

Yapılarda Gömülü ve Kullanım Enerjisi Kavramlarının Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) Metodolojisiyle İrdelenmesi

İlhan KOÇ*, Mehmet Oğuz DURU** ve Sevde Gülizar DİNÇER***

* Konya Teknik Üniversitesi
Konya, Türkiye
ORCID: 0000-0002-4864-6906
ikoc@ktun.edu.tr

** Konya Teknik Üniversitesi
Konya, Türkiye
ORCID: 0000-0002-0583-0439
moduru@ktun.edu.tr (İletişim yazarı)

*** Konya Teknik Üniversitesi
Konya, Türkiye
ORCID: 0000-0002-5300-8466
e168126002004@ktun.edu.tr

Derleme Makalesi

Geliş: 23/08/2021

Son düzenleme sonrası geliş: 06/01/2022

Kabul: 07/01/2022

Yayımlanma:31/01/2022

Öz

Yapılan birçok bilimsel araştırmalara göre, küresel çapta gerçekleştirilen yıllık enerji tüketiminin yaklaşık yarısı, yapıların üretilmesi, işletilmesi ve bakımı için gerçekleştirilen faaliyetlerde kullanılmaktadır. Büyük oranı fosil kaynaklı yakıtlardan elde edilen bu enerjinin, kullanımıyla birlikte karbon emisyonuna neden olarak, iklim değişikliğini oluşturan etmenlerin başında gelmektedir. Gömülü (embodied) enerji; ham maddenin çıkarılması, işlenmesi, yapı malzemesine dönüştürülmesi, şantiye sahasına taşınması ve yapı inşası gibi devreye alma sürecinden önce gerçekleştirilen faaliyetlerin bütünü kapsamaktadır. Kullanım (operational) enerjisi ise, nihai kullanıcının iç ortam konfor şartlarını oluşturmaya yönelik, yapıların başta ısıtma, soğutma gibi iklimlendirilmesinde, aydınlatılmasında, enerji gerektiren araç-gereçlerin çalıştırılmasında tüketilen enerji olarak tanımlanmaktadır. Yapıların karbon ayak izinin etkili bir şekilde azaltılabilmesi, hem gömülü (embodied) hem de kullanım (operational) enerjisini dikkate alan tasarımlar ile mümkündür. Ancak, yapılan araştırmalar daha çok kullanım (operational) enerjisine odaklanarak, nispeten hesaplanması karmaşık ve yorucu bir süreç olan gömülü (embodied) enerjiyi göz ardı etmiştir. Bu çalışmada, yaşam döngüsü değerlendirme kavramı üzerinden, özellikle mevcut yapılar dikkate alınarak, gömülü (embodied) ve kullanım (operational) enerjileri kaynaklı karbon salınımlarının birbiriyle olan ilişkisi, irdelenmiştir. Çalışmada, uluslararası kabul görmüş bilimsel yayınlar üzerinden kapsamlı literatür analizi yapılarak elde edilen bulguların, kavramsal bir çerçeve oluşturmak amacıyla, karşılaştırılarak sentezlendiği bir yöntem tercih edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, ekolojik sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için, sadece kullanım (operational) enerjisinin azaltılmasının yeterli olmayacağı, gömülü (embodied) enerji ile birlikte politikaların belirlenmesi zorunluluğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Gömülü enerji, kullanım enerjisi, karbon salınımı, yaşam döngüsü değerlendirme (YDD), sürdürülebilirlik

Examination of Embodied and Operational Energy Concepts in Buildings with Life Cycle Assessment (LCA) Methodology

İlhan KOÇ*, Mehmet Oğuz DURU ** and Sevde Gülizar DİNÇER***

* Konya Technical University
Konya, Türkiye
ORCID: 0000-0002-4864-6906
ikoc@ktun.edu.tr

** Konya Technical University
Konya, Türkiye
ORCID: 0000-0002-0583-0439
moduru@ktun.edu.tr (Corresponding author)

*** Konya Technical University
Konya, Türkiye
ORCID: 0000-0002-5300-8466
e168126002004@ktun.edu.tr

Review Article

Received: 23/08/2021

Received in final revised form: 06/01/2022

Accepted: 07/01/2022

Published online: 31/01/2022

56

Abstract

According to many scientific investigations, approximately half of the annual energy consumption realized globally is used for the activities carried out for the production, operation, and maintenance of buildings. This energy, most of which is obtained from fossil fuels, is one of the leading factors that constitute climate change caused by carbon emissions. Embodied energy: it covers all of the activities carried out before the commissioning process, such as the extraction of raw material, its processing and obtaining it as a building material, the transportation of the building material to the construction site and the construction of the building. The operational energy is defined as the energy consumed in order to create the comfort conditions of the end user, such as in the air conditioning and lighting of the buildings, especially in heating and cooling, and in the operation of energy-requiring appliances. Effectively reducing the carbon footprint of buildings is possible with designs that take into account both embodied and operational energy. However, researches have focused more on operational energy, ignoring embodied energy, which is a relatively complex and tedious process to calculate. In this study, the relationship between embodied and operational energies and carbon emissions with each other, especially considering existing buildings, through the concept of life cycle assessment. In the study, a method in which the findings obtained by conducting extensive literature analysis on internationally accepted scientific publications are compared and synthesized in order to create a conceptual framework has been preferred. As a result of the study, it has been determined that in order to ensure ecological sustainability, it will not be sufficient to reduce the operational energy only, and it is necessary to determine policies together with embodied energy.

Keywords: Embodied energy, operational energy, carbon emission, life cycle assessment, sustainability

1. GİRİŞ

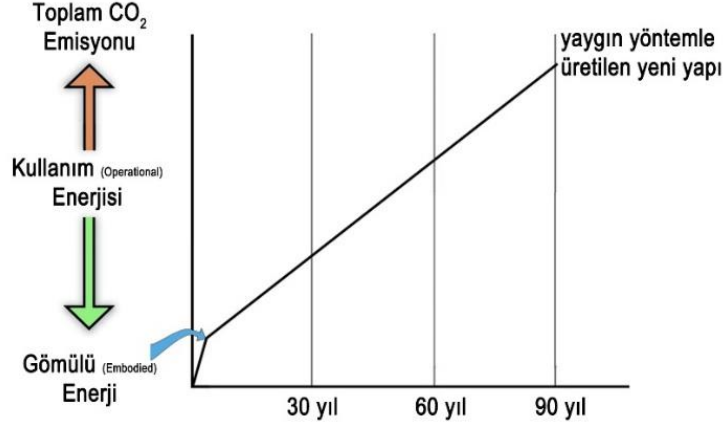
Küresel sıcaklık artışının 2°C'nin altında kalmasını sağlamayı ve sıcaklık artışını en çok 1,5°C ile sınırlandırma çabalarını sürdürmeyi hedefleyen Paris İklim Anlaşması, Aralık 2015 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi 21. Taraflar Konferansı (COP21) kapsamında imzalanmıştır. Söz konusu sıcaklık artış limit değeri, uluslararası bilim camiası tarafından yaygın olarak kabul edilen 2°C'lik eşik noktasına bir karşılık olarak ortaya konmuştur. Bilim insanları, sanayi devriminden bu yana sürekli devam eden küresel sıcaklık artışının, zirveye ulaşmadan önce sınırlandırılabilir ve gezegenin soğuması mümkün kılınabilirse, iklim değişikliklerinden kaynaklanan etkilerin tersine çevrilebilir olacağına inanmaktadır (King, 2017: 7). Dünyanın belirsiz enerji görünümü, yapıların daha az fosil kaynaklı yakıtlar kullanılarak ve daha düşük çevresel etkilere neden olarak tasarlanmasını ve üretilmesini zorunlu kılmaktadır. Enerji kavramı, gerçekleştirilen uluslararası akademik çalışmalar ve enerji sektörü içerisinde yer alan profesyoneller tarafından genellikle "kullanım (operational) enerjisi" olarak algılanmış, fakat yaşam döngüsü boyunca enerji kullanımının diğer önemli bir bileşeni olan "gömülü (embodied) enerji" ise büyük ölçüde göz ardı edilmiştir. Son yıllarda, yüksek performanslı binalarda kullanım enerjisi verimliliği stratejilerinin çoğu daha fazla gömülü enerji kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla gömülü enerji kavramının önemi giderek artmakta ve birçok araştırmaya konu olmaktadır (Azari ve Abbasabadi, 2018: 226).

