

Yeşil Bina Tasarımında Sürdürülebilir Malzemeler: LCA Odaklı İnceleme **Sustainable Materials in Green Building Design: A LCA-Focused Review**

Selçuk ÇİMEN^{1*}

^{1*}İçişleri Bakanlığı, Emniyet Genel Müdürlüğü, Bayburt, Türkiye

ÖZET

Yeşil bina tasarımında malzeme seçimi, artan karbon salımları, enerji kullanımı ve kaynak tüketimi nedeniyle sürdürülebilirlik performansının en kritik bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Güncel yaklaşımlar, yapı malzemelerinin yalnızca teknik özellikleriyle değil, yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan çevresel etkileriyle birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu doğrultuda LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) ve DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – German Sustainable Building Council) gibi uluslararası sertifikasyon sistemleri, malzeme kategorilerine ilişkin kriterlerini giderek daha ölçülebilir, karşılaştırılabilir ve LCA (Life Cycle Assessment) temelli bir yapıya dönüştürmektedir.

Bu derleme, sürdürülebilir malzeme seçimini belirleyen temel unsurları incelemekte; düşük karbonlu üretim yöntemleri, geri dönüştürülmüş içerik, biyobazlı malzemeler, VOC (Volatile Organic Compounds) emisyonlarının azaltılması ve yaşam döngüsü değerlendirmesi gibi güncel araştırma temalarını bütüncül bir çerçevede ele almaktadır. Literatürdeki eğilimler, malzeme kaynaklı çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik sertifikasyon puan yapılarının güçlendiğini, döngüsel ekonomi ilkelerinin tasarım süreçlerine daha fazla entegre edildiğini ve LCA kullanımının yaygınlaştığını göstermektedir.

Bununla birlikte, veri tabanı farklılıkları, metodolojik uyumsuzluklar, bölgesel veri eksiklikleri ve özellikle doğal malzemelerin uzun dönem performansına ilişkin sınırlı deneysel kanıtlar, sürdürülebilir malzeme araştırmalarındaki başlıca sınırlılıklar olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma, malzeme özellikleri, yaşam döngüsü değerlendirmesi ve sertifikasyon kriterlerini tek bir çerçevede bir araya getirerek hem akademik araştırmalar hem de uygulama pratikleri için yönlendirici bir değerlendirme sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: “Yeşil Bina”, “Sürdürülebilir Malzeme”, “LCA”, “Sertifikasyon Sistemleri”, “Döngüsel Ekonomi”.

ABSTRACT

Material selection in green building design has become one of the most critical components of sustainability performance due to increasing carbon emissions, energy consumption, and resource depletion in the construction sector. Contemporary approaches require building materials to be evaluated not only by their technical properties but also by the environmental impacts generated throughout their entire life cycle. Accordingly, international certification systems such as LEED, BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), and DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – German Sustainable Building Council) have progressively transformed their material-related criteria into a more measurable, comparable, and LCA (Life Cycle Assessment) based structure.

This review examines the fundamental factors shaping sustainable material selection and synthesizes current research themes including low-carbon production methods, recycled content, biobased materials, VOC (Volatile Organic Compounds) emission reduction, and life-cycle assessment within an integrated framework. Trends in the literature indicate that credit structures targeting the reduction of material related environmental impacts have strengthened, circular economy principles are increasingly embedded in design processes, and the use of LCA has become more widespread.

However, database inconsistencies, methodological variations, regional data limitations, and the scarcity of long-term experimental evidence particularly for natural materials remain key constraints within the field of sustainable materials research. By bringing together material properties, life-cycle assessment perspectives, and certification criteria, this review provides a comprehensive reference that supports both academic investigations and practical applications.

Keywords: “Green Building”, “Sustainable Materials”, “LCA”, “Certification Systems”, “Circular Economy”.

1. GİRİŞ

Bina ve inşaat sektörü, küresel ölçekte artan enerji tüketimi ve karbon salımları nedeniyle çevresel baskının en yoğun hissedildiği alanlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Güncel raporlar, dünya genelindeki toplam enerji tüketiminin %36-40'ının ve yıllık karbon emisyonlarının %37'sinin yapı sektöründen kaynaklandığını göstermektedir (Global Alliance for Buildings and Construction, 2023; IEA, 2022). Kentleşme eğilimleri, yeni yapı gereksinimleri ve mevcut yapı stoğunun yenilenme ihtiyacı dikkate alındığında, bu çevresel etkilerin gelecekte daha da artacağı öngörülmektedir. Bu nedenle enerji kullanımını azaltan, kaynak verimliliğini artıran ve çevresel etkileri minimuma indiren bütüncül tasarım yaklaşımlarının benimsenmesi sürdürülebilir kalkınma açısından zorunluluk hâline gelmiştir. Yapının tüm yaşam döngüsünü dikkate alan yeşil bina yaklaşımı, bu kapsamlı değerlendirme ihtiyacına karşılık veren, önemli bir tasarım paradigması olarak ortaya çıkmaktadır (Liu vd., 2022).

Yeşil binalar, sürdürülebilirliği yalnızca kullanım aşamasındaki enerji verimliliği üzerinden tanımlamak yerine; malzeme seçimi, iç mekân hava kalitesi, su yönetimi, atık azaltımı ve ekosistem uyumu gibi çok boyutlu bileşenleri birlikte ele almaktadır. Uluslararası sertifikasyon sistemlerinin (LEED, BREEAM, DGNB) yaygınlaşması, bu yaklaşımın küresel ölçekte kabul gördüğünü ortaya koymaktadır. Son yıllarda bu sistemlerde malzemeye yönelik kriterlerin güçlendirilmesi, yapı bileşenlerinin çevresel etkilerinin tasarım sürecindeki belirleyici rolünü daha görünür hâle getirmiştir. Malzeme seçimi; dayanım, maliyet ve teknik performansın yanı sıra karbon ayak izi, geri dönüştürülebilirlik, VOC emisyonları, kaynak verimliliği ve yerel tedarik gibi unsurları kapsayan çok boyutlu bir karar alanına dönüşmüştür (De Luca vd., 2017).

