiye sahip tasarımcılar için uygun olmamaktadır. Statik (static) yaklaşım, BIM modeli ve LCA aracı arasında gerçekleşen veri alışveriş süreci bakımından, geleneksel (conventional) yaklaşımdan farklılık arz etmektedir. Bu farklılık, BIM sürecine hizmet eden, farklı BIM araçları arasında veri alışverişinde ortak bir dosya formatı olan IFC (Industry Foundation Classes) üzerine temellenmektedir. Geleneksel olarak MS Excel tabanlı verilerin aksine, harici LCA yazılımlarına girdi olan bu IFC verileri, BIM modeline ait birçok özelliği içermekte ve kullanım amacına göre özelleştirilebilmektedir. Fakat, BIM modelinde yapılacak herhangi bir değişiklik, bütün LCA hesaplamalarının yeniden yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Yapı modelinin oluşturuldu BIM yazılımları ile çevresel etki değerlendirmesinin yapıldığı LCA yazılımları arasında çift yönlü (bidirectional) bir ilişki yoktur (Jalaei, Jalaei, & Mohammadi, 2020). Bu iki yaklaşımdan farklı olarak, çevresel verilerin BIM ortamına girilmesine izin veren dinamik (dynamic) yaklaşım, model ile yaşam döngüsü veri tabanları (LCI-life cycle inventory) arasında, görsel programlama dili (VPL-visual programming language) vasıtasıyla, otomatik ve en uygun olacak biçimde çift yönlü (bidirectional) bir bağlantı oluşturarak, mimari tasarımın her aşamasında sürekli geri bildirim (feed-back) alınabilmesi amacıyla geliştirilmiştir (Görsel 10) (Safari & AzariJafari, 2021). Son yıllarda, özellikle yapıların çevresel etkilerinin hesaplanmasına yönelik dinamik (dynamic) yaklaşım yöntemi, diğer iki yaklaşıma kıyasla, bilimsel çalışmalarda çok daha fazla benimsenmektedir.



Görsel 10. Yapı sektöründe sıklıkla kullanılan görsel programlama dilleri (VPL) (Parametricmonkey, 2021).

Bueno ve ark. (2018) yapmış oldukları çalışmada, BIM ortamındaki modele çevresel verileri dahil edebilmek için Dynamo görsel programlama dilini (VPL) kullanan bir yöntem uygulanmışlardır. Yapı tasarımında kullanılan malzemelere yönelik olarak, yaşam döngüsü envanter (LCI) bilgisi içeren bir MS Excel elektronik tablo, Dynamo görsel programlama dili (VPL) kullanılarak, Autodesk Revit içerisindeki model ile eşleştirilmiştir. Geliştirilen bu parametrik bağlantı aracılığıyla çevresel etki değerlendirmesi yapılmıştır. Çıktılar (outputs), yaşam döngüsü envanter (LCI) içeriğine göre, yine MS Excel elektronik tablosu olarak sütun grafikleri biçiminde elde edilmiştir (Bueno, Pereira, & Fabricio, 2018). Autodesk Revit-Dynamo dışında, yine, bir başka BIM tabanlı program olan Archicad, Rhinoceros 3D içerisinde yer alan Grasshopper görsel programlama dili (VPL) ile etkileşim yapılarakta birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Görsel 11) (Hollberg & Ruth, 2016) (Lobaccaro, Wiberg, Ceci, Manni, Lolli, & Berardi, 2018) (Kiamili, Hollberg, & Habert, 2020).



Görsel 11. LCA ve BIM araçlarının görsel programlama dili aracılığıyla entegrasyonun şematik gösterimi (Kiamili, Hollberg, & Habert, 2020).