Küresel enerji tüketiminde önemli bir yere sahip olan yapı sektöründe alınacak önlemlerin, küresel sıcaklık artışını azaltmaya yönelik olumlu katkısı yadsınamaz. Doğa üzerinde insan kaynaklı (antropojenik) etkilerin en önemlilerinden biri olan yapı üretiminin, bütüncül bir yaklaşımla yaşam döngüsünün her aşamasındaki enerji tüketimi göz önüne alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı, yirmi birinci yüzyılda artan bir öneme sahip olmasına rağmen çoğu zaman göz ardı edilmiş olan gömülü enerji kavramını, kullanım enerjisi kavramı ile birlikte değerlendirmektir. Yapıların yaşam süreleri göz önüne alındığında büyük bir oranı kapsayan kullanım enerjisine yönelik iyileştirme faaliyetlerinin her biri gömülü enerjiyi ve dolayısıyla karbon salınımını artırmaktadır. Hem gömülü enerji hem de kullanım enerjisi hesabının gerçekleştirildiği metodoloji olan yaşam döngü değerlendirmesi (YDD) yöntemi, değinilen bu iki kavramın kıyaslamasında kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, uluslararası literatürde yayımlanan bilimsel çalışmalar üzerinden gerçekleştirilen analizler yardımı ile, yapı üretiminde yer alan bu iki farklı enerji kavramının birbiriyle olan ilişkisi irdelenmiştir.

2. YAPI ÜRETİMİNDE GÖMÜLÜ VE KULLANIM ENERJİSİ

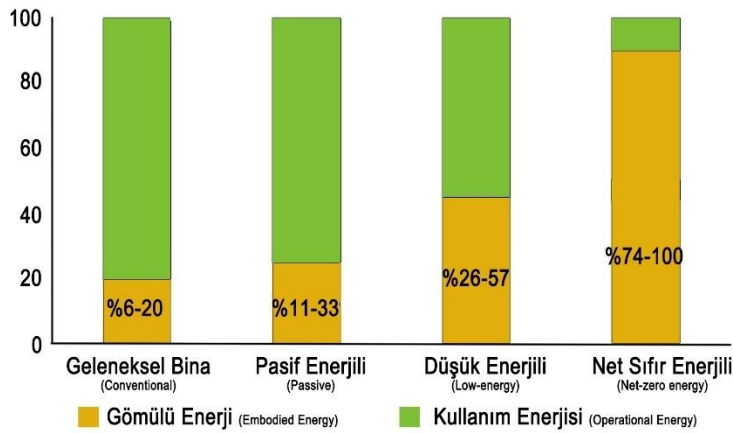
Genellikle bir binanın kullanım (operational) enerjisi ve bundan kaynaklı ortaya çıkan emisyon, gömülü enerji ve emisyonundan çok daha yüksek olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle, kullanım aşamasındaki enerji tüketimini azaltmak için büyük bir çaba harcanmaktadır. Özellikle 21. yüzyılda yenilenebilir enerji alanındaki yenilikler ve teknolojik gelişmeler, enerji verimliliği ve enerji kullanımındaki davranışları değiştirmeye yönelik teşvikler, kullanım enerjisinde umut verici bir düşüş sunmaktadır. Ancak bu önlemler, yüksek enerji performanslı yapı malzemesi kullanımında artışa neden olmakta ve sonuç olarak yapı üretiminin başlangıcında gerekli olan enerjiyi ve karbon salınımını yükseltmektedir. Bu yükseliş, gömülü (embodied) enerjinin, yapının toplam yaşam döngüsü içerisindeki giderek artan önemini açıklamaktadır (Ibn-Mohammed vd., 2013: 233). Kullanım ömrü 80-100 yıl olan ortalama bir teknik ile inşa edilmiş yapıda kullanım enerjisi gömülü enerjiyi oldukça önemsiz

birakabilmektedir (Şekil 1) (King, 2017: 12). Küresel sıcaklığın 2°C'nin altında tutulma hedefini gerçekleştirmek için yapı sektörü kaynaklı karbon emisyonlarının ortadan kaldırılmasında son tarih olarak 2050 yılı belirlenmiştir. Bu nedenle gömülü enerji ve emisyon değerleri görece çok daha önemli olmaktadır.



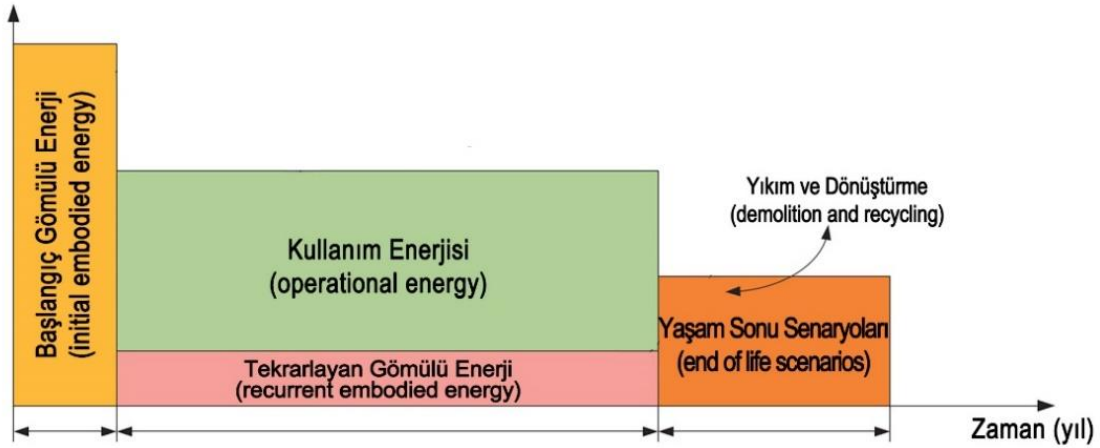
Şekil 1. Ortalama bir yapı için gömülü (embodied)-kullanım (operational) enerji kıyaslaması (King, 2017: 12)

2015-2050 yılları arası dünya genelinde iki trilyon m²'den fazla yeni yapı üretimi ve büyük yenileme çalışmaları gerçekleşmesi beklenmektedir. Yapılı çevreden kaynaklı karbon salınımı azaltılacaksa ve Paris İklim Anlaşması hedeflerine ulaşılabilecekse, yukarıda değinilen iki trilyon m²'lik alanın nasıl tasarlanacağı, gömülü enerji-karbon değerlerinin nasıl belirleneceği kilit bir rol üstlenecektir. İhtiyatlı bir tahminle tüm bu yeni binalar şu anki tipik yapılara göre iki kat daha verimli olduğu varsayılsa bile, şu andan 2050'ye kadar enerji profilinin %80-90'ının gömülü enerjiden oluşması muhtemel görünmektedir. Bu durum kullanım enerjisinin önemsiz olduğu anlamına kesinlikle gelmemektedir. Ancak, kullanım enerjisini devamlı olarak azaltmaya çalışan bina yönetmelikleri (building codes), kullanım enerjisinin sıfır salınımlı olmasını isteyen girişimler (Passive House, Green Building, Net-Zero Building, nZEB vb) devamlı olarak gömülü enerjiyi arttırmaktadır. Dolayısıyla bu tür çalışmaların sonucunda, kullanım enerjisi oranı, toplam yaşam döngüsünde azalırken, gömülü enerjinin oranı daha da fazlalaşacaktır (Şekil 2) (Chastas, Theodosiou ve Bikas, 2016: 272).