Malzeme kaynaklı çevresel yüklerin artış göstermesinin temel nedeni, birçok bina tipinde kullanım aşamasındaki enerji tüketiminin yeni teknolojiler sayesinde azalırken, üretim süreçlerine ait gömülü karbonun toplam çevresel etki içindeki payının giderek yükselmesidir. Yüksek enerji verimliliğine sahip cephe sistemleri, gelişmiş yalıtım malzemeleri ve yenilenebilir enerji çözümleri operasyonel emisyonları düşürse de, çimento, çelik, cam ve seramik gibi karbon yoğun malzemelerin üretimi hâlâ önemli bir çevresel maliyet oluşturmaktadır. Bu nedenle düşük karbonlu üretim yöntemleri, geri dönüştürülmüş içerikli malzemeler ve yerel kaynak kullanımına yönelik stratejiler, yeşil bina tasarımında çevresel performansı iyileştiren güçlü yaklaşımlardan biri hâline gelmiştir. Nitekim Tazmeen ve Mir (2024), bu tür malzemelerin yaşam döngüsü boyunca toplam emisyonları malzeme türüne bağlı olarak %20-30 oranında azaltabildiğini göstermektedir.

Bu kapsamda yaşam döngüsü değerlendirmesi (Life Cycle Assessment – LCA), malzeme seçiminin çevresel etkilerini bilimsel olarak analiz etmeye olanak sağlayan temel araçlardan biri olarak öne çıkmaktadır. ISO 14040 ve ISO 14044 standartları doğrultusunda hammadde temini, üretim, taşıma, kullanım ve yaşam sonu aşamalarının birlikte değerlendirilmesi, malzemeler arasında nesnel karşılaştırmalar yapılmasını mümkün kılmaktadır (ISO, 2020a; ISO, 2020b). Güncel literatür, LCA'nın özellikle malzeme temelli çevresel etkilerin nicel olarak ortaya konmasında kritik bir rol oynadığını vurgulamakta, ancak veri kalitesi, coğrafi farklılıklar ve malzeme özgül parametrelerdeki belirsizlikler gibi sınırlılıkların da değerlendirme sürecini etkileyebildiğini belirtmektedir.

Bununla birlikte, mevcut çalışmalar incelendiğinde yeşil bina literatürünün ağırlıklı olarak enerji performansı, operasyonel verimlilik veya tekil malzeme grupları üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Malzeme seçimi, sertifikasyon sistemleri ve LCA sonuçlarının bütüncül bir çerçevede ele alındığı kapsamlı değerlendirmelerin sınırlı olduğu belirtilmektedir (Liu vd., 2022). Çoğu araştırma belirli bir çevresel etki kategorisine, tek bir malzeme türüne veya belirli bir performans boyutuna odaklanmakta; malzeme seçiminde karşılaşılan teknik, ekonomik ve uygulamaya yönelik engeller ise sistematik biçimde tartışılmamaktadır. Bu durum, sürdürülebilir malzeme seçiminin yeşil bina tasarımındaki rolüne ilişkin bütüncül ve disiplinler arası bir değerlendirme ihtiyacını ortaya koymaktadır.

Bu derleme çalışması, söz konusu araştırma boşluğunu ele alarak yeşil binalarda malzeme seçimine ilişkin sürdürülebilirlik kriterlerini, yaşam döngüsü yaklaşımını ve uluslararası sertifikasyon sistemlerinin malzeme kategorilerini bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada; malzeme stratejileri, çevresel etki azaltım potansiyeli, sertifikasyon kriterlerinin evrimi ve güncel araştırma eğilimleri sistematik biçimde analiz edilmekte ve geleceğe yönelik araştırma alanlarına ışık tutulmaktadır.

Bu derleme şu dört temel bölümden oluşmaktadır:

1. Yeşil bina kavramı ve sertifikasyon sistemlerinde malzeme boyutunun değerlendirilmesi,
2. Sürdürülebilir malzeme seçimine ilişkin temel kriterlerin incelenmesi,
3. Malzeme-sürdürülebilirlik-LCA ilişkisine yönelik bilimsel çerçevenin ortaya konması,
4. Güncel literatürün eleştirel analizi, araştırma boşlukları ve geleceğe yönelik önerilerin sunulması.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1 Yeşil Bina Kavramı ve Sertifikasyon Sistemlerinde Malzeme Boyutu

Yeşil bina, yapıların yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan çevresel etkilerin azaltılmasını, doğal kaynak kullanımının verimli biçimde yönetilmesini ve kullanıcı sağlığı ile konforunun artırılmasını amaçlayan bütüncül bir tasarım yaklaşımıdır. Bu kavram; enerji verimliliği, su yönetimi, malzeme seçimi, atık azaltımı, ekolojik tasarım, arazi kullanımı ve iç mekân çevre kalitesi gibi birbiriyle ilişkili çok sayıda bileşeni kapsamaktadır (Kibert, 2022). Artan kentleşme oranı, iklim değişikliğinin yol açtığı çevresel baskılar ve yapı sektörünün küresel enerji tüketimindeki yüksek payı dikkate alındığında, yeşil bina uygulamaları hem politika düzeyinde hem de sektör ölçeğinde zorunlu bir dönüşüm alanı hâline gelmiştir (GlobalABC, 2023; IEA, 2022).

Uluslararası yeşil bina sertifikasyon sistemleri, bu dönüşümün hem ölçülmesini hem de yönlendirilmesini sağlayan temel çerçevelerden biridir. LEED, BREEAM, DGNB ve Green Star gibi sistemler, sürdürülebilirlik kriterlerini sayısal göstergeler üzerinden değerlendiren puanlama yapılarına sahiptir ve çevresel etkilerin azaltılmasını teşvik eden düzenleyici mekanizmalar sunmaktadır (Assefa vd., 2022). Bu sistemlerin ortak yönü, malzeme kullanımını çevresel performansın ana belirleyicilerinden biri olarak görmeleridir. Çimen (2024) tarafından modern hastanelerde kullanılan yenilikçi malzemelere yönelik analiz, malzeme seçiminin yalnızca çevresel etkiler açısından değil, aynı zamanda iç mekân sağlığı ve kullanıcı konforu açısından da belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, sertifikasyon sistemlerinde malzeme kriterlerinin sağlık odaklı göstergelerle birlikte ele alınması gerektiğini desteklemektedir (Çimen ve Çimen, 2024; Tazmeen ve Mir, 2024). Malzeme kategorileri; geri dönüştürülmüş içerik, düşük karbonlu üretim teknikleri, sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi, toksik madde kısıtlamaları, çevresel ürün deklarasyonları (EPD) ve yaşam döngüsü etkilerinin nicel olarak değerlendirilmesi gibi ölçütler üzerinden analiz edilmektedir (Park, 2017). Söz konusu kriterlerin her sertifikasyon sisteminde farklı ağırlıklarla değerlendirilmesi, malzeme odaklı sürdürülebilirlik yaklaşımının küresel ölçekte çeşitlilik gösteren bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Tablo 1).

