

Fenntarthatósági átmenet az építőiparban: a körforgásos gazdaság elmélete és gyakorlati korlátai

Szőke Brigitta

Egyetemi adjunktus, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem,
szoke.brigitta@uni-mate.hu

Veres Boglárka

Egyetemi hallgató, Gazdálkodás és menedzsment, Kodolányi János Egyetem
veresbogi@yahoo.com

Absztrakt: A tanulmány célja a körforgásos gazdaság elméleti és gyakorlati alkalmazásának vizsgálata az építőiparban, különös tekintettel az anyagkörforgás fenntarthatósági kihívásaira. A cikk bemutatja a körforgásos gazdaság alapelveit, fejlődését és építőipari jelentőségét. Majd elemzi a gyakorlati problémákat melyek bontási hulladékok kezelésével, újrahasznosított betonokkal és a modern kompozit anyagokkal kapcsolatos fordulnak elő. A cikk szisztematikus irodalmi áttekintés alapján azonosítja a legfőbb technológiai, gazdasági és szabályozási akadályokat, valamint rávilágít a körforgásos koncepció elméleti korlátaira is. A dolgozat javaslatokat fogalmaz meg új anyagfejlesztési irányokra, gazdasági ösztönzők kialakítására és a szabályozási környezet megerősítésére. Hozzájárulva az építőipar fenntarthatósági átmenetének támogatásához.

Kulcsszavak: körforgásos gazdaság, építőipar, anyagkörforgás, fenntarthatóság.

1 Bevezetés

Tanulmányunk fő kérdése, hogy milyen gyakorlati és rendszerszintű akadályok nehezítik a körforgásos gazdaság elveinek adaptációját az építőiparban, és milyen feltételek szükségesek ahhoz, hogy ezek az elvek fokozatosan és szelektíven beépüljenek az iparági gyakorlatba? Ebből adódóan a kutatásunk célja annak feltárása, hogy a körforgásos gazdaság elméleti alapelvei – különösen az anyagkörforgás, a hulladékmegelőzés és az újrahasználat – milyen konkrét technológiai, gazdasági és szabályozási akadályokba ütköznek az építőiparban. A tanulmány célja továbbá, hogy javaslatokat tegyen realisztikus, szektorra szabott

körforgásos modellekre, valamint az ezekhez szükséges rendszerszintű átalakítási lépésekre. Bár a körforgásos gazdaság elvei elméleti szinten széles körű támogatást élveznek, azok gyakorlati megvalósítása az építőiparban csak szelektív és fokozatos adaptációval lehetséges, mivel a jelenlegi technológiai, gazdasági és szabályozási keretek nem alkalmasak a teljes körforgásosság biztosítására.

Az építőipar a globális gazdaság egyik legnagyobb erőforrás felhasználója és szén-dioxid kibocsátója: a globálisan kitermelt nyersanyagok mintegy 50%-át használja fel, míg a teljes épített környezet beleértve az épületek üzemeltetését is a CO₂ kibocsátás közel 40%-ért felelős (Geissdoerfer et al., 2017; UNEP, 2019; Juhász, Schaul & Veres, 2022). A lineáris gazdasági modell, amely a nyersanyagok kitermelésén, felhasználásán és hulladékként való kezelésén alapul, hosszú távon fenntarthatatlan mind környezeti, mind gazdasági szempontból. A körforgásos gazdaság (circular economy) koncepciója ezzel szemben egy olyan átfogó megközelítést kínál, amely az anyagok és termékek értékének maximalizálására, a hulladékképződés és az erőforrás felhasználás minimalizálására törekszik (Murray, Skene, & Haynes, 2017).