Şekil 2. Gömülü ve kullanım enerjisinin farklı yapı alternatiflerine göre kıyaslanması (Chastas, Theodosiou ve Bikas, 2016: 272)

Kullanım enerjisi (operational energy), binaların yaşam süresi boyunca kullanımı ile ilgili bütün faaliyetleri kapsamaktadır. Bu faaliyetler; yapıların ısıtma ve soğutma, aydınlatma ve cihazlar, havalandırma ve klima gibi işletme süreçleri ile konfor koşullarının ve günlük bakımının sürdürülmesi gibi enerji yoğun eylemler olarak tanımlanmaktadır (Ramesh, Prakash ve Shukla, 2010: 1594). Kullanım enerji tüketimi, nihai kullanıcılara ve iklim şartlarına bağlı değişirken, gömülü enerji bu faktörlere bağlı değildir. Aksine, gömülü enerji, yapı malzemesinin oluşumunda bulunmaktadır. Büyük oranda kullanılan malzeme türüne, birincil enerji kaynaklarına ve yapı malzemesi üretim süreçlerindeki dönüşüm verimliliğine bağlı olmaktadır (Venkatraj vd., 2020: 110340-4). Geleneksel yaklaşımda gömülü enerji, kullanım enerjisiyle karşılaştırıldığında küçük bir büyüklükte olmasından dolayı toplam yaşam döngüsü içerisinde değerlendirilmesi çoğunlukla isteğe bağlı kalmıştır (Şekil 3) (Ibn-Mohammed vd., 2013: 235). Enerji tasarruflu ekipman ve cihazlar, daha yüksek niteliklere sahip yalıtım malzemeleri, bina kabuk tasarımındaki iyileştirmeler, azaltılmış hava geçirgenliği, düşük enerjili aydınlatma, ısı geri kazanım sistemleri, yenilenebilir enerji kaynakları gibi teknolojik gelişmeler kullanım enerjisini düşürme potansiyelini arttırmıştır (Gustavsson ve Joelsson, 2010: 215). Bu nedenle, gömülü enerji sürdürülebilir mimari içerisinde büyük ilgi kazanmıştır. Mevcut çalışmalar gömülü enerjinin toplam yaşam döngüsü emisyonunu azaltmak için bina enerji analizlerine dahil edilmesi yönünde değişmektedir.



Şekil 3. Bir binanın yaşam döngüsü boyunca enerji kullanım oranları (Ibn-Mohammed vd., 2013: 235)

Gömülü enerji çeşitli nedenlerden dolayı yapıların tasarımında önemli bir bileşendir. Preservation Green Lab. tarafından, 75 yıllık bir kullanım ömrü dikkate alınarak yapılan bir araştırmada, binaların yıkılarak yeniden inşa edilmesi yerine yapı elemanları ve bileşenleri bağlamında enerji verimliliğinin artırılarak kullanılmasının çevresel faydaları araştırılmıştır. Bu çalışma, bina çevresel kazanımının enerji verimlilik seviyesine, bina türüne ve bulunduğu konuma bağlı olarak %4 ve %46 arasında değişebileceğini ortaya koymuştur (Kneifel vd., 2018: 26). Bununla birlikte, gömülü enerji araştırma sahası hala büyük oranda keşfedilmemiş bir alandır. Gömülü enerji ile ilgili mevcut çalışmaların çoğu; tutarsız ve detaylı olmayan yöntemlere, yetersiz veri düzeyine, teknolojik ve coğrafi göstere eksikliğine, sonuçların genelleştirilmesi gibi sorunlara maruz kalmaktadır. Fakat mevcut bilimsel çalışmalar yapıların yaşam döngüsü süreci boyunca enerji kullanımındaki kullanım enerjisi ile karşılaştırıldığında, gömülü enerjinin artan önemini net bir biçimde ortaya çıkarmaktadır (Ramesh, Prakash ve Shukla, 2010: 1596).

Özellikle 2010'lu yılların başından itibaren gömülü enerji kavramı artık sürdürülebilirlik tartışmalarının bir parçası olmuştur. Ancak, yapı yaşam döngüsü enerji analizlerine dahil edilmesiyle birçok avantajın sağlanabileceği gömülü enerji ve emisyon hesaplamalarının, mimari tasarım süreciyle birleştirilmesine yönelik teşvik edici düzenlemeler yapılmamaktadır (Hamilton-MacLaren, Loveday ve Mourshed, 2009: 1012). Bu durumun nedenleri olarak; metodolojik zorluklar, gömülü enerji ve karbon salınımı ile ilgili yasal düzenleme eksikliği ve hem kamunun hem de özel sektörün gömülü enerji kavramını incelemeyen yaklaşımı gibi faktörler ifade edilmektedir. Bunlara ek olarak, sayısal hale getirmek için gerekli uzun ve kapsamlı veri toplama süreci, gömülü enerjinin hesaplanmasını zorlaştırmaktadır. Doğru bir hesaplama için, kullanılan yapı malzemelerinin ham madde çıkarımından itibaren takip edilmesi, üretim süreçleri ve tedarik zincirleri hakkında güvenilir verilerin elde edilmesi oldukça önemlidir. Gömülü enerji hesaplamasının zorluğu ve elde edilen sonuçların değişen doğruluğu; yapının enerji değerlendirmesi ve performans analizlerinin yapıldığı karar verme sürecinde gömülü enerjinin, kullanımını çok büyük ölçüde kısıtlamaktadır (Dixit, 2017: 397). Gömülü enerjinin hesaplanmasındaki zorluklar, literatür analizinde genel olarak iki başlık altında toplanmaktadır.

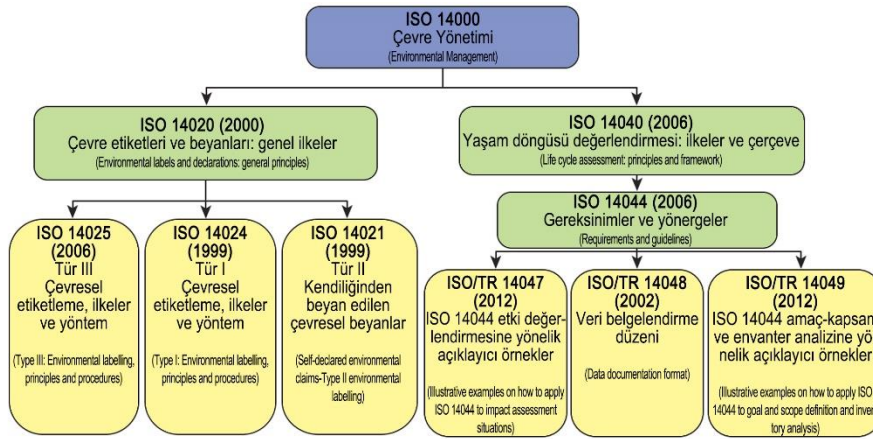
• **Veri Kalitesi (Data Quality):** Gömülü enerji ve CO2 analizindeki karmaşıklık ve belirsizlik, veri toplamadaki problemler, teknolojideki farklılıklar, malzeme üretiminde işlem adımlarının sayısı gibi durumlar veri kalitesini olumsuz etkilemektedir. Çevresel etkisine göre tercih edilmek istenilen malzemelerin veya ürünlerin gömülü enerji içeriği hakkındaki güvenilir bilgi eksikliği, emisyon tahminlerini ve harcanan enerji miktarlarını karmaşık hale getirmektedir. Sonuç olarak, gömülü enerji ve karbon emisyonları hakkındaki belirsiz bilgiler, karar verme sürecine dahil olan paydaşları etkileyen, çoğunlukla hesaplama yapmaktan alıkoyan bir durumdur (Dixit vd., 2010: 1241).