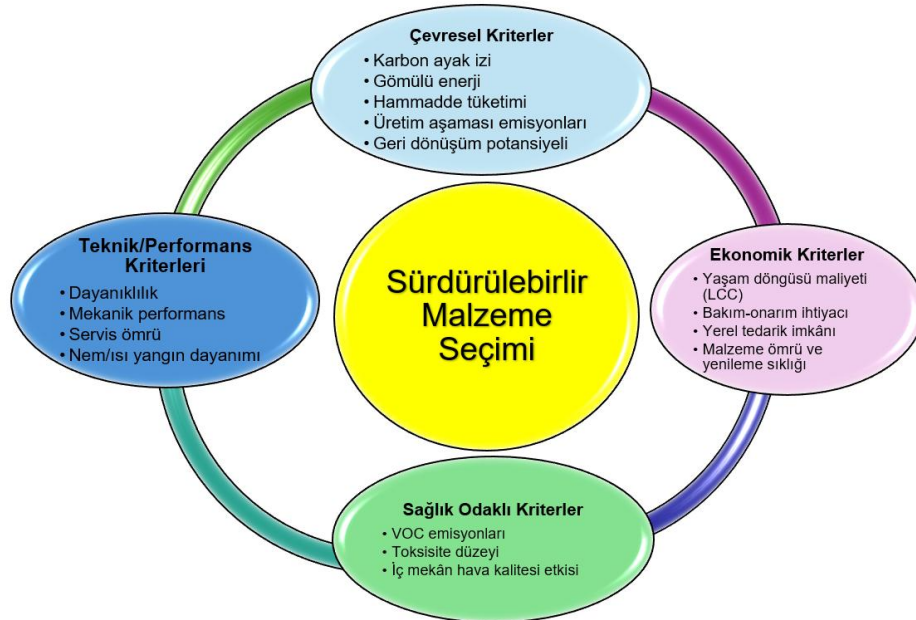
Tablo 1. Başlıca yeşil bina sertifikasyon sistemlerinde malzeme kriterlerinin karşılaştırılması

Sertifikasyon Sistemi	Malzeme Odaklı Kriterler	Öne Çıkan Sürdürülebilirlik Ölçütleri
LEED v4.1	EPD zorunluluğu, düşük karbonlu malzeme, geri dönüştürülmüş içerik	Embodied carbon azaltımı, sürdürülebilir tedarik
BREEAM 2018	Sürdürülebilir kaynak kullanımı, malzeme dayanıklılığı, LCA entegrasyonu	Dayanıklılık, tedarik zinciri sürdürülebilirliği
DGNB 2020	Yaşam döngüsü çevresel etkileri, toksisite sınırları, döngüsel ekonomi	LCA zorunluluğu, malzeme çevresel profil katsayıları
Green Star	Yerel malzeme, düşük etkili malzeme seçimi, atık azaltımı	Yerelleştirme, geri dönüşüm, çevresel etki sınıflaması

Son yıllarda LEED v4.1, BREEAM 2018 ve DGNB 2020 güncellemeleri incelendiğinde, malzeme kategorisinin puan ağırlıklarında belirgin artışlar olduğu, EPD kullanımının yaygınlaştığı ve düşük karbonlu malzemeleri teşvik eden alt kriterlerin güçlendirildiği görülmektedir (GBIG, 2024; BRE Global, 2023). Bu eğilim, malzeme seçiminin klasik anlamda teknik performans ve maliyet odaklı bir karar olmaktan çıkarak; çevresel sürdürülebilirlik, döngüsel ekonomi, karbon yönetimi ve yaşam döngüsü performansı açısından stratejik bir tasarım bileşenine dönüştüğünü göstermektedir. Bu doğrultuda sertifikasyon sistemleri yalnızca proje değerlendirme araçları olmanın ötesine geçerek, sürdürülebilir malzeme kullanımına yön veren ve sektördeki dönüşümün hızlanmasına katkı sağlayan rehber mekanizmalara dönüşmüştür (Röck vd., 2020).

2.2 Sürdürülebilir Malzeme Seçimi Kriterleri

Sürdürülebilir malzeme seçimi, yeşil bina tasarımında çevresel etkilerin azaltılması ve yapıların uzun vadeli performansının iyileştirilmesi açısından merkezi bir öneme sahiptir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) bu süreçte temel bir çerçeve sunmakta; malzemelerin hammadde temini, üretim, kullanım ve kullanım ömrü sonu aşamalarındaki etkilerinin bütüncül biçimde değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu nedenle LEED, BREEAM ve DGNB gibi sertifikasyon sistemleri, malzeme performansını yalnızca teknik özellikler üzerinden değil, karbon ayak izi, geri dönüştürülmüş içerik, toksik madde salınımları, kaynak verimliliği ve uzun dönem maliyet gibi çok boyutlu kriterler doğrultusunda ele almaktadır (Yahia vd., 2024; Taç ve Emekçi, 2025). Bu kriterlerin genel çerçevesi Şekil 1’de özetlenmektedir.



Şekil 1. Sürdürülebilir malzeme seçimini belirleyen kriterlerin genel çerçevesi

Malzeme kaynaklı çevresel etkilerin büyük bölümünün üretim aşamasında ortaya çıkması, düşük karbonlu teknolojileri sürdürülebilir malzeme seçiminin öncelikli adımı hâline getirmiştir. Çimento üretimindeki yüksek enerji gereksinimi ve CO₂ emisyonları, alternatif bağlayıcı türlerinin araştırılmasını hızlandırmıştır. Zhang vd. (2025), geopolimer bağlayıcıların geleneksel Portland çimentosuna kıyasla %40–80 oranında karbon azaltımı sağladığını ve yapısal performans açısından çoğu uygulamada rekabetçi bir seçenek sunduğunu belirtmektedir. Masniari ve Koestoer (2024) ise düşük klinkerli çimentoların yerel malzemelerle birlikte kullanıldığında hem enerji tüketimini azalttığını hem de yeşil bina sertifikalarında ek puan sağladığını vurgulamaktadır.

