

TÜRK YAPI MALZEMESİ SEKTÖRÜ İÇİN GELİŞTİRİLEN YAŞAM DÖNGÜSÜ ETKİ DEĞERLENDİRME MODELİNİN SINANMASI*

Saniye KARAMAN ÖZTAŞ¹, Leyla TANAÇAN²

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, saniyekaraman@gtu.edu.tr

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, tanacan@itu.edu.tr

Özet

Dünyada hızlı nüfus artışı sonucunda çevre kirliliğinin giderek artması ve doğal kaynakların hızla tüketilmesi, yapım sektöründe “sürdürülebilir yapılar” konusunu önemli hale getirmektedir. Sürdürülebilir yapılar ile kaynakların verimli kullanılması, doğaya olan salımların azaltılması, atıkların azaltılması, iç mekân hava kalitesinin artırılması mümkün olmaktadır. Yapı malzemelerinin çevresel özelliklerinin değerlendirilmesi ise, çevreye duyarlı yapı malzemelerinin seçilmesini, sürdürülebilir yapıların üretilmesini sağlamaktadır.

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD), bir ürün ya da hizmetin tüm yaşam döngüsü içinde çevresel etkilerini değerlendirmede yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (YDED), çevresel etkilerin nicel olarak hesaplandığı YDD yönteminin üçüncü evresidir. Bu evre; bileşenlerindeki belirsizliklerinden, mevcut modeller arasındaki yaklaşım farklılıklarından dolayı YDD yönteminin en zayıf fakat en önemli bölümlerindedir. Çevresel etki değerlendirilmesinde yerel faktörler etkili olmaktadır. Bu nedenle ülkeler kendi çevresel durumlarını yansıtan YDED modelleri geliştirmektedir.

Türkiye’de YDD konusunda yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Yerel çevresel sonuçların elde edilebilmesi amacıyla Türk yapı malzemesi sektörü için YDED modelinin geliştirilmesi önemlidir. Bu çalışmanın amacı, Türkiye için geliştirilen YDED modelinin (YDED- TR) geliştirilmiş polistiren köpük ile (EPS) sınanmasıdır. Bu çalışma sonucunda, Türkiye yapı malzemesi sektörü için geliştirilen YDED- TR modeli değerlendirilmiş, modelin kullanılmasını kısıtlayan Türkiye için gerekli çevresel veri eksikliği belirlenmiş ve yerel faktörlerin YDED evresi için önemi vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: YDED, Yapı Malzemeleri, Türkiye, EPS.

VERIFICATION OF LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT MODEL DEVELOPED FOR TURKISH CONSTRUCTION MATERIALS SECTOR

Abstract

Increasing environmental pollution as a result of rapid population growth in the world and rapid natural resource depletion make “sustainable building” important in the construction industry. Sustainable buildings are achieved by efficient use of natural resources, reducing waste and improving indoor air quality. Assessment of environmental characteristics of construction materials provides selection of environmentally friendly construction materials and production of sustainable buildings.

Life Cycle Assessment (LCA) is a commonly used method for evaluating the environmental impacts caused by a product or a service during the whole life cycle. Life Cycle Impact Assessment (LCIA) is the third phase of LCA in order to quantify various environmental impacts. It is the weakest but the most important phase of LCA due to uncertainties of the components and approach differences among LCIA models. Local factors are effective in evaluating of environmental impacts. Therefore, countries create LCIA models aimed at assessing their own environmental situations.

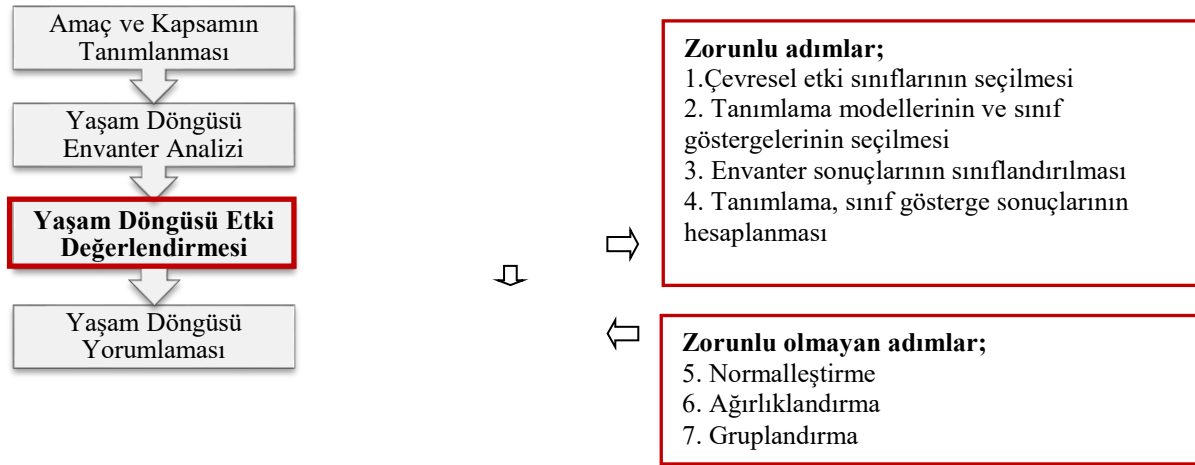
LCA studies are limited in Turkey. Developing LCIA model for Turkey is important in order to obtain local environmental results. The aim of this study was to verify LCIA model developed for Turkey by expanded polystyrene foam. As a result of this study, LCIA model for Turkey was evaluated, lack of environmental data restrict the use of the model was determined for Turkey and the importance of local factors for LCIA phase was highlighted.

Keywords: LCIA, Construction materials, Turkey, EPS.

* II. Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu ISBS-2015 de sunulmuş bildiriden üretilmiştir.