Az építőipari fenntarthatóság megvalósításához kulcsszerepet játszik a körforgásos gazdaság elveinek gyakorlati alkalmazása. Azonban az iparág sajátosságai például a hosszú élettartamú termékek, a bonyolult anyagösszetételű szerkezetek és a bontási technológiák korlátai komoly kihívásokat jelentenek a zárt anyagkörforgás megvalósításában (Sarmiento et al., 2021). Különösen problémás a modern, innovatív anyagok, új kompozit rendszerek kezelése, mint például a nano adalékanyagok, kiegészítő cementkötő anyagok és alternatív kötőanyagok, szálerősített betonok vagy Fényáteresztő beton (Li et al., 2017; Kazmi et al., 2021; Santamaria, Belboom & Léonard, 2023; Li & Yu, 2020; Kim et al., 2021; Rezaei & Yazdi, 2025; Meyer, 2007). Amelyek bár számos műszaki előnyt kínálnak, új típusú újrahasznosítási és környezetgazdasági dilemmákat is felvetnek (Kazmi et al., 2018).

Ezek a kihívások rávilágítanak arra, hogy a fenntarthatósági átmenet nem pusztán technológiai fejlesztések kérdése, hanem mélyebb rendszerszintű átalakulást igényel, amelyek alatt intézményi, piaci és technológiai struktúrákat átfogó adaptációk érthetőek. A körforgásos gazdaság elméleti keretei gyakran optimista forgatókönyveket vázolnak fel, azonban a gyakorlati megvalósítás során számos strukturális, technikai és gazdasági akadály nehezíti az átmenetet (Korhonen et al., 2018).

Jelen tanulmány célja, hogy szisztematikus irodalomkutatás alapján feltérképezze a körforgásos gazdaság alkalmazásának lehetőségeit és korlátait az építőiparban. Külön figyelmet fordít az anyagkörforgás, az újrahasznosítási technológiák, valamint a környezeti és gazdasági fenntarthatóság közötti összefüggések kritikai elemzésére. A dolgozat célja nem csupán a meglévő tudás összegzése, hanem a jövőbeli kutatási irányok azonosítása is, amelyek elősegíthetik az építőipar fenntarthatósági átmenetének felgyorsítását.

2 A körforgásos gazdaság elméleti háttere

2.1 A körforgásos gazdaság definíciója és alapelvei

A körforgásos gazdaság (circular economy, CE) olyan rendszerszintű megközelítés, amely az anyagok, termékek és erőforrások értékének maximalizálására törekszik a gazdasági folyamatok során, miközben minimalizálja a hulladéktermelést és a környezeti hatásokat (Murray, Skene, & Haynes, 2017). A koncepció a hagyományos lineáris modell („kitermelés – gyártás – használat – hulladék”) alternatívájaként jelent meg, azzal a céllal, hogy az erőforrások zárt körforgásban maradjanak.

A körforgásos gazdaság alapelvei között kiemelkedő szerepet játszanak: az anyagok újrahaználata (reuse), az anyagok újrafeldolgozása (recycle), a termékek élettartamának meghosszabbítása (repair, remanufacture), valamint a hulladék keletkezésének megelőzése (reduce). Ezen elvek összehangolt alkalmazása szükséges ahhoz, hogy a gazdasági növekedést ne az erőforrások intenzív felhasználására, hanem azok hatékony körforgására alapozzák (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

2.1.1 A körforgásos gazdaság fejlődése és jelentősége az építőiparban

Az építőipar volumenéből kiindulva, különösen kritikus szereplője a globális körforgásos átmenetnek. A szektor a világ erőforrás és hulladéktermelésének több mint 30%-áért felelős (Tam et al., 2018). A hulladéklerakóba kerülő építési, bontási hulladék (C&D waste) mennyiségének csökkentése, valamint az újrahazsnosított építőanyagok piaci integrációja alapvető fontosságú a fenntartható fejlődés szempontjából. Az elmúlt években számos országban született stratégiák és szabályozások a körforgásos építőipar előmozdítására, például kötelező újrahazsnosítási arányok előírásával, zöld közbeszerzési irányelvekkel vagy anyagpaszportok alkalmazásával (Ghisellini, Cialani, & Ulgiati, 2016). A körforgásos megközelítés az építőiparban az alábbi fő területeken jelenik meg: újrahazsnosított adalékanyagok alkalmazása betonban, építmények moduláris, könnyen szétbontható kialakítása, bontási hulladékok szelektív gyűjtése és kezelése, innovatív anyagok fejlesztése a zárt körforgás biztosítására.