Düşük karbonlu üretim süreçlerinin yanı sıra geri dönüştürülmüş içerik kullanımı, sürdürülebilir malzeme stratejilerinin en etkili bileşenlerinden biridir. Wu vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen bibliyometrik analiz, geri dönüştürülmüş agregaların karbon ayak izini anlamlı ölçüde düşürdüğünü ve uygun karışım tasarımlarıyla dayanıklılık açısından kabul edilebilir sonuçlar sunduğunu göstermektedir. Tazmeen ve Mir (2024) de geri dönüştürülmüş içerikli betonların ve kompozitlerin gömülü enerji değerlerinin geleneksel malzemelere göre belirgin biçimde düşük olduğunu, bu nedenle sürdürülebilir yapı projelerinde giderek daha fazla tercih edildiğini ortaya koymaktadır. Hafif agregaların kullanımı da malzemenin yoğunluğunu düşürerek gömülü karbonu azaltmakta ve sürdürülebilir malzeme stratejilerine katkı sağlamaktadır. Pomza agregasına borik asit ilavesiyle üretilen hafif betonlarda elde edilen çevresel ve mekanik iyileşmeler bu durumu desteklemektedir (Tezel vd., 2020). Benzer şekilde Çimen (2025) tarafından yapılan çalışmada, Zeytindalı ve Bayburt taşı atıklarının hafif beton üretiminde çevresel açıdan avantaj sunduğu ve yüksek sıcaklık koşullarında dahi yeterli mekanik performans sağladığı gösterilmiştir. Yahia vd. (2024), geri dönüştürülmüş içeriğin hem çevresel performans hem de maliyet açısından güçlü bir avantaj sunduğunu ifade etmektedir. Endüstriyel atıkların yapı malzemelerinde değerlendirilmesi döngüsel ekonomi açısından önemli bir stratejidir. Perlit esaslı tuğlalarda bor atığının kullanıldığı çalışmalar, atık malzemelerin çevresel kazanım sağlarken mühendislik özelliklerini de iyileştirebildiğini göstermektedir (Çimen vd., 2020).

Doğal ve biyobazlı malzemeler de çevresel açıdan düşük etkileri ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilmeleri nedeniyle sürdürülebilir yapı tasarımında önemli bir yer edinmektedir. Ahşap, bambu, doğal lif takviyeli kompozitler ve selüloz esaslı yalıtım ürünleri; düşük gömülü karbon seviyeleri, karbon depolama kapasitesi ve teknik performanslarıyla dikkat çekmektedir. Firoozi vd. (2024), doğal lifli kompozitlerin yalnızca mekanik performansı desteklemediğini, aynı zamanda ısı yalıtımı ve hafiflik gibi özelliklerde de avantaj sağladığını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, doğal malzemelerin hem çevresel hem teknik kriterleri karşılayan güçlü bir sürdürülebilir malzeme grubuna işaret ettiğini göstermektedir.

Sürdürülebilir malzeme seçiminin önemli bir boyutu da insan sağlığıyla ilişkilidir. Özellikle boya, kaplama, yapıştırıcı ve yalıtım ürünlerinden kaynaklanan uçucu organik bileşik (VOC) emisyonları, iç mekân hava kalitesi üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Sağlık yapılarında kullanılan yüzey malzemeleri, antibakteriyel kaplamalar ve düşük VOC içerikli ürünlerin kullanıcı sağlığı üzerindeki etkisini ortaya koyan çalışmalar da bu durumu doğrulamaktadır. Çimen ve Çimen (2024), modern hastanelerde inovatif malzemelerin VOC azaltımı ve iç mekân kalitesi açısından önemli avantajlar sağladığını bildirmektedir. Goodman ve arkadaşları (2024), düşük VOC içeren

kaplama ve yapıştırıcı kullanımının prefabrik ahşap yapılarda iç mekân hava kalitesini anlamlı biçimde iyileştirdiğini bildirmiştir. Yahia vd. (2024) ise VOC sınırlarının hem sağlık hem de yeşil bina sertifikasyonları açısından giderek daha belirleyici bir ölçüt hâline geldiğini vurgulamaktadır.

Dayanıklılık, sürdürülebilir malzeme seçiminin uzun dönem çevresel ve ekonomik etkilerini belirleyen diğer kritik parametredir. Taç ve Emekçi (2025), LCA ile yaşam döngüsü maliyet analizinin (LCC) birlikte kullanımının kısa vadeli maliyet odaklı değerlendirmelerin ötesine geçerek malzemelerin gerçek uzun dönem etkilerini ortaya koyduğunu ifade etmektedir. Zhang vd. (2025) de düşük karbonlu mineral bağlayıcıların yüksek servis ömrü sayesinde hem ekonomik hem çevresel açıdan avantaj sunduğunu belirtmektedir. Bu doğrultuda, dayanıklılığı yüksek malzemeler yeşil bina tasarımında hem bakım-onarım maliyetlerini düşürmekte hem de toplam çevresel etkiyi azaltmaktadır.

Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde sürdürülebilir malzeme seçiminin yalnızca karbon azaltımı, geri dönüşüm oranı veya maliyet gibi tekil göstergeler üzerinden ele alınmaması; çevresel, ekonomik, sağlık temelli ve teknik performans kriterlerinin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerektiği açıkça görülmektedir. Böylelikle malzeme seçimi, yeşil bina tasarımında stratejik bir karar alanı olarak hem çevresel hem de yapısal bütünlüğü şekillendiren temel bir bileşene dönüşmektedir.