Giriş

Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (YDED), yaşam döngüsü envanter analizinden (YDE) elde edilen sonuçlara göre yapı malzemelerinin çevresel etkilerinin değerlendirildiği evredir [1]. ISO 14040 (2006)'a göre zorunlu ve zorunlu olmayan adımlardan oluşan YDED evresinde çevresel etki sınıflarının, tanımlama modellerinin ve sınıf göstergelerinin seçilmesi; envanter sonuçlarının seçilen çevresel etki sınıflarına göre düzenlenmesi (sınıflandırılma) ve tanımlama zorunlu adımlardır. Normalleştirme, ağırlıklandırma ve gruplandırma ise YDD sonuçlarının açıklanmasına yardımcı olabilen zorunlu olmayan adımlardır [2].



Şekil 1. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme Evresinin Adımları.

YDED evresinin ilk zorunlu adımı, YDD yönteminin amaç ve kapsamına uygun, çalışılan ürün sistemi ile ilgili çevresel konuları yansıtan çevresel etki sınıflarının seçilmesidir. Lijing G. ve diğerlerine (2008) göre, envanter analizleri genellikle önce orta nokta etki sınıflarına, sonra son nokta etki sınıflarına ayrılmaktadır [3]. Sınıflandırmada, envanter analizindeki salımlar ve tüketilen kaynaklar seçilen çevresel etki sınıf ya da sınıflarına göre düzenlenmektedir. Tanımlama modeli, etki sınıfları için fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerdeki çevresel işleyişi yansıtarak envanter sonuçları ile sınıf göstergesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Tanımlama modelinden türetilen dönüştürme katsayısı, her bir çevresel etki sınıfı için envanter analizi sonuçlarını ortak bir birime getirmektedir. Bu işlem dönüştürme/tanımlama olarak ifade edilmekte, eşdeğer birime getirilen salımlar toplanarak sınıf gösterge sonuçları hesaplanmaktadır [2]. Rüzgâr hızı, sıcaklık, toprağın yapısı, su derinliği gibi yerel farklılıklar etkisiyle salımın yayıldığı bölge ya da ülke çevresel etkinin büyüklüğünü değiştirebilmektedir. Bu nedenle aynı miktardaki salım miktarının etkisi bölgelere göre farklı olabilir, bu da dönüştürme katsayılarında farklılıklara neden olabilmektedir.

Her bir çevresel etki sınıfı farklı birimle ifade edilmektedir. Örneğin küresel ısınma karbon dioksit (CO₂) eşdeğeri ile ifade edilirken, asitleşme hidrojen (H), ozon tabakasının incilmesi CFC11 (kloroflorokarbon11) eşdeğeri ile ifade edilmektedir. Normalleştirmede, her bir çevresel etki sınıfı gösterge sonucu referans bir değere bölünerek tüm etki sınıfları birimsizleştirilmektedir. Ağırlıklandırma adımı, çevresel etki sınıflarının önem dereceleri modelin geliştirildiği bölge ya da ülkeye göre belirlenmektedir. Gruplandırma adımı ise, çevresel etki sınıfları düşük, orta ve yüksek öncelikli olarak derecelendirilmektedir [4].

YDED evresinde yerel faktörler etkili olmaktadır. Bu nedenle özellikle gelişmiş ülkelerde 1990'lı yılların başından itibaren farklı YDED modelleri geliştirilmektedir. Seçilen bu modellere bağlı olarak, farklı çevresel performans değerleri elde edilmektedir [5]. Mevcut YDED modellerinde esas alınan yaklaşım modeli; çevresel etki sınıflarının nicelik ve türü; tanımlama modelleri ve sınıf göstergeleri; normalleştirme referans değeri; ağırlıklandırma yöntemleri ve ağırlıklandırma katsayıları açısından farklılıklar olduğu görülmektedir.

- Dünyada ve Türkiye’de giderek artan çevre sorunları ve yapı malzemesi sektörünün çevre üzerindeki etkisi;
- YDED evresinin ISO 14040 standardında belirtilen zorunlu ve zorunlu olmayan adımlarındaki belirsizlikler;
- Yerel faktörlerin YDED evresi için önemi;
- Mevcut YDED modellerindeki farklılıklar;
- Türkiye’de bu konuda çalışmaların yetersizliği ve yerel verileri dikkate alan bir YDED modelinin bulunmaması gibi nedenlerle geliştirilen YDED- TR modelini değerlendirmek amacıyla bu çalışmada, modelin Türkiye’de ısı yalıtımında yaygın olarak kullanılan geliştirilmiş polistren köpük (EPS) üzerinde sınanması amaçlanmıştır. EPS’nin “beşikten kapıya” olarak tanımlanan hammaddenin çıkarılması ve malzeme üretim alanına ulaştırılması, EPS’nin üretimi, paketlenmesi ve inşaat alanına ulaştırılmasını kapsayan yaşam döngüsü süreci esas alınmıştır. Birçok YDED modeliyle sonuçların değerlendirilmesine olanak tanıyan “SimaPro” YDD aracı kullanılarak EPS üretim sürecindeki çevresel sonuçlar modeller arasında karşılaştırılmıştır.

Türk Yapı Malzemesi Sektörü İçin Önerilen YDED Modeli (YDED- TR)

YDED- TR modeli olarak, envanter analizinden gelen verilerin doğrudan küresel ısınma, asitleşme gibi orta nokta etki sınıflarına düzenlenerek çevresel hesaplamaların bu noktalarda yapıldığı ve modeldeki belirsizliklerin son nokta yaklaşım modellerine göre daha az olduğu “orta nokta yaklaşım modeli” esas alınmıştır. Bu yaklaşıma “problem odaklı yaklaşım” da denilmektedir. Orta nokta yaklaşımının, bu konularda sınırlı sayıda çalışmaların olduğu Türkiye’de bir başlangıç olacağı düşünülmektedir.