Ancak, Autodesk Revit BIM yazılımı, görsel programa dili (VPL) olan Dynamo ile stabil bağlantısı, başka bir yazılıma gereksinim göstermemesi, sadece basit geometrilerin değil, karmaşık modellerin de kolaylıkla hesaplanabilmesi gibi birçok önemli faktörden ötürü, bilimsel çalışmalarda daha sıklıkla tercih edilmektedir (Monteiro, 2016). Mimari tasarımcıya, sürece bağlı sonuçlar verebilen dinamik (dynamic) yaklaşım, diğer iki yaklaşıma kıyasla, daha doğru sonuçlar sağlamaktadır. Fakat, dinamik (dynamic) yaklaşımda veri toplama ve eşleştirme işlemleri çoğunlukla elektronik tablolar ile yapılmaktadır. Kapsamlı metraj bilgileri sağlayan BIM modeli ile yaşam döngüsü envanter (LCI) değerlerinin görsel programlama dili (VPL) kullanılarak eşleştirilmesi sonucu çevresel etkilerin, tasarımın her aşamasında hesaplanabildiği dinamik (dynamic) yaklaşım, bilimsel çalışmalarda belirtilen bazı belirsizliklerin yok edilebilmesi amacıyla, belirli alanlarda geliştirilme gereksinimi bulunmaktadır. Bununla birlikte, BIM-LCA entegrasyonuna yönelik, mantıksal düşünmeyi teşvik eden VPL araçlarının etkin kullanımı sayesinde tasarımcılar, BIM modellerini çok daha verimli kullanabilmektedir. Yapı tasarımcılarını profesyonel programcılara dönüştürmeyi amaçlamayan görsel programlama dili (VPL), BIM araçlarının LCA ile çift yönlü (bidirectional) entegre olunmasına, mevcut teknolojilerden daha çok yararlanılmasına ve tasarımcıların bilgi-becerilerinin artırılmasına yardımcı olmaktadır (Su, Wang, Han, Hong, & Liu, 2020).

Sonuç ve Öneriler

Günümüzde, iklim değişikliği etkisi başta olmak üzere, çokça hissedilen küresel ısınma olgusu, beraberinde birçok farkındalığın da ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu farkındalıkların başında, malzeme ham maddesi üretiminden yapıların yıkım-yok etme aşamasına kadar sürekli enerji gereksinimi duyan ve sera gazı etkisi oluşturan yapı sektörüne yönelik alınacak zorlayıcı tedbirler gelmektedir. Yapı üretimi, ham madde tüketimi ve katı atık oluşumunu oldukça fazla etkileyen, kaynak yoğun bir faaliyet olarak kabul edilmektedir. Ancak yapı sektörünün, ihtiyaç duyulan malzeme kaynağı talebini ve sera gazı (GHG-greenhouse gas) emisyonlarını azaltmak için önemli bir potansiyeli bulunmaktadır. Sürekli gelişen teknolojiyle beraber yapı sektöründe dijitalleşme, yapının bütün yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirliğinin iyileştirilmesine yardımcı olarak, bu potansiyelden oldukça önemli faydalar elde edilmesine katkı sağlamaktadır. Yapı üretiminde dijitalleşmenin esaslarını oluşturan yapı bilgi modellemesi