2.3 Malzeme – Sürdürülebilirlik – LCA Bağlantısı

Sürdürülebilir malzeme seçimi, yapı sektöründe çevresel performansın bilimsel olarak değerlendirilebilmesi için yaşam döngüsü yaklaşımı ile birlikte ele alınmaktadır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA), bir malzemenin hammadde çıkarımından üretimine, kullanım sürecine ve kullanım ömrü sonuna kadar ortaya çıkan tüm çevresel etkileri nicel olarak analiz eden en kapsamlı yöntemlerden biridir. Bu yaklaşım, yalnızca üretim aşamasına ilişkin karbon salımlarını değil; enerji tüketimi, su kullanımı, toksik emisyonlar, atık oluşumu ve geri dönüşüm potansiyeli gibi çok yönlü etkileri kapsadığı için sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde temel referans aracı hâline gelmiştir (Firoozi vd., 2024; Huang vd., 2024).

LCA'nın en önemli katkılarından biri, malzemeye ait çevresel "sıcak noktaların" belirlenmesine imkân sağlamasıdır. Üretim aşamasındaki yüksek enerji tüketimi, belirli ham maddelerden kaynaklanan karbon yükü, nakliye mesafelerinin etkisi veya kullanım sonrası geri dönüşüm süreçlerinin verimliliği gibi kritik noktalar LCA çıktıları ile net şekilde ortaya konmaktadır. Bu sayede tasarımcılar, üreticiler ve malzeme geliştiricileri daha düşük gömülü karbon değerine sahip, uzun ömürlü ve döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu seçenekler geliştirebilmektedir (Firoozi vd., 2024). Aynı zamanda LCA, yapısal malzemeler ile kaplama, yalıtım veya bitiş malzemelerinin çevresel etkilerini karşılaştırma olanağı sağlayarak tasarım aşamasında daha bilinçli seçimler yapılmasına katkı sunmaktadır.

Güncel uluslararası standartlar, LCA'nın malzeme değerlendirme süreçlerindeki rolünü daha da güçlendirmiştir. ISO 21930, yapı malzemeleri için sistem sınırlarını hammadde temini, üretim, kullanım ve yaşam sonu aşamaları şeklinde tanımlamakta; böylece değerlendirme süreçlerinin farklı projeler arasında karşılaştırılabilir olmasını sağlamaktadır (Huang vd., 2024). Standartların bu net çerçevesi, yapı sektöründe çevresel performans hesaplamalarının daha şeffaf ve tutarlı biçimde yapılmasına imkân tanımaktadır.

Bu nedenlerle LCA, sürdürülebilir malzeme seçimini yalnızca çevresel etkilerin değerlendirilmesi açısından değil; yeşil bina sertifikasyon sistemlerinde puan kazanımı, karbon azaltım stratejilerinin belirlenmesi ve uzun vadeli tasarım kararlarının yönlendirilmesi açısından da bütüncül bir karar destek aracı olarak konumlanmaktadır. Böylece LCA, sürdürülebilir malzeme stratejilerinin hem bilimsel temellere dayandırılmasını hem de uygulama pratiğine etkin biçimde entegre edilmesini mümkün kılmaktadır.

2.4 Yeşil Bina Sertifikasyon Sistemlerinde Malzeme Değerlendirme Yaklaşımları

Yeşil bina sertifikasyon sistemleri, yapı malzemelerinin çevresel etkilerini ölçmek ve projelerin sürdürülebilirlik performansını karşılaştırılabilir kriterler üzerinden değerlendirmek için geliştirilmiş standartlaştırılmış araçlardır. Bu sistemler, malzemelerin gömülü karbon miktarı, üretim süreçlerindeki enerji ve kaynak tüketimi, toksik madde içerikleri, geri dönüştürülmüş içerik oranları ve yaşam döngüsü etkilerini dikkate alarak malzeme seçimine yön veren kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. Literatürde özellikle LEED, BREEAM ve DGNB'nin, malzeme kategorilerini sürdürülebilirlik politikalarının merkezine yerleştirdiği ve yapı sektörünün karbon azaltım hedeflerine doğrudan katkı sağlayan önemli mekanizmalar olarak konumlandığı belirtilmektedir (Zabalza vd., 2011; Assefa vd., 2022).

LEED v4.1, malzeme değerlendirmesini "Materials and Resources (MR)" başlığı altında ele almakta ve EPD kullanımı, malzeme tedarik zinciri şeffaflığı, düşük VOC içerikli ürünler ve bina düzeyinde LCA uygulamaları gibi ölçütlerle sistematik bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır (USGBC, 2019). LCA temelli yaklaşım, özellikle MRc1 kredisi altında teşvik edilmektedir. Bu kapsamda EN 15804 ve ISO 21930 standartlarına uyumlu çevresel

etki raporları talep edilmekte; A1–A3 üretim modüllerindeki çevresel yüklerin nicel olarak raporlanması, projelerin gömülü karbon açısından karşılaştırılabilirliğini artırmaktadır.

BREEAM 2018, malzeme kategorisini “Materials (MAT)” başlığında değerlendirmekte ve çevresel etkilerin yanı sıra tedarik zinciri sorumluluğu ile ürün sertifikasyon süreçlerine odaklanmaktadır. Sistemin temel göstergesi olan MAT 01 kredisi, yapı bileşenlerinin LCA tabanlı analizini zorunlu kılarak EN 15804 uyumlu raporlamayı gerektirir (Doan vd., 2017). Ayrıca Hea 02 kriteri, VOC ve formaldehit emisyonları için sıkı sınır değerler belirleyerek malzeme seçiminin iç mekân hava kalitesi üzerindeki etkisine doğrudan müdahale eder. Geri dönüştürülmüş içerik, kaynak verimliliği ve düşük emisyonlu malzemeler sistem tarafından ayrı puan kalemleriyle teşvik edilmekte; böylece sürdürülebilir malzeme kullanımının tasarım sürecine daha erken aşamalarda entegre edilmesi desteklenmektedir.

DGNB 2020, malzeme performansını “Environmental Quality (ENV1)” bileşeni kapsamında çok boyutlu bir çerçevede ele almaktadır. Bu sistem, malzeme değerlendirmesinde çevresel kalite, ekonomik kalite ve sosyo-kültürel kalite gibi ölçütleri bütüncül biçimde dikkate almasıyla diğer sistemlerden ayrılmaktadır. DGNB’de bina ölçeğinde LCA uygulamaları zorunludur ve küresel ısınma potansiyeli (GWP), fosil enerji tüketimi, ozon incelmeleri ve asidifikasyon gibi göstergeler değerlendirme yapısında önemli bir ağırlığa sahiptir (Marchi vd., 2021). Ayrıca döngüsel malzeme kullanımı, yeniden kullanım potansiyeli ve demonte edilebilirlik gibi parametreler puanlama sistemine dahil edilerek sürdürülebilir malzeme döngüsünü destekleyen tasarım stratejilerinin benimsenmesi teşvik edilmektedir.