Son nokta yaklaşım modellerinde ise çevresel hesaplamalar kaynakların tüketilmesi, insan sağlığına zarar ve ekosistemin zarar görmesi gibi son nokta etki sınıfları için yapılmaktadır. Bu yaklaşım ise “hasar odaklı yaklaşım” olarak ifade edilmektedir [6]. Son nokta yaklaşım modelleri daha kapsamlı bir çevresel modellemeyi gerektirmekte ve modeldeki belirsizlikleri artırmaktadır. Bu nedenle YDED- TR modeli için orta nokta yaklaşım modelinin seçilmesinin ve ileride yapılacak son nokta yaklaşım modelleriyle YDED modellerinin geliştirilmesinin uygun olacağı düşünülmüştür. YDED- TR modelinde orta nokta yaklaşım modeline göre çevresel etki sınıfları seçilmiştir. Bu sınıflar;

- Mevcut YDED modelleri,
- Türkiye'nin de yükümlü olduğu Avrupa Yapı Malzemeleri Yönetmeliği'nin yapı malzemeleri için EN 15804 standardı [7],
- Yapı malzemelerinin yaşam döngüsü sürecinde neden oldukları çevresel etkiler,
- Türkiye’deki çevresel sorunlar göz önünde bulundurularak seçilmiştir (Çizelge 1).

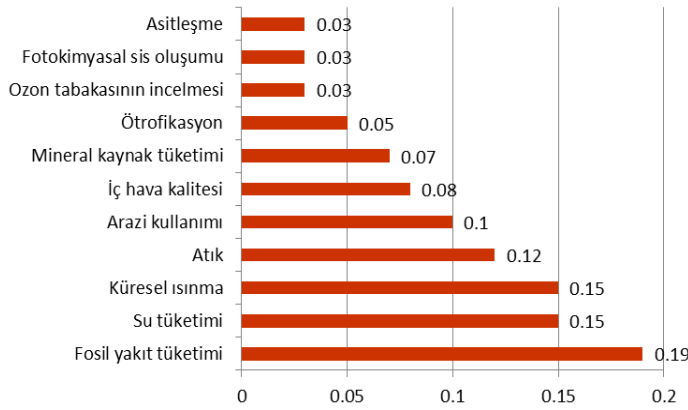
Çizelge 1. YDED-TR modelinde seçilen çevresel etki sınıfları.

Girdilerle ilgili çevresel etki sınıfları	
<ul style="list-style-type: none"> • Mineral kaynak tüketilmesi • Fosil yakıtların tüketilmesi • Su tüketilmesi • Arazi kullanımı 	
Çıktılarla ilgili çevresel etki sınıfları	
<ul style="list-style-type: none"> • Küresel ısınma • Ozon tabakasının incelmeleri • Ötrofikasyon • Fotokimyasal sis oluşumu • Asitleşme • İç hava kalitesi • Atık 	Salımların neden olduğu etki sınıfları

Küresel ısınma, ozon tabakasının incelmeleri, asitleşme, ötrofikasyon ve fotokimyasal sis oluşumu için EN 15804 standardının esas aldığı tanımlama modelleri ve sınıf göstergeleri seçilmiştir. Fosil yakıt tüketimi, mineral kaynak tüketimi, su tüketimi ve atık sınıfları için YDE analizinden gelen verilerin toplamını esas alan “envanterlerin

doğrudan kullanımı yaklaşımı” seçilmiştir. Bu sınıflar için Türkiye İstatistik Kurumu’nun (TÜİK) çevresel konularla ilgili veri tabanı göz önünde bulundurulmuştur. Sınıflandırmada YDE analizi sonucunda elde edilen, yapı malzemelerinin yaşam döngüleri boyunca sebep oldukları salımlar, tüketilen kaynaklar ve atıklar seçilen çevresel etki sınıflarına göre düzenlenmiştir.

YDED- TR modelinde, her bir çevresel etki sınıfı için bir Türk vatandaşının toplam çevresel etkisi normalleştirme değeri (NF- Normalization Factor) olarak seçilmiştir. TÜİK, çalışmanın yapıldığı 2013 yılı için Türkiye’nin nüfusunu 76667864 kişi olarak belirtmektedir [8]. Her bir etki sınıfı için TÜİK verilerine göre 2013 yılı için belirlenen toplam çevresel etki, Türkiye nüfusuna bölünerek kişi başına düşen etki hesaplanmıştır. YDED- TR modelinde seçilen çevresel etki sınıflarının ağırlıklandırma katsayılarının (WF- Weighting Factor) belirlenmesinde panel yöntemi kullanılmıştır. Anket, karşılıklı görüşme ya da grup tartışmalarıyla yapılabilen panel yönteminde, çevresel etki kategorilerinin önem derecelerinin belirlenmesi amacıyla farklı paydaşları temsil eden uzman bir grup oluşturulmaktadır. Bu çalışmada, panelistler, üniversitelerin çevre mühendisliği bölümlerindeki akademisyenlerden, devlet kurumlarından (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Çevre Koruma Müdürlüğü, Deniz ve Atık Hizmetleri Müdürlüğünden, TUBITAK Marmara Araştırma Merkezi Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü) ve Türk yapı malzemesi sektöründeki çevre uzmanlarından oluşturulmuştur. Karşılıklı görüşmeler sonucunda yapılan çalışmanın değerlendirilmesinde ise çoklu karar analizi olan “Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)” yöntemi esas alınmıştır. AHP’nin en büyük avantajlarından biri karar alıcıların tutarsızlık ve rastgele oluşturulmuş dizin oranını “tutarsızlık katsayısı” olarak hesaplamasıdır. Bu katsayı, karar alıcının yargılarının tutarlı ve nihai kararının iyi yapılmış olduğunu göstermesi açısından önemlidir. 11 çevresel etki sınıfının ağırlıklandırma katsayıları AHP yöntemine olanak tanıyan ve analiz sırasında panelistlerin tutarsızlık katsayısını veren “Super Decisions” programı kullanılarak hesaplanmıştır [9] (Şekil 2).



Şekil 2. YDED- TR için hesaplanan ağırlıklandırma katsayıları.