• **Analizin Karmaşıklığı (Complexity of Analysis):** Gömülü enerji ve emisyonun hesaplanmasındaki bir diğer önemli zorluk, birçok değişkenin (malzeme enerjisi, üretim süreci, ürünlerin ömrü, birincil enerji kaynakları, kimyasal işlemler, nakliye yakıt türü ve atık veya geri dönüşüm durumu) ürünlerin enerji-karbon yoğunluğunu etkilemesidir (Ayaz ve Yang, 2009). Ancak bazı ürünler (çimento, alüminyum ve cam vb.) diğerlerinden daha fazla gömülü enerji ve karbon değerine sahiptir. Dolayısıyla bir mimari tasarım için toplam karbon ayak izi yani gömülü enerji hesabı yaparken, sınırlı azaltma fırsatları sunan ve ihmal edilebilir etkiye sahip olan birçok bileşen hesaba dahil edilmeyebilmektedir (Şekil 4) (Wolf, Rodriguez-Droguett ve Simonen, 2017: 20).



Şekil 4. Yapı bileşenlerinin fonksiyonuna göre gömülü (embodied) enerjiye olan göreceli etkisi (beşikten kapağa-cradle to gate) (Wolf, Rodriguez-Droguett ve Simonen, 2017: 20)

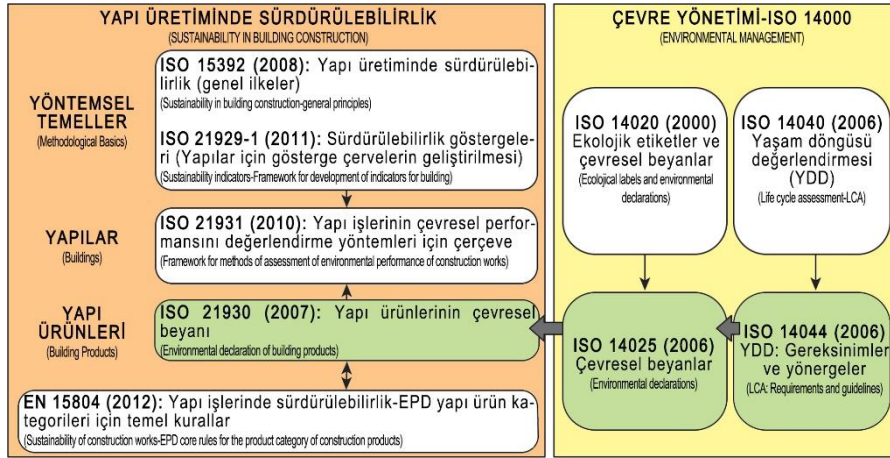
Diğer birçok endüstriyel ürünle karşılaştırıldığında yapılar, çok daha uzun hizmet ömrüne sahip olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla, oldukça uzun bir yaşam süresinin izlenmesi ve değerlendirilmesi için veri toplanması, analizlerinin yapılması ve yorumlanması önemli bir çaba gerektirmektedir. Son kullanıcıya hitap eden örneğin buzdolabı, fırın vb. ürünlerin aksine, yapı imalat süreçleri ve kullanılan malzemelerin gömülü enerji ve karbon değerlerinin daha az standartlaşmış olması, veri toplamanın önündeki en büyük engel olarak çıkmaktadır. Yapı malzemesi ve bileşenlerinin enerji ve çevresel etkilerine ilişkin kapsamlı bir veri tabanı olmaması, yapılacak bir yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) hesaplamasında, gömülü enerji verilerine göre yapıların tasarlanmasını zorlaştırmaktadır. Çeşitli ve tutarsız veriler ve analizlerin karmaşıklığından kaynaklanan bu zorluklar nedeniyle, ISO (International Organization for Standardization) 14000 serisi standartlarda genel bir çerçeve olmasına rağmen, gömülü enerjiyi doğru ve güvenilir bir şekilde hesaplamak için genel kabul görmüş bir yöntem mevcut değildir (Şekil 5) (Bovea, Ibanez-Fores ve Agusti-Juan, 2014: 127).



Şekil 5. Çevresel sertifikasyon için düzenleyici çerçeve (regulatory framework) (Bovea, Ibanez-Fores ve Agusti-Juan, 2014: 127)

Gömülü enerji hesabı emisyon azaltımı için bir hedef haline gelirse, birçok yapı malzemesi üreticisi, ürünleri ile ilişkili emisyonların ölçümlerini ve raporlamaları gerçekleştirmek zorunda kalacaktır. Bu durumda bir bütün olarak sektörün emisyonlarının değerlendirilmesi gerçekleştirilebilir. Bundan başka, yeni veya mevcut bir yapının enerji güçlendirmesine karar verilirken kullanım enerjisiyle birlikte gömülü enerjinin de bilinmesi vasıtasıyla projelerin çevresel etkileri bütünsel olarak değerlendirilebilir. Bu değerlendirmeler, makro düzeyde, gömülü ve kullanım enerjilerinden kaynaklı emisyonları hesaba katmak, dolaylı ve doğrudan emisyonları dikkate alan bir enerji ekonomisi oluşturmak için gereken verilere ve bilgilere katkıda bulunacaktır. Aynı zamanda, güçlü (nispeten doğru ve eksiksiz) ve güvenilir gömülü enerji-emisyon veri tabanının geliştirilmesini ve kullanılabilirliğini de kolaylaştıracaktır. Güçlü ve güvenilir veri tabanlarının mevcudiyeti, küresel olarak kabul gören bir protokole dönüştürülecek kılavuzların ortaya çıkmasına da yardımcı olacaktır. Yapı malzemelerinin gömülü enerji içeriğinin daha iyi bilinmesi, yalnızca düşük enerjili-emisyonlu malzemelerin değil, aynı zamanda yapı tasarımcıları arasında enerji kullanımı ve CO₂ emisyonlarını azaltma tercihlerini de teşvik edecektir (Shirazi ve Ashuri, 2020: 3). Çevresel faydalarına ek olarak yeni yapı üretimleri veya mevcut yapıların enerji verimliliğinin artırıldığı iyileştirme-güçlendirme çalışmalarında gömülü enerji-emisyonların dikkate alınması,

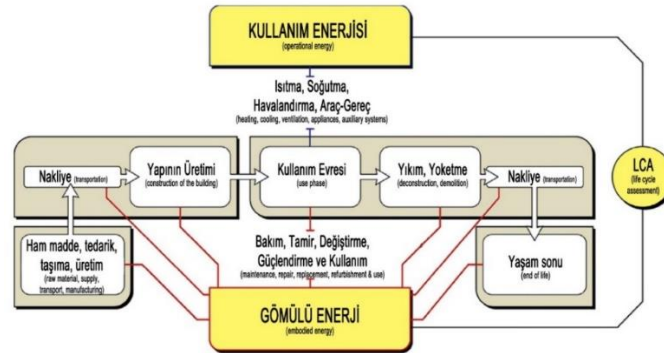
yapı stokunun sürdürülebilir gelişimine önemli katkılar sağlayacaktır (Şekil 6) (Bovea, Ibanez-Fores ve Agusti-Juan, 2014: 127).