Üç sertifikasyon sistemi birlikte değerlendirildiğinde, malzeme kategorisinin giderek daha büyük bir ağırlık kazandığı ve sürdürülebilir malzeme kullanımının uluslararası ölçekte ortak bir yönelimle şekillendiği görülmektedir. Literatür, LEED, BREEAM ve DGNB’nin kesişen noktalarını üç ana başlıkta toplamaktadır: (i) LCA temelli bütüncül değerlendirme yaklaşımının güçlenmesi, (ii) düşük VOC ve toksisite sınırlarının sıkılaştırılması, (iii) düşük karbonlu ve geri dönüştürülmüş içerikli malzemelere verilen desteğin artması (Chi vd., 2020). Bu bulgular, sertifikasyon sistemlerinin yalnızca değerlendirme aracı değil, aynı zamanda sürdürülebilir malzeme kullanımını yönlendiren stratejik politika bileşenleri hâline geldiğini göstermektedir. Bu kapsamda LEED, BREEAM ve DGNB’nin malzeme kriterlerinin temel bileşenleri Tablo 2’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 2. LEED, BREEAM ve DGNB sistemlerinde malzeme kategorisine ilişkin temel değerlendirme kriterleri

Sistem	Malzeme Kategorisi	LCA Yaklaşımı	VOC/Toksisite	Geri Dönüşüm	Tedarik Zinciri	Kaynak
LEED v4.1	MR (Materials and Resources)	LCA teşvik edilir; EN 15804 uyumlu raporlama desteklenir	Düşük VOC zorunludur (EQc4)	Geri dönüştürülmüş içerik ve EPD puanlanır	Üretici şeffaflığı ve tedarik sorumluluğu teşvik edilir	USGBC (2019); Zabalza vd. (2011)
BREEAM 2018	MAT (Materials)	MAT 01 kapsamında detaylı LCA zorunludur	Hea 02 kapsamında sıkı VOC sınırları	MAT 03 kapsamında geri dönüşüm teşvik edilir	Sorumlu tedarik zinciri gereklidir	Doan vd. (2017); Assefa vd. (2022)
DGNB 2020	Environmental Quality (ENV1)	Bina ölçeğinde LCA zorunludur	Sağlık odaklı VOC ve toksisite değerlendirmesi bulunur	Döngüsel malzeme kullanımı puanlanır	Kaynak sürdürülebilirliği i yüksek ağırlık taşır	Marchi vd. (2021)

3. LİTERATÜRÜN ELEŞTİREL DEĞERLENDİRMESİ VE ARAŞTIRMA EĞİLİMLERİ

3.1 Güncel Araştırma Eğilimleri

Sürdürülebilir malzeme seçimi, yeşil bina tasarımının en hızlı gelişen alanlarından biri hâline gelmiş; özellikle yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) literatürde baskın bir yöntem olarak öne çıkmıştır. Güncel çalışmalar, yapı malzemelerinin çevresel etkilerinin yalnızca üretim aşamasıyla sınırlı olmadığını; kullanım süreci, iç mekân sağlığı ve kullanım ömrü sonu senaryolarının bütüncül biçimde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu yaklaşım, yeşil bina sertifikasyon sistemlerinin (LEED, BREEAM, DGNB) malzeme kategorilerini LCA tabanlı ölçütlerle güçlendirmesiyle uyumlu bir eğilim sergilemektedir (Doan vd., 2017; Assefa vd., 2022).

Son yıllarda doğal lifli kompozitler, ahşap, mantar, kenevir ve selüloz türevleri gibi biyobazlı malzemelere yönelim belirgin biçimde artmıştır. Bu malzemeler düşük gömülü enerji değerleri, karbon depolama kapasitesi ve iç mekân

hava kalitesine katkıları nedeniyle sürdürülebilir tasarımda önemli bir potansiyel sunmaktadır. Buna karşılık uzun dönem performans, nem ve biyolojik bozunma dayanımı gibi konularda veri eksiklikleri, geniş ölçekli uygulamaların sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Beton ve metal esaslı malzemelerde ise geri dönüştürülmüş içerik kullanımını artırmaya yönelik çalışmalar yoğunlaşmış; karbon azaltımı ile mekanik performansın dengelenmesi üzerine kapsamlı araştırmalar yürütülmüştür.

İç mekân hava kalitesi literatürde yükselen bir başka eğilimdir. VOC ve formaldehit emisyonlarının azaltılması, hem LCA çalışmalarında hem de sertifikasyon sistemlerinde kritik bir değerlendirme bileşeni olarak ele alınmaktadır. Yapıştırıcı, kaplama ve yalıtım ürünlerinde düşük VOC'lu alternatifler geliştirilmiş; bazı çalışmalarda bu ürünlerin sağlık üzerindeki uzun vadeli etkileri incelenmiştir. Böylece malzeme seçiminin yalnızca çevresel performansa değil, kullanıcı sağlığına da doğrudan etki ettiği yönünde güçlü kanıtlar oluşmuştur.

3.2 Literatürdeki Sınırlılıklar ve Metodolojik Sorunlar

Mevcut çalışmaların önemli bir bölümü, metodolojik tutarsızlıklar ve veri eksiklikleri nedeniyle karşılaştırılabilirlik sorunu taşımaktadır. LCA uygulamalarında kullanılan veri tabanlarının (Ecoinvent, GaBi, Ökobaudat vb.) farklılık göstermesi, bölgesel üretim verilerinin güncel olmaması ve sistem sınırlarının tutarlı tanımlanmaması sonuçlar arasında belirgin sapmalara yol açmaktadır. EN 15804 uyumunun her çalışmada sağlanmaması, üretim aşaması (A1–A3) verilerinin bazı sektörlerde yeterince şeffaf olmaması da bu problemi pekiştirmektedir.