YDED- TR modelinde toplam çevresel performans değerini hesaplamak için ISO 14040 standardını esas almasından, normalleştirme ve ağırlıklandırma adımını içermesinden dolayı yapı malzemesi sektörü için geliştirilmiş bağıntı [10] kullanılmaktadır. Bu bağıntı sayısal olarak ifade edilmese de ISO 14044’de (2006) yer almaktadır. Bağıntıya göre;

$$\text{Toplam Çevresel Değ}_j = \sum_{k=1}^p \text{EDDeğeri}_{jk} \quad (1)$$

Farklı j yapı malzemelerinin toplam çevresel performans değeri için; p çevresel etki sınıf sayısı; k çevresel etki sınıfı, EDDeğeri_{jk} ise ağırlıklandırılmış ve normalleştirilmiş etki değeridir. Ağırlıklandırılmış ve normalleştirilmiş etki değeri aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (2).

$$\text{EDDeğeri}_{jk} = \frac{\text{ED}_{jk} \times \text{WF}_k}{\text{NF}_k} \quad (2)$$

ED_{jk} ham etki değeri; WF_k k çevresel etki sınıfı ile ilgili ağırlıklandırma katsayısı; NF_k ise k çevresel etki sınıfı ile ilgili normalleştirme değeridir. Farklı j yapı malzemeleri için k çevresel etkisi ile ilgili ham etki değeri aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (3).

$$\text{ED}_{jk} = \sum_{i=1}^n I_{ij} \times \text{CF}_i \quad (3)$$

n, k çevresel etki sınıfı ile ilgili salım sayısı; i, salım; Iij farklı j yapı malzemeleri için i salımıyla ilgili YDE analizinden gelen kg cinsinden salım miktarı; CFi ise i salımını sınıf göstergesi referans salımına dönüştürme katsayısıdır.

YDED- TR Modelinin Denenmesi

Genleştirilmiş polistren köpük (EPS); polistrenin genleştirilmesiyle veya polistrenin diğer kopolimerlerinden oluşan taneciklerinin kalıplara konularak şişirilmesi ile üretimi gerçekleştirilen, içi hava dolu kapalı hücre yapısına sahip rijit hücresel plastik malzemedir.

Yöntem

Bu çalışmada, YDE ile ilgili Türkiye'ye özgü verilerin henüz oluşturulmamış olmasından dolayı Sylvatica tarafından Kanada'ya ait Athena Sürdürülebilir Malzemeler Enstitüsü'ne (Athena Sustainable Materials Institute) hazırlanmış olan yapı malzemelerinin envanter analizini içeren rapordan [11] alınan veriler kullanılmıştır (Çizelge 2).

Çizelge 2. EPS için envanter verileri [11].

YDE analizi sonuçları	Birim	1 kg EPS için sonuçlar
Enerji	Doğalgaz	MJ 39.30
	Elektrik (fosil) kaynaklı	MJ 0.845
	Petrol	MJ 61.10
Kaynak tüketimi	Kömür	MJ 5.01
	Boksit	g 1.21
	Kil mineralleri	g 4.18
	Demir (cevhre)	g 0.946
	Kireçtaşı	g 2.31
	Su	kg 30.60
	CO ₂	g 3590
Havaya salımlar	CO	g 9.68
	C _x H _y	g 20.60
	HCl	g 0.07
	Toz	g 3.61
	Ağır metaller	g 0.09
	HF	g 0.002
	NO _x	g 18.70
	SO _x	g 20.90
	H ⁺ asitler	g 0.048
	Bivokimvasal oksijen	g 0.228
Suya salımlar	Kimyasal oksijen ihtiyacı	g 1.32
	Cl ⁻	g 3.96
	C _x H _y	g 0.118
	Deterjan/yağ	g 0.077

	Çözünmüş organikler	g	0.055
	Çözünmüş katı maddeler	g	0.176
	Metalik ivonlar	g	0.385
	Na	g	0.693
	NH ₄	g	0.015
	Sülfat	g	0.132
	Katı maddeler	g	1.31
	Kimyasal atık	g	10.03
Atık	Endüstriyel atık	g	3.52
	Cüruf/ kül	g	9.24
	Mineral atık	g	48.30

Öncelikle veri tablosunda belirtilen girdi ve çıktılar, Türkiye için seçilmiş 11 çevresel etki sınıfına düzenlenmiştir (Çizelge 3). Ozon tabakasının incelenmesi, arazi kullanımı ve iç hava kalitesiyle ilgili envanter verileri raporda belirtilmediğinden değerlendirme 8 çevresel etki sınıfı için yapılmıştır.

Çizelge 3. EPS envanter verilerinin YDED- TR modelinde seçilen etki sınıflarına göre düzenlenmesi.

Çevresel etki sınıfları	Envanter verileri
Küresel ısınma	CO ₂
Fosil yakıt tüketimi	Doğalgaz, petrol, kömür, elektrik
Asitleşme	SO ₂ , NO _x , HCl, HF
Atık	Kimyasal atık, endüstriyel atık, cüruf/ kül, mineral atık. Suya bırakılan atıklar; deterjan- yağ, çözünmüş organikler, çözünmüş katı maddeler, katı maddeler
Su tüketimi	Su miktarı
Mineral tüketimi	Boksit, kil mineralleri, demir, kireçtaşı
Ötrofikasyon	NO _x , NH ₄ , COD
Fotokimyasal sis oluşumu	C ₂ H ₄ , CO
Ozon tabakasının incelenmesi	İlgili envanter verisi belirtilmemiştir.
Arazi kullanımı	İlgili envanter verisi belirtilmemiştir.
İç hava kalitesi	İlgili envanter verisi belirtilmemiştir.