2.2 Főbb körforgásos modellek és stratégiák az anyagkezelésben

A körforgásos gazdaság gyakorlati megvalósításához többféle modell és stratégia létezik, amelyek közül az építőiparban különösen relevánsak: Zárt anyagkörforgás (Closed-loop recycling): az anyag újrafelhasználása ugyanarra a célra, például

beton betonban újrahasznosítás. Downcycling: az anyag újrahasznosítása során bekövetkező minőségi vagy funkcionális értékcsökkenés, amely korlátozza az eredetihez hasonló alkalmazási lehetőségeket. Tipikus példa erre, amikor betontörmeléket alacsonyabb műszaki igényű felhasználásra, például útalapként hasznosítanak újra. Upcycling: az anyag értékének növelése, magasabb hozzáadott értékű felhasználás, amely az építőiparban kevésbé elterjedt. Termék életciklus hosszabbítása: az építmények hosszabb élettartamú, könnyen karbantartható kialakítása. E stratégiák kombinálása nélkül a körforgásos célkitűzések elérése az építőiparban jelentős akadályokba ütközhet (Korhonen et al., 2018).

2.3 A körforgásos gazdaság korlátai és kritikái

Bár a körforgásos gazdaság elméleti modelljei vonzóak, a gyakorlati alkalmazás során számos korlát és ellentmondás jelentkezik, mint például technológiai akadályok, az az nem minden anyag újrahasznosítható veszteségmentesen, különösen a kompozit anyagok és kevert törmelékek esetében. Továbbá gazdasági ösztönzők hiánya, az elsődleges nyersanyagok gyakran olcsóbbak, mint az újrahasznosítottak, ami csökkenti a piaci keresletet a másodlagos anyagok iránt (Ness & Xing, 2017). A környezeti kompromisszumokra is szükség van, az újrahasznosítási folyamatok maguk is energiaigényesek és környezetszennyezők lehetnek. Szabályozási és piaci strukturális akadályok fenntálnak, hiányosak és nem teljesen kiforrottak az egységes standardok, minősítési rendszerek és a piacot ösztönző politikák.

3 A fenntarthatósági kihívások és lehetőségek az építőipari anyagkörforgásban

3.1 A bontási hulladék kezelése és problémái

Az építési, bontási hulladék (C&D waste) a világon keletkező hulladékok egyik legnagyobb volumenű kategóriája, amely az anyagkörforgás szempontjából egyszerre jelent kihívást és lehetőséget. Az anyagok széles spektruma beton, acél, fa, téglá, műanyagok jelennek meg a bontási folyamatokban, gyakran kevert, szennyezett formában (Sarmiento et al., 2021). A nem megfelelő szelektív bontás következtében az anyagok minősége leromlik, újrahasznosításuk költségesebb, vagy egyenesen lehetetlenné válik. A hulladékok szelektív gyűjtése és előzetes szétválogatása az első kritikus lépés a körforgásos modell irányába. Azonban a bontási projektek gazdasági és időbeli korlátai gyakran nem kedveznek ennek a gyakorlatnak. Emellett a régebbi építmények anyagösszetételének heterogenitása is nehezíti az anyagáramok tiszta visszanyerését (Tam et al., 2018).

3.2 Újrahasznosított beton és adalékanyagok alkalmazása

A beton az építőipar egyik legmeghatározóbb alapanyaga, amely előállítása jelentős környezeti terheléssel, elsősorban magas szén-dioxid kibocsátással jár. Az újrahasznosított adalékanyagú beton angolul Recycled Aggregate Concrete (RAC) fejlesztése a körforgásos gazdaság egyik kulcsterülete, amely során a bontott betonból származó adalékanyagokat új betonok előállítására használják fel (Tam et al., 2018). Technológiai szempontból az újrahasznosított adalékanyagok alkalmazása számos kompromisszumot igényel: alacsonyabb szilárdság, magasabb vízfelvétel, változó minőség. Ezek miatt a RAC elsősorban nem szerkezeti célokra, hanem alacsonyabb követelményű alkalmazásokban (pl. útalap, töltőrétegek) vált elterjedté (Ghisellini et al., 2016). Környezeti szempontból azonban az újrahasznosított beton jelentős CO₂ megtakarítást eredményezhet az elsődleges anyaghasználathoz képest, feltéve, hogy a feldolgozási folyamat energiahatékony és a szállítási távolságok minimalizáltak.