Şekil 6. Yapı üretiminde sürdürülebilirlik ve çevresel sertifikasyonun yasal çerçeveleri ve birbiriyle olan etkileşimi (Bovea, Ibanez-Fores ve Agusti-Juan, 2014: 127)

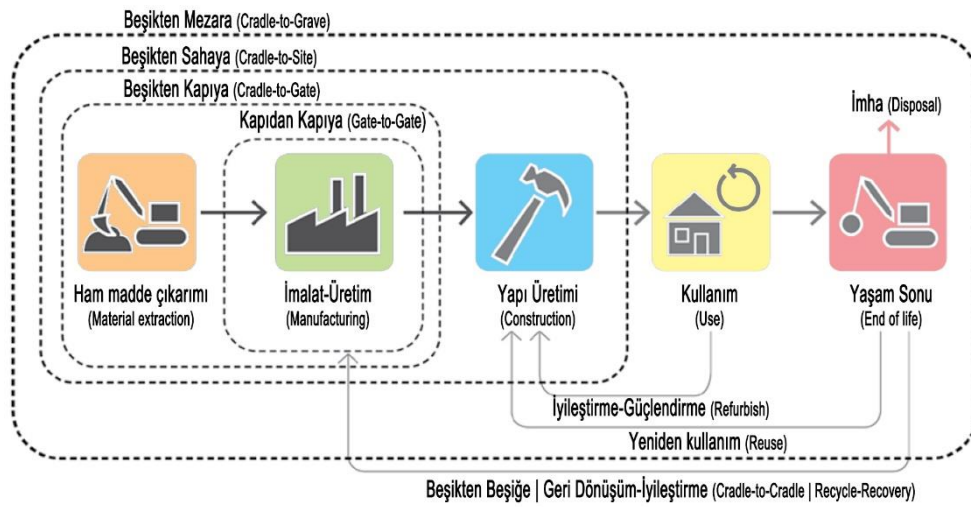
3. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ (YDD) YÖNTEMİ KAVRAMI VE YAPILARDA GÖMÜLÜ-KULLANIM ENERJİSİYLE İLİŞKİSİ

Yapıların sadece kullandıkları enerji açısından değil, aynı zamanda kaynak tüketimi yönünden de performanslarının optimizasyona ihtiyacı bulunmaktadır (Srinivasan vd., 2014: 140). Sürdürülebilirliği sağlamak için hem gömülü enerjinin hem de kullanım enerjisinin ve bunlardan kaynaklanan emisyonların değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Yaşam döngüsü değerlendirilmesi (YDD) yöntemi, ürünlerin yaşam döngüsü boyunca kullanmış olduğu kaynakları ve bunlardan oluşan etkilerin hesabında kullanılmaktadır (Kovacic, Reisinger ve Honic, 2018: 1176). Bir yapının toplam gömülü enerji-karbon değerlendirmesi genellikle YDD yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. YDD; kullanılan malzeme, enerji miktarı ve türleri, üretim süreçleri ile ilgili kimyasal reaksiyonlar hakkındaki verileri, bu işlemlerin her biri için emisyon değerleri ile entegre eden bir hesaplama metodolojisi olarak ifade edilmektedir (Şekil 7) (Chastas, Theodosiou ve Bikas, 2016: 269) (Wolf, Rodriguez-Droguett ve Simonen, 2017: 19). YDD, gömülü enerji-karbon verilerinin yanı sıra, ozon tabakasının incelmeye, duman oluşumu, su kirliliği ve insan sağlığına toksisite oluşturan etmenler gibi bir dizi başka çevresel etkiye de tanımlanmaktadır.



Şekil 7. Yaşam döngüsü içerisinde gömülü (embodied)-kullanım (operational) enerji evreleri ve birbiriyle olan ilişki şeması (Chastas, Theodosiou ve Bikas, 2016: 269)

Gömülü enerji hesabına dahil olan yaşam döngüsü evrelerinin sınırlarının belirlenmesi, hesaplama faaliyetlerinin yapılabilmesi için oldukça önemlidir. Özellikle bir üst bölümde belirtilen veri kalitesi ve analizin karmaşıklığı kavramları hesaplamayı zorlaştırmaktadır. Devamlı olarak gelişen YDD yöntemi içinde, yaşam döngüsünü oluşturan aşamalar belirli isimlerle tanımlanmaktadır. Ham maddenin çıkarılması ve üretim tesisindeki faaliyetleri hesaplayarak elde edilen gömülü enerjiye “beşikten kapıya” (cradle-to-gate) adı verilmektedir. Bu aşamanın üzerine, ham maddenin inşaat sahasına teslim edilmesi dahil edildiğinde, yani taşıma sırasından oluşacak gömülü enerji de eklenirse “beşikten sahaya” (cradle-to-site) biçiminde ifade edilmektedir. Yapının yıkılmasıyla elde edilen ham maddenin yeniden kullanım, geri dönüşüm, geri kazanım gibi ortaya çıkabilecek faydaların analizlere dahil edildiği aşamaya ise “beşikten beşiğe” (cradle-to-cradle) olarak literatürde yer almaktadır (Şekil 8) (Wolf, Rodriguez-Droguett ve Simonen, 2017: 24).



Şekil 8. Bir yapının yaşam döngüsünün evreleri ve birbiriyle olan ilişkisi (Simonen, 2017: 22)

YDD aşamalarının birçok değişkeni göz önünde alındığında, ürünlerin birbirleriyle kıyaslanabilmesi, gömülü enerji analizinin yapılabilmesi için net bir standart tanımlanması gerekmektedir. Bu standartların oluşturulmasına yönelik bazı ülkeler, farklı malzeme üreticilerinin gönüllü katkılarına dayalı olarak ulusal Çevresel Ürün Beyanı (EPD- Environmental Product Declaration) veri tabanı başlatarak karşılık vermiştir. Buradaki amaç, en önemli ürünlerin çevresel etkileri, oluşumlarında harcanan enerji seviyeleri ve karbon salınımlarının açık ve şeffaf olarak bilinmesinin sağlanmasıdır. ISO, çevresel ürün beyanlarının aynı çerçeveyi takip etmesini sağlamak için bir yaklaşım geliştirmiştir. Yapı malzemeleri endüstrisi yavaş yavaş bölgesel EPD değerleri üreterek küresel bir veri tabanı oluşturmaktadır. Henüz başlangıç seviyesinde olan bu çalışma ile veri kalitesi olumlu yönde evirilmektedir.

Kullanım enerjisi hesaplaması ile karşılaştırıldığında, gömülü enerji hesaplaması daha yüksek derece belirsizlik içermektedir. Bu belirsizlikler, zamansal ve coğrafi olarak değişebilmekle birlikte aynı zamanda verilerin elde edilmesinde kullanılan metodoloji ve veri kaynak tutarsızlığının bir kombinasyonundan meydana gelmektedir. Genel olarak gömülü enerji hesabında kullanılan üç ana yöntem bulunmaktadır. Bunlar, ‘Süreç Tabanlı YDD’ (process-based LCA), ‘Ekonomik Girdi-Çıktı Tabanlı YDD’ (economic input-output based LCA) ve ‘Karma YDD’ (hybrid LCA) başlıkları altında toplanmıştır. Bu yöntemler yalnız gömülü

enerjinin hesaplanmasında değil, bütün yaşam döngüsüne ait çevresel etkilerini ölçmek için de kullanılabilir.