Her bir etki sınıfı için salımların dönüştürme katsayısıyla tek bir eşdeğer salıma ya da birime dönüştürüldüğü tanımlama adımı; 1 kg EPS'nin ham (normalleştirilmemiş ve ağırlıklandırılmamış) etki değeri (ED_{jk}) Denklem 3'e göre hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, gram cinsinden verilen girdi ve çıktı miktarları kilograma çevrilmiştir. Küresel ısınma çevresel etki sınıfı için; küresel ısınmaya neden olan ve veri kaynağından gelen tek salım CO₂'dir. CO₂'in dönüştürme katsayısı (CF) 1'dir. Envanter analizinden gelen CO₂ miktarı 1 kilogram EPS için 3.59 kilogramdır. Buna göre küresel ısınma için ham etki değeri aşağıda verilmiştir.

$$ED_{\text{EPS, küresel ısınma}} = \sum_{i=1}^1 I_{\text{CO}_2, \text{EPS}} \times CF_{\text{CO}_2}$$

$$ED_{\text{EPS, küresel ısınma}} = \sum_{i=1}^1 3.59 \times 1 = 3.59 \text{ kg. CO}_2$$

Asitleşme çevresel etki sınıfı için; SO₂, NO_x, HCl, HF envanterden asitleşme sınıfına düzenlenen salımlardır. 1 kg EPS'nin asitleşme sınıfı için ham etki değeri aşağıda verilmiştir.

$$ED_{EPS, \text{ asitleşme}} = \sum_{i=1}^4 I_{SO_2, EPS} \times CF_{SO_2}$$

$$ED_{EPS, \text{ asitleşme}} = \sum_{i=1}^4 [(0.02 \times 1) + (0.018 \times 0.7) + (0.00007 \times 0.88) + (0.000002 \times 1.6)] = 0.03 \text{ kg/ SO}_2$$

Ötrofikasyon çevresel etki sınıfı için; NO_x, NH₄, COD envanterden ötrofikasyon sınıfına düzenlenen salımlardır. 1 kg EPS'nin ötrofikasyon sınıfı için ham etki değeri aşağıda verilmiştir.

$$ED_{EPS, \text{ ötrofikasyon}} = \sum_{i=1}^3 I_{PO_4, EPS} \times CF_{PO_4} = \sum_{i=1}^3 [(0.018 \times 0.13) + (0.000015 \times 0.33) + (0.001 \times 0.022)] = 0.002 \text{ kg/ PO}_4$$

Fotokimyasal sis oluşumu için; C₂H₄, CO envanterden fotokimyasal sis oluşumu sınıfına düzenlenen salımlardır. 1 kg EPS'nin ötrofikasyon sınıfı için ham etki değeri aşağıda verilmiştir.

$$ED_{EPS, \text{ fotokimyasal sis o.}} = \sum_{i=1}^2 I_{C_2H_4, EPS} \times CF_{C_2H_4}$$

$$ED_{EPS, \text{ fotokimyasal sis o.}} = \sum_{i=1}^2 [(0.02 \times 1) + (0.009 \times 0.02)] = 0.02 \text{ kg/ C}_2\text{H}_4$$

Fosil yakıt tüketimi için; doğalgaz, kömür, petrol ve fosil yakıt kaynaklı elektrik tüketimi değerlendirilmiştir. Ham etki değeri, envanterlerin doğrudan kullanımı yaklaşımına göre tüketilen fosil yakıt miktarlarının toplanmasıyla elde edilmiştir. Burada normalleştirme hepsinin birimi aynı olduğu için yapılmamıştır.

$$ED_{EPS, \text{ fosil yakıt t.}} = [39.3 + 0.84 + 61.1 + 5.01] = 106.25 \text{ MJ}$$

$$106.25 \text{ MJ} = 0.0026 \text{ TEP}$$

Atık çevresel etki sınıfı için; kimyasal atık, endüstriyel atık, cüruf/ kül, mineral atıklar ve suya bırakılan atıklar; deterjan-yağ, çözülmüş organikler, çözülmüş katı maddeler, katı maddeler bu sınıf içinde sınıflandırılmıştır. Ham etki değeri, envanterlerin doğrudan kullanımı yaklaşımına göre oluşan atık miktarının toplanmasıyla elde edilmiştir.

$$ED_{EPS, \text{ fosil yakıt t.}} = [0.01 + 0.0035 + 0.009 + 0.048 + 0.00007 + 0.00005 + 0.0001 + 0.001] = 0.07 \text{ Ton}$$

Su tüketimi için; YDE'den gelen tüketilen su miktarı ham etki değerinin elde edilmesinde kullanılmıştır.

$$ED_{EPS, \text{ su tüketimi}} = 30.60 \text{ litre} = 0.03 \text{ m}^3$$

Mineral kaynak tüketimi çevresel etki sınıfı için; YDE'den gelen tüketilen mineral kaynak miktarı ham etki değerinin elde edilmesinde kullanılmıştır.

$$ED_{EPS, \text{ mineral kaynak tüketimi}} = [0.0012 + 0.0041 + 0.00094 + 0.0023]$$

$$ED_{EPS, \text{ mineral kaynak tüketimi}} = 0.008 \text{ g} = 0.000008 \text{ Ton}$$

Çizelge 4. Bir kilogram EPS'nin YDED- TR modeline göre hesaplanan sınıf gösterge sonuçları.

Çevresel etki sınıfları	Sınıf gösterge sonuçları
Küresel ısınma	3.59 (CO ₂)
Fosil yakıt tüketimi	0.0026 (ton eşdeğer petrol)
Asitleşme	0.03 (SO ₂)
Atık	0.07 (ton)
Su tüketimi	0.03 (m ³)
Mineral tüketimi	0.000008 (ton)
Ötrofikasyon	0.002 (PO ₄)
Fotokimyasal sis oluşumu	0.02 (C ₂ H ₄)
Ozon tabakasının incelməsi	İlgili envanter verisi bulunmamaktadır.
Arazi kullanımı	İlgili envanter verisi bulunmamaktadır.
İç hava kalitesi	İlgili envanter verisi bulunmamaktadır.