Bunun yanında Modül D'nin birçok çalışmada ihmal edilmesi, geri dönüşüm veya yeniden kullanım potansiyeli yüksek malzemelerin gerçek çevresel performansının eksik değerlendirilmesine neden olmaktadır. Özellikle doğal malzemelerde uzun vadeli dayanıklılık, biyolojik bozunma davranışı ve yangın performansı gibi kritik kriterlere ilişkin deneysel verilerin sınırlı olması, bu malzemelerin tam ölçekli uygulamalarında belirsizlik yaratmaktadır.

Sertifikasyon sistemleri üzerine yapılan çalışmalar da benzer sınırlılıkları işaret etmektedir. DGNB'nin yaşam döngüsü göstergelerine yüksek ağırlık vermesi, tam LCA verisi bulunmayan bölgelerde uygulamayı güçleştirirken; BREEAM'in tedarik zinciri odaklı kriterleri bazı ülkelerde yerel standartlarla uyum sağlayamayabilmektedir. Bunun yanında, malzeme puanlama yapılarının çoğunun hâlâ "belge temini" esaslı olması, sertifikasyonların gerçek çevresel performans üzerindeki etkisinin zaman zaman tartışmalı kalmasına neden olmaktadır. Bu sınırlılıkların sistematik bir özeti ve literatürde önerilen çözüm yaklaşımları Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri

Literatür Sınırlılığı	Önerilen Çözüm Yaklaşımı
Veri tabanı farklılıkları	Ortak LCA veri setlerinin kullanımı; EN 15804 uyumlu raporlar
Bölgesel LCA eksiklikleri	Ulusal veri tabanı oluşturulması; sektör bazlı güncel verilerin sağlanması
Modül D'nin ihmal edilmesi	Geri kazanım, yeniden kullanım ve geri dönüşüm senaryolarının zorunlu raporlanması
Biyobazlı malzemelerde uzun dönem veri eksikliği	Uzun vadeli saha testleri, hızlandırılmış yaşlandırma deneyleri
Laboratuvar ölçeğine sıkışan çalışmalar	Tam ölçekli pilot projelerin artırılması
Sertifikasyon-LCA uyumsuzluğu	Sertifikasyon sistemleri için LCA tabanlı ortak puanlama modelleri geliştirilmesi

Araştırma eğilimleri incelendiğinde sürdürülebilir malzeme seçimi literatüründe aşağıdaki boşlukların öne çıktığı görülmektedir:

- ✓ Biyobazlı malzemeler için uzun vadeli performans verilerinin yetersizliği: Nem geçirgenliği, UV dayanımı, yangın davranışı, ısı iletkenliği ve mekanik özelliklerin zamanla değişimi yeterince çalışılmamıştır.
- ✓ Geri dönüştürülmüş içerikli malzemelerde tam ölçekli uygulama eksikliği: Literatürdeki çok sayıda çalışma laboratuvar ölçeğinde kalmakta; saha uygulamalarına ilişkin veri oldukça sınırlıdır.
- ✓ LCA-LCC entegrasyonunun yetersizliği: Ekonomik ve çevresel performansı birlikte değerlendiren entegre modeller oldukça azdır. Bu durum, sürdürülebilir malzeme kararlarının finansal açıdan optimize edilmesini güçleştirmektedir.
- ✓ Sertifikasyon kriterleri ile malzeme temelli LCA çıktıları arasında bütünleşik modellerin zayıflığı: LEED/BREEAM/DGNB malzeme kriterlerinin LCA ile doğrudan ilişkilendirildiği kapsamlı çalışmalar sınırlıdır.
- ✓ Bölgesel veri eksikliği: Gelişmekte olan ülkelerde üretim verileri, nakliye profilleri ve geri dönüşüm altyapısına ilişkin veri eksiklikleri, LCA hesaplamalarını ciddi biçimde etkilemektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu derleme, sürdürülebilir malzeme seçimini; yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA), uluslararası sertifikasyon sistemleri ve güncel malzeme araştırmaları ışığında bütüncül bir çerçevede ele almıştır. Bulgular, yapı sektöründe malzeme kaynaklı çevresel yüklerin azaltılmasının sürdürülebilirlik hedeflerinin ayrılmaz bir parçası olduğunu ortaya koymaktadır. Düşük karbonlu üretim yöntemleri, geri dönüştürülmüş içerik kullanımı, biyobazlı malzemeler ve düşük VOC emisyonlu ürünler çevresel kazanımlar açısından en güçlü eğilimlerdir. Buna karşın, LCA çalışmalarındaki metodolojik uyumsuzluklar, bölgesel veri eksiklikleri ve malzemelerin uzun dönem performansına ilişkin sınırlı deneysel veriler, karşılaştırılabilir ve kapsayıcı analizlerin yapılmasını güçleştirmektedir.

Bu derlemenin temel sonucu, sürdürülebilir malzeme seçiminin yalnızca teknik performans üzerinden değerlendirilmesinin yetersiz olduğudur. Çevresel etkilerin yaşam döngüsü boyunca ele alınması, malzeme kriterlerinin sertifikasyon sistemleriyle ilişkilendirilmesi ve malzemelerin kullanıcı sağlığına yönelik etkilerinin dikkate alınması, sürdürülebilir tasarımın karar mekanizmasını daha güçlü ve bilimsel bir zemine taşımaktadır.

- ✓ Gelecek çalışmalarda öncelik verilmesi gereken noktalar özetle şunlardır: LCA çalışmalarında ortak sistem sınırlarının benimsenmesi ve bölgesel veri tabanlarının güçlendirilmesi,
- ✓ Biyobazlı ve geri dönüştürülmüş malzemelerin uzun vadeli performansının tam ölçekli uygulamalarla değerlendirilmesi,
- ✓ Çevresel ve ekonomik performansı birlikte inceleyen LCA-LCC bütünlük modellerinin geliştirilmesi,
- ✓ Sertifikasyon sistemlerinin farklı coğrafyalara uyarlanabilirliğini artıracak teknik standartların iyileştirilmesi.