• Süreç Tabanlı YDD (process-based LCA): Süreç tabanlı yöntem; hammadde çıkarımını, üretim safhalarını, elde edilen ürünün sahaya nakliyesini, yapım faaliyetlerini, bakım-onarım işlemlerini ve yıkımına kadar bir binanın yaşam döngüsünün her adımında kullanılan enerji türü ve miktarını hesaplayabilen, gömülü enerji hesaplaması için güçlü bir metodolojidir. Kullanım enerjisi bu hesaplama yöntemine dahil edilmemiştir. Süreç tabanlı YDD, ISO 14040 ve 14044 standartlarında belirlenmiş olan dört farklı aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu dört farklı aşamadan elde edilen sonuçlar bir araya getirilir ve yapının gömülü enerjisini temsil eden tek bir değer, sayı olarak GJ, MJ veya kWh birimleri üzerinden ifade edilmektedir. Süreç tabanlı YDD, karşılaştırma (comparison) veya kıyaslama (benchmarking) amacıyla kullanılabilen, binaya özgü gömülü enerji sonuçları üretebilen bir metodolojidir. Ancak bu metodoloji, veri odaklı ve oldukça zaman alıcıdır. Süreç tabanlı YDD metodolojisindeki en büyük zorluk, daha büyük sistem sınırları tanımlandığında veri toplama ve analiziyle ilgili karmaşıklık ve belirsizlik seviyesinin büyüklüğüdür (Azari ve Abbasabadi, 2018: 227). Sonuç olarak, genellikle süreç tabanlı YDD çalışmaları için dar bir sistem sınırı belirlemek gerekmektedir. Bu durumda tedarik zincirindeki bazı kısımların hesaplama dışı bırakılmasını zorunlu kılar. Dolayısıyla gömülü enerji hesabı olduğundan daha az bir değerle tahmin edilmektedir (Fuertes, 2017: 433).

• Ekonomik Girdi-Çıktı Tabanlı YDD (economic input-output based LCA): Ekonomik girdi-çıkı tabanlı YDD yöntemi, süreç tabanlı YDD'nin sınırlamalarını ele almak için geliştirilmiştir. Bu yöntem, ABD Ticaret Bakanlığı tarafından bildirilen ABD ekonomisinin yıllık girdi-çıkı (input-output) modellerini kullanarak üretilmiştir. Ekonomik girdi-çıkı tabanlı YDD yönteminin en büyük avantajı, daha geniş ve temsili sonuçlara yol açan bütün bir ekonominin genişletilmiş sistem sınırlarıdır. Uluslararası literatürde yapılan çalışmalarda, ekonomik girdi-çıkı tabanlı YDD metodolojisinin kullanıldığı çalışmalarda elde edilen gömülü enerji hesap değeri, süreç tabanlı YDD ile elde edilenden %90'a kadar farklılaşan değerlerde fazla çıkabilmektedir. Bu sonucun elde edilmesindeki en önemli faktör, yöntemlerin sistem sınırlarından kaynaklanmaktadır. Daha dar sınırları ve hesap yoğun bir metodoloji olan süreç tabanlı YDD daha düşük değer vermektedir. Ekonomik girdi-çıkı tabanlı YDD ile elde edilen sonuçlar bina veya ürün özelinde olmaktan ziyade sektör özelinde gerçekleşmektedir. Bu metodoloji ile örneğin, bir ülkedeki konut üretim faaliyetlerinin tümünün girdi-çıkı değerleri elde edilebilirken, özgün coğrafi koşullara sahip, tasarım ve yapım sistemleri farklı olan bina varyasyonlarının hesaplanabilmesi mümkün olmamaktadır (Azari ve Abbasabadi, 2018: 228).

• Karma YDD (hybrid LCA): Bu metodoloji ise, süreç tabanlı YDD ve ekonomik girdi-çıkı tabanlı YDD yöntemlerin birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Karma YDD aracılığıyla, süreç tabanlı ve ekonomik girdi-çıkı tabanlı yaklaşımların eksiklikleri giderilmeye çalışılmıştır. Süreç tabanlı YDD'nin yorucu ve zaman alıcı yapısı ve ekonomik girdi-çıkı tabanlı YDD'nin çok geniş ve genelleyici yaklaşımları bir araya getirilerek genel bir yaklaşım oluşması hedeflenmiştir. Bu metodolojide süreç tabanlı YDD verileri güvenilir ve eksiksiz bilginin mevcut olduğu bir aşamaya kadar kullanılır. Süreç tabanlı YDD yöntemiyle verileri elde etmenin çok zor olduğu aşamada, analizi tamamlamak için ekonomik girdi-çıkı tabanlı YDD devreye girerek ihtiyaç duyulan veriler elde edilmektedir (Guan, Zhang ve Chu, 2016: 447). Dünyada ve ülkemizde önemi gün geçtikçe artan YDD analizleri, özellikle gömülü enerjinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Farklı hesaplama metodolojilerinin ürettiği sonuçlar da farklı olabilmektedir. Ancak gerçeğe yakın daha iyi sonuçlar elde edilmek için hala bilimsel faaliyetler devam

etmektedir. Aşağıda söz konusu üç farklı yöntemin tanımlamaları, avantaj, dezavantajları ve hesaplama araç-veri tabanları özet olarak çizelge şeklinde ifade edilmektedir (Çizelge 1) (Azari ve Abbasabadi, 2018: 229).

Çizelge 1. YDD hesaplama metodolojilerinin karşılaştırılması (Azari ve Abbasabadi, 2018: 229)

Süreç tabanlı YDD (process-based LCA) metodolojisi	
Tanımlama	<ul style="list-style-type: none">Yapı yaşam döngüsünün çeşitli aşamalarında kullanılan enerji türlerini ve miktarlarını takip ederek bir araya getirir.Amaç sadece gömülü (embodied) enerji hesabı olduğu zaman kullanım (operational) enerjisiyle ilişkili aşamalar hesaba dahil edilmez.
Avantajları	<ul style="list-style-type: none">Yapı sektörüne özel gömülü (embodied) enerji sonuçları üretir.Yapıların karşılaştırılmasına imkân tanır.Yüksek gömülü (embodied) enerjiye sebep olan etmenler belirlenebilir ve bu durumun iyileştirilmesi mümkündür.
Dezavantajları	<ul style="list-style-type: none">Kapsamlı veri tabanı gerektirir.Yoğun zaman alıcıdır.Çoğu zaman belirsizliğin giderilebilmesi için farklı kaynaklardan verilerle birleştirilmek zorundadır.Dar sistem tanımlaması sonucu hesap dışı kalan veriler bulunur.
Hesaplama araçları ve veri tabanları	<ul style="list-style-type: none">Athena IE (North America)-AusLCI (Australia)-CMLCA (Europe)Ecoinvent (Europe)-ELCD (Europe)-GaBi (US, Europe)Inventory of Carbon and Energy (UK)- Korean LCI (Korea)Okobaudat (Germany)- SimaPro (Europe, Australia)- Tally (US, Europe)
Ekonomik girdi-çıkıtı tabanlı YDD (Economic input-output based LCA) metodolojisi	
Tanımlama	<ul style="list-style-type: none">ABD Ticaret Bakanlığı tarafından bildirilen ekonomik verileri gömülü enerji ve diğer çevresel etkilere çevirir.Bütün bir ekonomi verileri kadar geniş bir sistem sınırı kullanır.
Avantajları	<ul style="list-style-type: none">Sektöre özel gömülü enerji üretir.Çok daha geniş kapsama sahip olan sistem sınırları vardır.Ulusal çapta gerçekleşen ticaret verilerine göre belirlenir.Daha hızlı analiz yapılmasını sağlar.
Dezavantajları	<ul style="list-style-type: none">Sektör içerisindeki değişimleri hesaba katmaz.Sektör temelli olmasından dolayı farklı yapıların kıyaslanmasına imkân vermez.Süreç iyileştirmesi mümkün değildir. Veri belirsizliği bu metodolojide de vardır.
Hesaplama araçları ve veri tabanları	<ul style="list-style-type: none">ABD ekonomi veri tabanı-eiolca.net
Karma YDD (Hybrid LCA) metodolojisi	
Tanımlama	<ul style="list-style-type: none">Yukarıdaki iki metodoloji birleştirir.
Avantajları	<ul style="list-style-type: none">Önceki yöntemlerin avantajlarını birleştirir, eksikliklerini giderir.
Dezavantajları	<ul style="list-style-type: none">Veri kaynakları ve modellerinde olası tutarsızlık ve belirsizlik.Potansiyel metodolojik tutarsızlıklar.
Hesaplama araçları ve veri tabanları	<ul style="list-style-type: none">Önceki iki yöntemde kullanılabilen araçları ve veri kaynaklarını birleştirerek hesaplama yapılmasını mümkün kılar.