Farklı birimlere sahip etki sınıflarının birimsizleştirilmesi, sınıf sonuçlarının toplanabilmesi ve farklı malzemelerin çevresel performanslarının karşılaştırılabilmesi için normalleştirme yapılmıştır. Çizelge 4 de tanımlama sonucunda belirtilen değerler, Türkiye için normalleştirme referans değerine (NF) bölünerek her bir sınıf için normalleştirilmiş değerler hesaplanmıştır. Küresel ısınma etki sınıfı için; 2011 yılında kişi başına düşen sera salım miktarı TÜİK'den alınan verilere göre 5.71 ton/kişidir [12]. Buna göre;

$$\text{Normalleştirilmiş ED EPS, küresel ısınma} = \frac{ED_{\text{EPS,küresel ısınma}}}{NF_{\text{küresel ısınma}}}$$

$$\text{Normalleştirilmiş ED EPS, küresel ısınma} = \frac{3.59}{5710} = 0.0006$$

Fosil yakıt tüketimi için; Türkiye enerji tüketiminin kaynaklar bazında dağılımında fosil yakıt tüketimi toplam enerji tüketiminin % 89'udur. Türkiye'nin 2011 yılı toplam enerji tüketimi 114480,2 bin ton eşdeğer petrol (Btep)'dir [13]. 2011 tarihi için kişi başına düşen fosil yakıt tüketimi;

$$\text{Normalleştirilmiş ED EPS, fosil yakıt t.} = \frac{ED_{\text{EPS,fosil yakıt t.}}}{NF_{\text{fosil yakıt t.}}}$$

$$\text{Normalleştirilmiş ED EPS, fosil yakıt t.} = \frac{114480000 \times 0.89}{74724269} = 1.36$$

$$\text{Normalleştirilmiş ED EPS, fosil yakıt t.} = \frac{0.002}{1.36} = 0,0019$$

Atık sınıfı için; TÜİK'in verilerine göre 2012 yılı için bir günde kişi başına düşen belediyelerce toplanan atık miktarı 1.12 kg (yılda 408 kg= 0.4 ton)'dur [14]. Maden işletmelerinde ise 2012 yılı için 952 milyon ton atık (kişi başı 12.7 ton) oluştuğu belirtilmiştir. Oluşan atığın %99,8'ini mineral kaynaklar oluşturmuştur [15].

$$\text{Normalleştirilmiş ED}_{\text{EPS,atık}} = \frac{ED_{\text{EPS,atık}}}{NF_{\text{atık}}}$$

$$\text{Normalleştirilmiş ED}_{\text{EPS,atık}} = \frac{0.07}{13.1} = 0.005$$

Su tüketimi sınıfı için; TÜİK verilerine göre Türkiye'de kişi başına kullanılan su miktarı 217 litre (0.21 m³)'dür [16].

$$\text{Normalleştirilmiş ED}_{\text{EPS,su tük.}} = \frac{ED_{\text{EPS,su tük.}}}{NF_{\text{su tük.}}}$$

$$\text{Normalleştirilmiş ED}_{\text{EPS, su tük.}} = \frac{0.03}{0.21} = 0.14$$

Mineral kaynak tüketimi sınıfı için; TBMM Araştırma Komisyonu'nun (2010) verilerine göre Türkiye'de kişi başına düşen mineral kaynak tüketimi 5 tondur [17].

$$\text{Normalleştirilmiş ED}_{\text{EPS,mineral k.t.}} = \frac{ED_{\text{EPS,mineral k. t.}}}{NF_{\text{mineral k. t.}}}$$

$$\text{Normalleştirilmiş ED}_{\text{EPS,mineral k.t.}} = \frac{0.000008}{5} = 0.00$$

Çizelge 5. Bir kilogram EPS'nin YDED- TR modeline göre hesaplanan normalleştirilmiş etki değeri.

Çevresel etki sınıfları	Normalleştirilmiş etki değeri
Küresel ısınma	0.0006
Fosil yakıt tüketimi	0.001
Asitleşme	Türkiye için normalleştirme değeri hesaplanmalı
Atık	0.005
Su tüketimi	0.14
Mineral tüketimi	0.00
Ötrofikasyon	Türkiye için normalleştirme değeri hesaplanmalı
Fotokimyasal sis oluşumu	Türkiye için normalleştirme değeri hesaplanmalı
Ozon tabakasının incilmesi	İlgili envanter verisi bulunmamaktadır.
Arazi kullanımı	İlgili envanter verisi bulunmamaktadır.
İç hava kalitesi	İlgili envanter verisi bulunmamaktadır.

Çevresel etki sınıflarının Türkiye için önem derecelerine göre belirlenen ağırlıklandırma katsayıları, normalleştirilmiş etki değeri ile çarpılarak her bir sınıf için çevresel performans değeri elde edilmiştir. Normalleştirilmiş etki değerlendirme değeri hesaplanan küresel ısınma, fosil yakıt tüketimi, atık, su tüketimi ve mineral kaynak tüketimi için YDED- TR modelinde hesaplanan ağırlıklandırma katsayıları kullanılmıştır.

Çizelge 6. Bir kilogram EPS'nin YDED- TR modeline göre normalleştirilmiş ve ağırlıklandırılmış çevresel performans değeri.

Çevresel etki sınıfları	Ağırlıklandırılmış çevresel performans değeri
Küresel ısınma	$0.0006 \times 0.15 = 0.00009$
Fosil yakıt tüketimi	$0.0019 \times 0.19 = 0.0003$
Asitleşme	Türkiye için normalleştirme değeri hesaplanmalı
Atık	$0.005 \times 0.12 = 0.0006$
Su tüketimi	$0.14 \times 0.15 = 0.021$
Mineral tüketimi	$0.00 \times 0.07 = 0.00$
Ötrofikasyon	Türkiye için normalleştirme değeri hesaplanmalı
Fotokimyasal sis oluşumu	Türkiye için normalleştirme değeri hesaplanmalı
Ozon tabakasının incilmesi	İlgili envanter verisi bulunmamaktadır.
Arazi kullanımı	İlgili envanter verisi bulunmamaktadır.
İç hava kalitesi	İlgili envanter verisi bulunmamaktadır.

EPS'nin YDED- TR Modeli Sonuçlarının Diğer YDED Modelleri ile Karşılaştırılması

İlk olarak 1990'da tasarlanmış "SimaPro"; kullanıcının ürünlerin ve servislerin çevresel performansını analiz etmesini ve gözlemlenmesini sağlayan bir YDD aracıdır. Yaşam döngüsü envanter verilerinin birden fazla YDED modeli için hesaplanmasına olanak tanımaktadır.

Bu çalışmada "SimaPro" içeriğindeki "Ecoinvent Veritabanından" yapı malzemeleri bölümü içinden EPS seçilerek beşikten kapıya çevresel etkileri farklı YDED modellerine göre hesaplatılmıştır. YDED- TR modelinin sınanmasında EPS için işlevsel birim 1 kilogram seçilmiştir. SimaPro'da aynı işlevsel birime sahip yani EPS'nin bir kilogramı için hesaplamalar yapılmıştır.