(BIM-building information modeling) ile yapının bütün yaşam döneminde çevresel etkilerinin değerlendirildiği metodoloji olan yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) entegrasyonu, yukarıda değinilen potansiyeli ortaya çıkarmanın en verimli yoludur. Bu hedef doğrultusunda çalışmada, LCA-BIM entegrasyonu son yıllarda yapılmış bilimsel araştırmalar doğrultusunda irdelenmiştir. Amaç-kapsam (goal and scope), yaşam döngüsü envanteri (LCI-life cycle inventory), yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (LCIA-life cycle impact assessment) ve yorumlama-raporlama (interpretation-report) olarak dört ana başlıktan oluşan yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA-life cycle assessment), genel ilkeleriyle irdelendikten sonra, mimari tasarım süreci boyunca nasıl ele alındığı (Screening LCA-Simplified LCA-Complete LCA) tespit edilmiştir. Ayrıca, LCA hesaplamalarını mümkün kılan “yaşam döngüsü envanter (LCI)” bilgisi kavramı ile farklı ülkelerin LCI çalışmalarına değinilmiştir. ABD ve Avrupa ülkeleri başta olmak üzere birçok farklı ülke kendilerine özgü envanter bilgisi oluşturmalarına rağmen, ülkemizde bu sürecin henüz başlangıç seviyesinde olduğu aşıkardır. Dinamik bir süreç olan mimari tasarım safhaları, yapıların çevresel etkilerinin hesaplanabilmesini çoğu zaman zorlaştırmaktadır. Bir yapının, ön tasarım (pre-desing) aşaması ile yapı izni (building permit) aşamaları arasında, çevresel etki değerleri birbirinden çok farklı çıkabilmektedir. Bu bağlamda temelde yatan sebep olan BIM modelinin gelişme seviyesi (LoD-level of development) olgusu ve LCA-BIM entegrasyonuna olan etkisi ortaya konulmuştur. Son on yıl içindeki değişimlerin kronolojik zaman çizelgesiyle gösterildiği LCA-BIM entegrasyonuna etki eden diğer faktörler, yaşam döngüsü değerlendirmesini oluşturan dört ana başlık bağlamında, grafiksel olarak ifade edilmiştir. Uluslararası literatürde, geleneksel (conventional), statik (static) ve dinamik (dynamic) olarak isimlendirilen LCA-BIM entegrasyon yaklaşımları; içerdikleri zorluk ve kolaylıklar, hesaplama yöntemleri ve kullanım yaygınlığına göre analiz edilmiştir. Büyük çoğunluğu hala 2 boyutlu (2-dimensional) mimari tasarıma dayalı olan ülkemiz yapı sektörü, çevresel kaygılar başta olmak üzere sürdürülebilirlik kavramını önceleyerek, en kısa sürede BIM tabanlı süreç yaklaşımını benimsemelidir. Çok boyutlu (mutlidimensional) planlamanın gerçekleştirilebildiği BIM yaklaşımı, benzer şekilde birçok gelişmiş ülkede olduğu gibi, ülkemizde de yasal çerçeveler vasıtasıyla tanımlanarak, kullanımının bir tercih konusu değil ve fakat gereklilik olduğu vurgulanmalıdır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) faaliyetleri ülkemizde yeni gelişmeye başlamıştır. Özellikle yapı sektöründe kullanılabilecek düzeyde yerli bir LCA hesaplama aracı henüz bulunmamakla birlikte, geniş kapsamlı yaşam döngüsü envanteri (LCI) henüz tamamlanmamıştır. Yapı malzemelerine ilişkin envanter bilgisi, LCA hesaplarının gerçekleştirebilmesi için bir zorunluluktur. Ülkemiz, çevresel etki konusunda uzmanlaşmış bilim insanları ile yapı malzemeleri üreticilerinin müşterek çalışmasıyla elde edilebilecek bir yaşam döngüsü envanteri (LCI) hazırlanmalıdır. Yurt dışında, Uluslararası Enerji Ajansı Yapıda ve Toplumda Enerji Programı kapsamında Binalardan Kaynaklanan Yaşam Döngüsüne İlişkin Çevresel Etkilerin Değerlendirilmesi Araştırması (IEA EBC Annex 72-Assessing Life Cycle Related Environmental Impacts Caused by Buildings) gibi, birçok sivil toplum kuruluşu, yapıların çevresel etkileri ve enerji kavramları üzerine faaliyetler yürütmektedir. Ülkemiz de özellikle mimarlık bölümleri başta olmak üzere ilgili disiplinlerde, yapı ve çevresel etki farkındalığının oluşturulmasına yönelik akademik çalışmalara hız

verilmelidir. Özellikle lisans dersleri kapsamı, LCA-BIM entegrasyonu benimseyen uygulamalara öncelik vererek, geleceğin yapı tasarımcılarına sürdürülebilirlik ilkeleri çerçevesinde yön gösterecek nitelikte bir paradigmaya sahip olmalıdır.