4. SONUÇ

21. yüzyılda mevcut olan teknolojiyle birlikte tasarım bilgisindeki gelişmeler, çevreye duyarlı-sıfır etkili yapıların üretilmesini geçmişe kıyasla çok daha erişilebilir duruma getirmiştir. Düşük kullanım (operational) enerjisine sahip yapıların sayısının artış göstermesi, gömülü enerjinin daha fazla ilgi odağına geçmesini sağlamıştır. Daha fazla yalıtım, daha kalın yapı kabuğu, enerji verimli pencere sistemleri ve gölgeleme araçları gibi kullanım enerjisini azaltarak düşük enerjili yapı elde edilmesini sağlayan uygulamalar, gömülü enerjiyi arttırmakta ve daha fazla önem verilmesine neden olmaktadır. Yapı yaşam döngüsü boyunca enerji kullanımını azaltmak için hem gömülü hem de kullanım enerjisini dikkate alan bütünsel bir yaklaşım geliştirilmek zorundadır. Bu nedenle başta kamu kurumları olmak üzere gönüllü özel girişimler vasıtasıyla, herkesin erişebileceği şeffaflıkta, yüksek doğruluk oranına sahip yaşam döngüsü veri tabanı (life cycle inventory-LCI) oluşturulması gerekmektedir. Bu tür veri tabanları, hem yapıların gömülü enerji ve çevresel etkisinin hesaplanabilmesi hem de bu hesaplamaların yapılabilirdiği yazılımların geliştirilebilmesi için oldukça önemlidir. Özellikle son yıllarda mimari tasarımın erken aşamasında gömülü enerji ve kullanım enerjisi entegrasyonuna yönelik yazılımlar geliştirilmesine rağmen, yapı endüstrisinin farklılaşan ihtiyaçlarına yönelik çeşitli talepler devam etmektedir. Yapı sektöründe kullanılan yapı malzemeleri ve bileşenler, çok farklı ülkelerden temin edilebilmektedir. Dolayısıyla yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) veri tabanları için ihtiyaç duyulan uygun verileri takip etmek oldukça zorlaşmaktadır. Bu zorluğa ek olarak, yapı malzemesi temin edilen bazı ülkelerin tutarsız ve şeffaf olmayan bir şekilde kaydetmiş olduğu zayıf veriler, gömülü enerji sonuçlarına ciddi olarak belirsizlik katmaktadır. Bu nedenle, gömülü enerji sonuçlarının güvenilirliği, yaşam döngüsü envanter verilerinin kalitesinden etkilenmektedir.

Kapsamlı veri tabanları üzerine inşa edilmiş ve gömülü enerji hesabı için kullanılacak çok sayıda güçlü YDD hesaplama aracı (LCA estimation tools) bulunmaktadır. Bu araçların çoğu, ISO 14040 ve 14044 tarafından belirlenen süreç tabanlı (process-based) çerçeve ve yönergeleri kullanmaktadır. SimaPro, Gabi ve EcoInvent dünyanın farklı yerlerinde çeşitli ürün ve süreçlerin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi için uygun olan bu tür araçlara örnektir. Bununla birlikte, yapı endüstrisi ve inşaat sektörünün ihtiyaçlarını karşılamak için yalnızca birkaç araç özel olarak geliştirilmiştir. Örneğin Athena Etki Tahmincisi (Impact Estimator-IE), Kuzey Amerika'nın coğrafi koşullarına uygun olarak geliştirilmiş bir yapı sektörü yaşam döngüsü değerlendirme (YDD) aracıdır. YDD yazılımları, genel olarak, bilgisayar destekli tasarım ve çizim araçlarıyla (Autodesk Revit, Archicad vb.) çalışma yeteneğinin olmaması, kullanım enerji hesaplama araçları (Energy-Plus, eQuest vb.) desteği içermemesi ve de mimarlar için kullanıcı dostu olmayan ara yüzlere (interfaces) sahip olması gibi önemli kısıtlamalara sahiptir.

Gömülü enerji ve kullanım enerjisi kavramları ülkemiz yapı sektöründe, özellikle enerji verimliliği üzerine yapılan çalışmalar ile son yıllarda önem kazanmıştır. Ancak, doğası gereği karmaşık bir yapıda olan yaşam döngüsü değerlendirme (YDD) metodolojisinin yaygınlığı çok sınırlı kalmıştır. Enerjide dışa bağımlı olan yurdumuzda yoğun yapı üretimi gerçekleşmektedir. Dolayısıyla gömülü-kullanım enerjisi dengesi dikkate alınarak yapı üretilmesi önem arz etmektedir. Yapı malzemesi sektörü başta olmak üzere yapı üretimine katkı sağlayan bütün tarafların katkılarıyla üretilebilecek bir yaşam döngüsü envanteri-veri tabanı oluşturulmalıdır. Yapı üretiminde söz sahibi olan tüm paydaşlar; çevresel etki, gömülü-kullanım enerjisi, sürdürülebilirlik ve ekolojik tasarım gibi kavramlar hakkında bilinçlendirilmelidir. Bina tasarımında kullanımı devamlı olarak artan Yapı Bilgi Modellemesi

(Building Information Modeling-BIM) yazılımları aracılığıyla YDD analizlerinin yapılması ve erken tasarım evrelerinde yapının gömülü-kullanım enerjileri optimizasyonu, tasarım süreci boyunca, devamlı geri beslemeli (feed-back) olacak şekilde değerlendirilmelidir. BIM ve YDD entegrasyonuna yönelik yazılımların, ülkemiz özelinde geliştirilecek yaşam döngüsü envanteri- veri tabanı ile bütünleştirilmesi sağlanmalıdır. Yapı, tıpkı bir canlı organizma gibi, yaşam sürecinin bütün aşamalarında kontrol altında tutularak, yapının enerji tüketimi, karbon salınımı ve çevresel etkileri bilinmelidir. Ayrıca, yeni yapı üretimiyle birlikte, mevcut yapıları da aynı metodolojiyle ele alınmalıdır. AB üye ülkelerinde gerçekleştirilen TABULA (typology approach for building stock energy assessment) ve EPISCOPE (energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimization of refurbishment processes in european housing stocks) gibi projelerin benzerlerinin mevcut yapıları çevremiz kapsamında gerçekleştirilerek, gömülü-kullanım enerjisi envanter bilgisi edinilmelidir. Böylelikle, sürdürülebilir bir geleceğin planlanması kolaylıkla gerçekleştirilebilecek, enerji kazanımlarından elde edilen kapital, diğer sektörlerde değerlendirilerek ülkemiz refah düzeyine olumlu katkı sağlanacaktır.