Genel olarak değerlendirildiğinde sürdürülebilir malzeme seçimi; çevresel, ekonomik ve sağlık temelli göstergelerin aynı çerçevede ele alınmasını gerektiren çok boyutlu bir süreçtir. Bu çalışma, mevcut literatürde dağınık şekilde yer alan malzeme özellikleri, yaşam döngüsü bulguları ve sertifikasyon kriterlerini bir araya getirerek yeşil bina tasarımında kullanılabilecek bütüncül bir referans sunmaktadır. Bu yönüyle, hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar için sürdürülebilir malzeme stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacak kapsamlı bir değerlendirme oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

- Aghaei Chadegani, A., Sadeghi, M., Marzouk, M., & Khatib, J. (2022). "Material-related credits in international green building rating systems: A comparative review." *Journal of Building Engineering*, 57, 104867. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104867>
- Assefa, S., Lee, H.-Y., & Shiue, F.-J. (2022). "Sustainability performance of green building rating systems (GBRSs) in an integration model." *Buildings*, 12(2), 208. <https://doi.org/10.3390/buildings12020208>
- BRE Global. (2023). *Breeam 2018 materials – Technical manual*. <https://www.breeam.com>
- Chi, B., Lu, W., Ye, M., Bao, Z., & Zhang, X. (2020). "Construction waste minimization in green building: A comparative analysis of LEED-NC 2009 certified projects in the US and China." *Journal of Cleaner Production*, 256, 120749. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120749>
- Çimen, A., & Çimen, S. (2024). "Modern hastaneler: İnovatif malzemelerle sağlık ve sürdürülebilirlik." *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 7(1), 70-75. <https://doi.org/10.51764/smutgd.1500779>
- Çimen, S. (2025). "Mechanical and high-temperature behavior of lightweight concrete with Zeytindalı and Bayburt stone waste." *Discov Appl Sci* 7, 1186. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07781-w>
- Çimen, S., Çağlar, H., Çağlar, A., & Can, Ö. (2020). "Effect of boron wastes on the engineering properties of perlite based brick." *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9(2), 50-56. <https://doi.org/10.46810/tdfd.731005>
- De Luca, P., Carbone, I., & Nagy, J. B. (2017). "Green building materials: A review of state of the art studies of innovative materials." *Journal of Green Building*, 12(4), 141-161. <https://doi.org/10.3992/1943-4618.12.4.141>
- Doan, D. T., Ghaffarianhoseini, A., Naismith, N., Zhang, T., Ghaffarianhoseini, A., & Tookey, J. (2017). "A critical comparison of green building rating systems." *Building and Environment*, 123, 243-260. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.007>
- Firoozi, A. A., Firoozi, A. A., Oyeboji, D. O., Avudaiappan, S., & Saavedra Flores, E. (2024). "Emerging trends in

- sustainable building materials: Technological innovations, enhanced performance, and future directions." *Results in Engineering*, 24, 103521. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103521>
- Global Alliance for Buildings and Construction. (2023). *Global status report for buildings and construction 2023*. <https://globalabc.org>
- Goodman, N., Rajagopalan, P., Francis, M., Nematollahi, N., Vardoulakis, S., & Steinemann, A. (2024). "Indoor volatile organic compounds in prefabricated timber buildings—Challenges and opportunities for sustainability." *Buildings*, 14(12), 3858. <https://doi.org/10.3390/buildings14123858>
- Green Building Information Gateway (GBIG). (2024). *LEED v4.1 materials update report*. <https://www.gbigo.org>
- Huang, Z., Zhou, H., Miao, Z., Tang, H., Lin, B., & Zhuang, W. (2024). "Life-cycle carbon emissions (LCCE) of buildings: Implications, calculations, and reductions." *Engineering*, 35, 115–139. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.10.017>
- International Energy Agency (IEA). (2022). *Buildings sector energy & CO₂ emissions*. <https://iea.org>
- ISO. (2020a). *ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*.
- ISO. (2020b). *ISO 14044: Life cycle assessment — Requirements and guidelines*.
- Kibert, C. J. (2022). *Sustainable construction: Green building design and delivery* (5th ed.). John Wiley & Sons.
- Liu, T., Chen, L., Yang, M., Sandanayake, M., Miao, P., Shi, Y., & Yap, P.-S. (2022). "Sustainability considerations of green buildings: A detailed overview on current advancements and future considerations." *Sustainability*, 14(21), 14393. <https://doi.org/10.3390/su142114393>
- Marchi, L., Antonini, E., & Politi, S. (2021). Green building rating systems (GBRSs). *Encyclopedia*, 1(4), 998–1009. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1040076>
- Masniari, O., & Koestoer, R. H. (2024). "Sustainable building materials for green construction: A review." *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, 9(2), 68–72.
- Park, J. (2017). "Critical review of the material criteria of building sustainability assessment tools." *Sustainability*, 9(2), 186. <https://doi.org/10.3390/su9020186>
- Röck, M., Saade, M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., & Passer, A. (2020). Embodied GHG emissions in buildings—A review of current trends. *Building and Environment*, 181, 106445. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106445>
- Taç, G., & Emekci, Ş. (2025). "Life cycle assessment and sustainable construction: A comprehensive review from theoretical foundations to practical strategies and innovative methods." *PLANARCH – Design and Planning Research*, 9(1), 79–89. <https://doi.org/10.54864/planarch.1527015>
- Tazmeen, T., & Mir, B. A. (2024). "Sustainability through materials: A review of green options in building construction." *Cleaner Materials*, 5, 100219. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2024.100206>
- Tezel, H., Çağlar, H., Çağlar, A., Can, Ö., & Çimen, S. (2020). "Effects of boric acid additive to pumice aggregate lightweight concrete properties." *International Journal of Scientific and Technological Research*, 6(9), 1-10. <https://doi.org/10.7176/IJSTR/6-09-01>
- Wu, J., Ye, X., & Cui, H. (2025). "Recycled materials in construction: Trends, status, and future of research." *Sustainability*, 17, 2636. <https://doi.org/10.3390/su17062636>
- Yahia, A. K. M., Rahman, M. M., Shahjalal, M., & Morshed, A. (2024). "Sustainable materials selection in building design and construction." *International Journal of Science and Engineering*, 1(4), 106–119. <https://doi.org/10.62304/ijse.v1i04.198>
- Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., & Aranda Usón, A. (2011). "Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of sustainability performance." *Building and Environment*, 46(5), 1133–1140. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>
- Zhang, R., Zhang, Y., Sun, G., & Wei, H. (2025). "Low-carbon and recycled mineral composite materials for sustainable infrastructure: A comprehensive review." *Sustainability*, 17(17), 7908. <https://doi.org/10.3390/su17177908>