Bir kilogram EPS'nin beşikten kapıya sürecindeki fosil yakıt tüketiminde, envanter verilerinin Türkiye ve diğer YDED modellerinde aynı olduğu görülmektedir. Tüketilen atık miktarı YDED- TR modelinde EDIP modelinden daha fazladır. Bu modelde su tüketim miktarı BEES modeli ile aynı, Impact2002 modelinden fazladır. YDED- TR modelinde kullanılan envanter verisinde belirtilmiş 1 kg EPS için tüketilen mineral kaynak miktarı diğer YDED modellerinden daha azdır (Çizelge 7). Salım kaynaklı etki sınıfları için elde edilen ham etki değerlendirme değerinde envanter verilerinin yanı sıra tanımlama adımı için salımların birimlerini bir eşdeğer salıma dönüştüren katsayılarıdaki (CF) farklılıklar da etkili olmaktadır.

Değerlendirilen YDED modellerinden sadece Impact2002 ve Recipe modelinde normalleştirme yapılmıştır. YDED- TR modeliyle birlikte bu üç model için normalleştirilmiş değerler Çizelge 9'da verilmiştir. Bu üç modelde ortak değerlendirilen çevresel etki sınıfları; küresel ısınma, mineral kaynak tüketimi ve fosil yakıt tüketimidir.

Bu üç model içinden Impact2002 ve Recipe için ağırlıklandırma adımı SimaPro'da kullanılmamıştır. Bu nedenle Türkiye ve diğer YDED modelleri için ağırlıklandırılmış çevresel performans değerleri karşılaştırılamamıştır.

Çizelge 7. Bir kilogram EPS için YDED modellerine göre ham etki değerleri.

YDED modelleri	Küresel ısınma (CO ₂)	Fosil yakıt tüketimi (TEP)	Asitleşme (SO ₂)	Atık (ton)	Su tüketimi (m ³)	Mineral kaynak tüketimi (ton)
YDED- TR	3.59	0.002	0.03	0.07	0.03	0.00
CML2001	4.14	-	0.01	-	-	0.01
EDIP2003	4.21	-	-	0.04	-	-
EPD2008	4.14	0.002	0.01	-	-	0.01
Impact2002	3.71	0.002	0.01	-	0.01	0.0003
Recipe	3.62	0.002	0.01	-	-	-
BEES	4.14	-	-	-	0.03	-
TRACI	4.2	-	-	-	-	-

Çizelge 8. Bir kilogram EPS için YDED modellerine göre ham etki değerlendirme değerleri.

YDED modelleri	Ötrofikasyon (PO ₄)	Fotokimyasal sis oluşumu (C ₂ H ₄)	İç hava kalitesi (uçucu organik bileşikler)	Arazi kullanımı (m ² x yıl)	Ozon tabakasının incilmesi (CFC11)
YDED- TR	0.002	0.02	Envanter yok	Envanter yok	Envanter yok
CML2001	0.001	0.006	-	0.007	0.00
EDIP2003	-	-	-	-	0.00
EPD2008	0.001	0.01	-	-	0.00
Impact2002	0.0	-	-	-	0.00
Recipe	-	-	-	-	0.00
BEES	-	-	0.0	-	0.00
TRACI	-	-	-	-	0.00

Çizelge 9. Bir ton EPS için normalleştirilmiş değerler.

	YDED Modelleri		
	YDED- TR	Impact2002	Recipe
Küresel ısınma	0.0006	0.0003	0.0003
Mineral kaynak t.	0.00	0.00	-
Fosil yakıt t.	0.001	0.0007	0.001

Sonuç

Yapı malzemelerinin çevresel etki değerlendirilmesinde önemli çevresel konuların belirtilmesi ve değerlendirme, Yaşam Döngüsü Yorumu (YDY)'nin ilk adımıdır. Referans envanter verileri ve Türkiye'deki çevresel verilerin kullanılarak EPS'nin çevresel etki değerlendirmesi sonucunda; su tüketimi önem sıralamasında ilk sırayı alırken, atık ikinci sırada yer almaktadır. Bunları fosil yakıt tüketimi ve küresel ısınma izlemektedir. Mineral kaynak tüketimi için etki değeri ihmal edilebilecek düzeydedir.

Yaşam Döngüsü Yorumunda bütünlük kontrolüyle, YDED modelinin uygulanabilmesini sağlayan bilgi ve verilerin kontrolü ve ulaşılabilirliği kontrol edilmektedir. EPS için yapılan çalışmada arazi kullanımı, iç hava kalitesi ve ozon tabakasının incelenmesi sınıfları ile ilgili gerekli envanter verilerinin yer almaması, bu sınıflar için çevresel etki değerlendirmesinin yapılmasını engellemiştir. Bu çalışmada tanımlama adımı esas alınan envanter verileri doğrultusunda yapılmıştır. Türkiye'de özellikle salım envanteri ile ilgili veri eksiklikleri, normalleştirme adımının bazı sınıflar için uygulanamamasına neden olmuştur. YDED- TR modelinde normalleştirilen tüm çevresel etki sınıfları için yapılabilmesinde;

- Türkiye'de asitleşmeye neden olan salımların kükürt dioksit (SO₂) eşdeğerindeki envanteri;
- Türkiye'de ötrofikasyona neden olan salımların fosfat (PO₄) eşdeğerindeki envanteri;
- Türkiye'de fotokimyasal sis oluşumuna neden olan salımların eten (C₂H₄) eşdeğerindeki envanteri;
- Türkiye'de iç hava kalitesini etkileyen uçucu organik bileşik salımların envanteri;
- Türkiye'de ozon tabakasının incelenmesinde etkili salım envanteri;
- Türkiye'de yıllık arazi kullanım miktarı gereklidir.