Sonuç olarak bu makalede, uluslararası literatürde gün geçtikçe önemi artan gömülü (embodied) enerji olgusunun yapının yaşam döngüsü içerisinde, en az kullanım (operational) enerjisi kadar, önem arz ettiği vurgulanmıştır. Kullanım enerjisine yönelik gerçekleştirilen iyileştirmelerin doğrudan gömülü enerji artırarak, karbon salınımını fazlaştırdığı ifade edilmiştir. Ayrıca, gömülü (embodied) ve kullanım (operational) enerjisi kavramlarının yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) metodolojisiyle olan ilişkileri ve YDD yönteminin zorlukları ele alınarak değerlendirilmeye çalışılmıştır.

Bilgilendirme / Teşekkür

Makaleye sundukları katkılarından dolayı sayın hakemlere teşekkür ederiz.

Aksi belirtilmediği takdirde makalede kullanılan şekiller ve çizelgeler belirtilen yazarlar tarafından, belirtilen tarihte üretilmiştir.

Çıkar Çatışması Bildirimi ve Sorumluluk Bildirimi

Bu makalede araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur, olası bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Makalede belirtilen tüm görüş ve düşünceler yazarların sorumluluğundadır, bu konuda derginin sorumluluğu bulunmamaktadır.

Makalede yer alan görsellerin kullanımına dair yasal izinlerin alınması yazarların sorumluluğundadır, bu konuda derginin sorumluluğu bulunmamaktadır.

Yazar Katkı Bildirimi

Araştırmanın başlangıç fikri İlhan KOÇ ve Mehmet Oğuz DURU tarafından tasarlanmış olup metodolojiye İlhan KOÇ, Mehmet Oğuz DURU ve Sevde Gülizar DİNÇER birlikte karar vermiştir. Veriler Mehmet Oğuz DURU ve Sevde Gülizar DİNÇER tarafından derlenip tanzim edilmiş, makale bölüm içerikleri tüm yazarlar arasında müzakere edilerek çalışmaya son şekli verilmiştir.

KAYNAKLAR

Kitap

KING, B., 2017. *The new carbon architecture: Building to cool the climate*. Canada: New Society Publishers.

SIMONEN, K., 2017. *Life cycle assessment: Pocket architecture technical design series*. London: Routledge.

Kitapta bölüm

- BOVEA, M. D., IBÁÑEZ-FORÉS, V. ve AGUSTÍ-JUAN, I., 2014. 7 - Environmental product declaration (EPD) labelling of construction and building materials. İçinde: F. PACHECO-TORGAL, F. L. CABEZA, J. LABRINCHA ve A. DE MAGALHÃES, eds. *Eco-efficient construction and building materials*. Sawston: Woodhead Publishing. s. 125-150.
- WOLF, C. D., RODRIGUEZ-DROGUETT, B. ve SIMONEN, K., 2017. The new carbon architecture: Building to cool the climate. İçinde: *Chapte two: Counting carbon: What we know and how we know it*. Canada: New Society Publishers. s. 17-31.

Dergide makale

- AZARI, R. ve ABBASABADI, N., 2018. Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends. *Energy and Buildings*. 168, s. 225-235.
- CHASTAS, P., THEODOSIOU, T. ve BIKAS, D., 2016. Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review. *Building and Environment*. 105, s. 267-282.
- DIXIT, M. K., 2017. Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 79, s. 390-413.
- DIXIT, M. K., FERNÁNDEZ-SOLÍS, J. L., LAVY, S. ve CULP, C. H., 2010. Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy and Buildings*. 42, s. 1238-1247.
- FUERTES, P., 2017. Embodied energy policies to reuse existing buildings. *Energy Procedia*. 115, s. 431-439.
- GUAN, J., ZHANG, Z. ve CHU, C., 2016. Quantification of building embodied energy in China using an input-output-based hybrid LCA model. *Energy and Buildings*. 110, s. 443-452.
- GUSTAVSSON, L. ve JOELSSON, A., 2010. Life cycle primary energy analysis of residential buildings. *Energy and Buildings*. 42, s. 210-220.
- IBN-MOHAMMED, T., GREENOUGH, R., TAYLOR, S., OZAWA-MEIDA, L. ve ACQUAYE, A., 2013. Operational vs. embodied emissions in buildings—A review of current trends. *Energy and Buildings*. 66, s. 232-245.
- KNEIFEL, J., O'REAR, E., WEBB, D. ve O'FALLON, C., 2018. An exploration of the relationship between improvements in energy efficiency and life-cycle energy and carbon emissions using the BIRDS low-energy residential database. *Energy and Buildings*. 160, s. 19-33.
- KOVACIC, I., REISINGER, J. ve HONIC, M., 2018. Life Cycle Assessment of embodied and operational energy for a passive housing block in Austria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 82, s. 1774-1786.
- RAMESH, T., PRAKASH, R. ve SHUKLA, K. K., 2010. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*. 42, s. 1592-1600.

SHIRAZI, A. ve ASHURI, B., 2020. Embodied Life Cycle Assessment (LCA) comparison of residential building retrofit measures in Atlanta. *Building and Environment*. 171 (106644), s. 1-15.

SRINIVASAN, R. S., INGWERSEN, W., TRUCCO, C., RIES, R. ve CAMPBELL, D., 2014. Comparison of energy-based indicators used in life cycle assessment tools for buildings. *Building and Environment*. 79, s. 138-151.

VENKATRAJ, V., DIXIT, M. K., YAN, W. ve LAVY, S., 2020. Evaluating the impact of operating energy reduction measures on embodied energy. *Energy and Buildings*. 226 (110340), s. 1-18.

İnternet kaynağı

AYAZ, E. ve YANG, F., 2009. *Zero carbon isn't really zero: Why embodied carbon in materials can't be ignored* [çevrimiçi]. Erişim adresi: DesingIntelligence https://www.di.net/articles/zero_carbon/ [Erişim tarihi 28 Aralık2020].

HAMILTON-MACLAREN, F., LOVEDAY, D. ve MOURSHED, M., 2009. *The calculation of embodied energy in new build UK housing* [çevrimiçi]. Erişim adresi: Loughborough University <http://orca.cf.ac.uk/id/eprint/87289> [Erişim tarihi 27 Aralık2020].

Biyografiler

İlhan KOÇ

1983 yılında İTÜ Mimarlık Fakültesi'nden mezun oldu. 1989 yılında Leicester Polytechnic'te (De Monfort Üniversitesi-İngiltere) Restorasyon programında Y. Lisans (Master of Philosophy) çalışmasını tamamladı. 2000 yılında İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Yapı Bilgisi programında Doktora çalışmasını tamamladı. 1992-2000 yılları arasında Selçuk Üniversitesi Mimarlık Bölümünde Arş. Grv. olarak, 2000-2018 yılları arasında Selçuk Üniversitesi Mimarlık Bölümünde Yrd. Doç. olarak, 2018'den beri de Konya Teknik Üniversitesi Mimarlık Bölümünde Dr. Öğr. Üyesi olarak çalışmaya devam etmektedir.

Mehmet Oğuz DURU

2011 yılında Selçuk Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümünden mezun olmuştur. 2014 yılına kadar özel sektörde çalışmıştır. 2014 yılında Selçuk Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. 2017 yılında Selçuk Üniversitesi Mimarlık Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisansını tamamlamıştır. Halen Konya Teknik Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Mimarlık Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmakta ve Doktora programına devam etmektedir.

Sevde Gülizar DİNÇER

2012 yılında İzmir Ekonomi Üniversitesi Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi Mimarlık Bölümünden mezun olmuştur. 2016 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Bilgisayar Ortamında Mimarlık Ana Bilim Dalında yüksek lisansını tamamlamıştır. Konya Teknik Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Mimarlık Bölümünde doktora programına devam etmektedir.