3.3 Modern anyagok újrahasznosítási dilemmái

Az innovatív, kompozit alapú építőanyagok új típusú kihívásokat vetnek fel a körforgásos anyagkezelésben. Bár a szálerősített betonok előnyei közé tartozik a kivitelezési idő és költségek csökkenése, valamint a repedésállóság növelése, újrahasznosításuk technológiai szempontból problematikus (Kazmi et al., 2018). A bontási és darálási folyamatok során a szálak töredeznék, szennyeznek az újrahasznosított adalékot, és rontják a beton mechanikai tulajdonságait. Emellett egyre nagyobb aggodalom övezi a mikroműanyag kibocsátást is, amely a szintetikus szálak mechanikai degradációja során keletkezhet (Napier et al., 2022). Más kompozit anyagok, például az üvegszálás vagy karbonrostos kompozitok esetében hasonló problémák jelentkeznek: az anyagok szétválasztása, tisztítása és újrahasznosítása jelenleg költséges és technológiailag korlátozott. Az acélszál erősítésű betonok sem jelentenek kivételt a fent említett opcióktól. Ezek újrahasznosítása is jelentős munkafolyamatot igényel.

3.4 Gazdasági szempontok

A körforgásos gazdaság építőipari megvalósíthatósága elsősorban a gazdasági ösztönzők rendelkezésre állásától, valamint az újrahasznosított és elsődleges anyagok költségversenyétől függ. Az újrahasznosított anyagok előállítása sok esetben még mindig drágább, mint az elsődleges nyersanyagok beszerzése, különösen akkor, ha a hulladék szelektálása, feldolgozása és minősítése magas költségekkel jár (Ness & Xing, 2017). A piac fejlődését tovább akadályozza a bizalomhiány az újrahasznosított anyagok minőségével szemben, valamint a szabályozási keretek hiányosságai. Bár több országban léteznek célzott támogatási rendszerek, mint például a másodnyersanyagok preferált besorolása

közbeszerzésekben vagy a hulladék újrahasznosításhoz kapcsolódó adókedvezmények, ezek gyakorlati hatása gyakran nem elégséges a piaci dinamika átalakításához. Az építőipar körforgásosságának gazdasági realitása jelenleg még nagyrészt projektspecifikus: ott valósul meg, ahol a helyi anyagáramok, szabályozási ösztönzők és piaci kereslet találkoznak.

4 Kritikai értékelés: korlátok, ellentmondások és jövőbeli irányok az építőipari körforgásos gazdaságban

4.1 Technológiai korlátok és gyakorlati akadályok

A körforgásos gazdaság építőipari alkalmazása számos technológiai kihívással szembesül. A bontott anyagok különösen a beton és a kompozit alapú szerkezetek újrahasznosítása során jelentős minőségromlás léphet fel. A darálási és feldolgozási folyamatok során az anyagok fizikai és kémiai tulajdonságai módosulnak, ami korlátozza az újrafelhasználhatóságot magasabb értékű alkalmazásokban (Tam et al., 2018).

Kiemelt problémát jelent a modern kompozit anyagok, például a szálerősített betonok, üvegszálas és karbonalapú rendszerek újrahasznosítása. Ezen anyagok szétválasztása technológiailag bonyolult, energiaigényes, és gyakran nem biztosítja a visszanyert anyagok megfelelő minőségét (Napier et al., 2022). A technológiai fejlesztések jelenleg nem tudják teljes mértékben megoldani az ilyen komplex anyagok körkörös visszaforgatását.