Kaynaklar

- AIA. (2013). Guide, Instructions, and Commentary to the 2013 AIA Digital Practice Documents. Retrieved from <https://www.aiacontracts.org/resources/69541-guide-instructions-and-commentary-to-the-2013-aia-digital-practice-documents> (Erişim Tarihi: 11.06.2021)
- Bruce-Hyrkäs, T. (2021). Building Life Cycle Assessment White Paper-Discover why you need LCA to build sustainably. Retrieved from <https://www.oneclicklca.com/building-life-cycle-assessment-white-paper/> (Erişim Tarihi: 15.03.2021)
- Bueno, C., Pereira, L. M., & Fabricio, M. M. (2018). Life cycle assessment and environmental-based choices at the early design stages: an application using building information modelling. *Architectural Engineering and Design Management*, 14(5), 332-346. doi:10.1080/17452007.2018.1458593
- Buildipedia. (2021). BIM and Sustainable Design. Retrieved from <http://buildipedia.com/aec-pros/design-news/bim-and-sustainable-design> (Erişim Tarihi: 10.06.2021)
- Cavalliere, C., Habert, G., Dell'Osso, G. R., & Hollberg, A. (2019). Continuous BIM-based assessment of embodied environmental impacts throughout the design process. *Journal of Cleaner Production*, 211, 941-952. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.247>
- EeBGuideProject. (2012). Operational Guidance for Life Cycle Assessment Studies of the Energy Efficient Buildings Initiative. Retrieved from <https://www.eebguide.eu/> (Erişim Tarihi: 09.06.2021)
- GreenSpec. (2021). Life Cycle Assessment Retrieved from <https://www.greenspec.co.uk/life-cycle-assessment-lca/> (Erişim Tarihi: 10.06.2021)
- Hollberg, A., & Ruth, J. (2016). LCA in architectural design—a parametric approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21. doi:10.1007/s11367-016-1065-1
- Jalaei, F., Jalaei, F., & Mohammadi, S. (2020). An integrated BIM-LEED application to automate sustainable design assessment framework at the conceptual stage of building projects. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101979. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101979>
- Kiamili, C., Hollberg, A., & Habert, G. (2020). Detailed Assessment of Embodied Carbon of HVAC Systems for a New Office Building Based on BIM. *Sustainability*, 12, 3372. doi:10.3390/su12083372
- Lobaccaro, G., Wiberg, A. H., Ceci, G., Manni, M., Lolli, N., & Berardi, U. (2018). Parametric design to minimize the embodied GHG emissions in a ZEB. *Energy and Buildings*, 167, 106-123. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.025>
- Meex, E., Hollberg, A., Knapen, E., Hildebrand, L., & Verbeeck, G. (2018). Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design. *Building and Environment*, 133, 228-236. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.016>
- Monteiro, A. (2016). *Visual Programming Language For Creating BIM Models With Level Of Development 400*. Paper presented at the 4th BIM International Conference, São Paulo & Lisboa. https://www.researchgate.net/publication/310606700_VISUAL_PROGRAMMING_LANGUAGE_FOR_CREATING_BIM_MODELS_WITH_LEVEL_OF_DEVELOPMENT_400/citations
- Pan, W., & Teng, Y. (2021). A systematic investigation into the methodological variables of embodied carbon assessment of buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110840. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110840>
- Parametricmonkey. (2021). Retrieved from <https://parametricmonkey.com/2016/01/19/dynamo-for-grasshopper-users/> (Erişim Tarihi: 14.06.2021)
- Potrč Obrecht, T., Röck, M., Hoxha, E., & Passer, A. (2020). BIM and LCA Integration: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 12(14). doi:10.3390/su12145534
- Reizgevicius, M., Ustinovičius, L., Cibulskiene, D., Kutut, V., & Nazarko, L. (2018). Promoting Sustainability through Investment in Building Information Modeling (BIM) Technologies: A Design Company Perspective. *Sustainability*, 10, 600. doi:10.3390/su10030600
- 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.034>

- Safari, K., & AzariJafari, H. (2021). Challenges and opportunities for integrating BIM and LCA: Methodological choices and framework development. *Sustainable Cities and Society*, 67, 102728. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102728>
- Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., & García-Martínez, A. (2017). Critical review of bim-based LCA method to buildings. *Energy and Buildings*, 136, 110-120. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009>
- Su, S., Wang, Q., Han, L., Hong, J., & Liu, Z. (2020). BIM-DLCA: An integrated dynamic environmental impact assessment model for buildings. *Building and Environment*, 183, 107218. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107218>
- UNEP. (2020). 2020 Global Status Report For Buildings And Construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. Retrieved from https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf (Erişim Tarihi: 11.06.2021)
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109-127.
- Görsel 10. Parametricmonkey. (2021). Retrieved from <https://parametricmonkey.com/2016/01/19/dynamo-for-grasshopper-users/> (Erişim Tarihi: 14.06.2021)