Bütünlük kontrolü, YDED- TR modelinde toplam çevresel performans değerinin hesaplanabilmesi amacıyla gerekli verilerin elde edilmesi için YDE analizine dönülmesi ve sonrasında hesaplamaların yeniden yapılması gerektiğini göstermiştir. Uygunluk kontrolünde; verilerin kaynağı, doğruluğu, veri yaşı, zaman ve coğrafik kapsamı kontrol edilmektedir. Türkiye için geliştirilen YDED modelinin denenmesi için Athena Sürdürülebilir Malzemeler Enstitüsü'ne hazırlanmış olan bir rapordan alınan envanter verileri kullanılmıştır. Türkiye için envanter veri tabanının oluşturulması durumunda, yeni verilerle benzer çalışmaların yapılması gerekmektedir. YDED- TR modelinde kullanılan çevresel veriler, Türkiye'ye özgü veriler ve literatür verileridir. Türkiye'ye özgü veriler 2011, 2012 ve 2013 yıllarına ait güncel verilerdir. Coğrafi kapsamı ise Türkiye'dir. Bu açılarından YDED- TR modeli, çalışmanın amaç ve kapsamına uygundur.

EPS yapı malzemesinin farklı YDED modelleriyle karşılaştırılmasında; modellerin farklı etki sınıflarını değerlendirmesi ve her modelin normalleştirme ve ağırlıklandırma adımlarını içermemesi toplam çevresel performans değerlerinin karşılaştırılmasını engellemiştir. Diğer ürünlerden farklı olarak yapı malzemelerinin YDD çalışmalarında hizmet ömrünün uzun olması, çok farklı evrelerinin olması, çok çeşitli malzeme türünün olması gibi hususlar nedeniyle modellere girdi oluşturacak verilerin toplanmasında zamansal, coğrafik ve teknolojik belirsizliklerle karşılaşmaktadır. Yapı malzemelerinin çevresel etkileriyle ilgili değerlendirmeler, kontrol ve iyileştirmelerin yapılabilmesi büyük ölçüde bunlar ile ilgili çevresel verilerin mevcut olmasına bağlıdır. Bu alanda bilimsel verilerin sağlanması için uluslararası veri tabanlarından yararlanılarak "Ulusal Yaşam Dönüsü Envanter Veri tabanı" oluşturulabilir. Bu veri tabanı, bir yapı malzemesinin toplam çevresel performans değerinin hesaplanmasını sağlayan YDED evresi için gereklidir.

YDED- TR modeli, tüm yaşam döngüsü sürecini ele alarak envanter verileri hesaplanmış yapı malzemelerinin Türkiye'ye özgü toplam çevresel performans değerinin hesaplanmasını sağlamaktadır. Model, alternatif yapı malzemeleri arasında çevresel performans değerlerinin karşılaştırılarak çevresel etkisi az olan yapı malzemesinin seçimini mimara sağlayabilir.

Kaynaklar

- [1]. H. A. Udo de Haes, O. Joliet, “How Does ISO / IDIS 14042 on Life Cycle Impact Assessment Accommodate Current Best Available Practice”, The International Journal of Life Cycle Assessment, 4 (2), sayfa 75 – 80, 1999.
- [2]. ISO 14040 Standard, “Environmental Management–Life Cycle Assessment-Principles and Framework”, 2006.
- [3]. G. Lijing, L. G. Bo Rong, Daojin, Z. Ying Xin, “An Endpoint Damage Oriented Model for Life Cycle Environmental Impact Assessment of Buildings in China”, Chinese Science Bulletin, 53, 23: sayfa 3762-3769, 2008.
- [4]. J. Bare, T. Gloria, “Life Cycle Impact Assessment for The Building Design and Construction Industry”, Building Design and Construction, Progress Report on Life Cycle Assessment, sayfa 22-24 2005.
- [5]. J. Bengtsson, N. Howard, “A Life Cycle Impact Assessment Method; Part I: Classification and Characterization”, Building Products Innovation Council and AusIndustry, 2010.
- [6]. O. Joliet, M. Margni, R. Charles, S. Humbert, J. Payet, G. Rebitzer, R. Rosenbaum, “IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology”, International Journal of LCA , 8, 6, sayfa 324-330, 2003.
- [7]. European Standard EN 15804, Sustainability of Construction Works, Environmental Product Declarations, Core Rules for The Product Category of Construction Products, 2012.
- [8]. Türkiye İstatistik Kurumu, Adrese dayalı nüfus kayıt sistemi sonuçları- 2013, sayı: 15974, 2014.
- [9]. S. Öztaş Karaman, “Türk Yapı Malzemesi Sektörü için Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesine Yönelik Bir Model Önerisi”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye, 2014.
- [10]. B. C. Lippiatt, “BEES© 4.0, Building for Environmental and Economic Sustainability Technical Manual and User Guide”, NISTIR 7423, National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington, 2007.
- [11]. G.A.N. Sylvatica, “An Exploratory Life Cycle Study of Selected Building Envelope Materials”, The Athena Sustainable Materials Institute Report, Canada, sayfa 17-23, 1998.
- [12]. Türkiye İstatistik Kurumu, Sayı 2014/ 22, 2014.
http://www.tuik.gov.tr/basinOdasi/haberler/2014_22_20140408d.pdf
- [13]. Enerji Tabii ve Kaynaklar Bakanlığı, 2011 Yılı Enerji Dengesi, 2012.
http://www.enerji.gov.tr/EKLENTI_VIEW/index.php.
- [14]. Türkiye İstatistik Kurumu, Belediye Atık İstatistikleri, sayı: 16170, 20.02.2014, 2014.
- [15]. Türkiye İstatistik Kurumu, Maden İşletmeleri Su, Atık su ve Atık İstatistikleri, 2012, sayı: 16173, 2014.
<http://www.TÜİK.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=16173>.
- [16]. Türkiye İstatistik Kurumu. Termik santral su, atık su ve atık istatistikleri, sayı 10732, 2010.
- [17]. TBMM, Madencilik Sektöründeki Sorunların Araştırılarak Alınması Gereken Önlemlerin Belirlenmesi Amacıyla Kurulan Meclis Araştırması Komisyonu Raporu, 2010.