4.2 Gazdasági és piaci akadályok

A körforgásos gazdasági modell fenntarthatósága az építőiparban szorosan összefügg a gazdasági realitásokkal. Az elsődleges nyersanyagok (pl. természetes kavics, cement) piaci ára sok esetben alacsonyabb, mint az újrahasznosított anyagoké, különösen, ha figyelembe vesszük a hulladék feldolgozásának és minősítési ellenőrzésének költségeit (Ness & Xing, 2017). A piaci kereslet az újrahasznosított építőanyagok iránt továbbra is alacsony, amit részben a minőséggel szembeni bizalomhiány, részben a szabályozási ösztönzők gyengesége magyaráz. Habár bizonyos állami programok (pl. zöld közbeszerzés) javítottak a helyzeten, a piaci dinamika önmagában nem elegendő az újrahasznosított anyagok széles körű elterjedéséhez.

4.3 Szabályozási és rendszerbeli problémák

A jogi és szabályozási környezet szintén komoly akadályokat gördít a körforgásos megoldások széleskörű alkalmazása elé. Az újrahasznosított anyagokra vonatkozó követelményrendszer sok esetben hiányos vagy nem egységes. A szabványok eltérései országonként, sőt régióként is jelentősek, ami akadályozza a másodnyersanyagok szabad áramlását (Ghisellini et al., 2016). Emellett gyakran hiányzik az átlátható minősítési rendszer az újrahasznosított termékekre, ami tovább csökkenti a bizalmat és nehezíti az anyagok kereskedelmi forgalmát. A körforgásos gazdaság elveinek intézményi beágyazottsága tehát még korlátozott, főleg az építőiparban.

4.4 A körforgásos gazdaság koncepciójának belső korlátai

Nemcsak a gyakorlati, hanem az elméleti keretek is korlátokba ütköznek. Korhonen et al. (2018) felhívják a figyelmet arra, hogy a teljes körforgásosság fizikai és gazdasági értelemben is elérhetetlen: az anyagok használata során elkerülhetetlenek a veszteségek (pl. kopás, lebomlás) és az újrahasznosítási folyamatok önmagukban is energiaigényesek. Ez a felismerés arra utal, hogy a körforgásos gazdaság nem egy mindenre kiterjedő megoldás, hanem inkább egy olyan optimalizálási törekvés, amely a környezeti hatások minimalizálását célozza meg, de nem szünteti meg teljesen azokat. Különösen az építőiparban, ahol az anyagáramok komplexek, a szerkezetek hosszú élettartamúak, és a bontás sokszor nehézkes, a körforgásosság gyakorlati megvalósítása csak részleges lehet.

4.5 Javasolt jövőbeli kutatási irányok

A körforgásos építőipar fejlődése érdekében több területen szükséges további kutatás és innováció. Egyik fontos terület az új anyagok fejlesztése, amelyek könnyebben szétválaszthatók vagy környezetbarát módon bonthatók. Innovatív szeparációs technológiák létrehozása, jelenlegiek fejlesztése a bontási hulladékok jobb minőségű újrahasznosításához. Életciklus értékelések (LCA) kiterjesztése, gyakori használata az új anyagokra és technológiákra. Egységesített szabványok és minősítési rendszerek kidolgozása az újrahasznosított építőanyagokra. Szükséges egységesített szabványrendszerek és megbízható minősítési protokollok kialakítása az újrahasznosított építőanyagok számára, amelyek biztosítják azok műszaki megfelelőségét, piaci elfogadottságát és nemzetközi alkalmazhatóságát. Ezek az irányok hozzájárulhatnak ahhoz, hogy az építőipar valós lépéseket tegyen a fenntarthatósági átmenet megvalósítása felé a körforgásos gazdaság keretében.

Következtetések

A tanulmány a körforgásos gazdaság építőipari alkalmazásának lehetőségeit és korlátait vizsgálja, különös tekintettel az anyagkörforgás megvalósításának gyakorlati nehézségeire. A kutatás során egyértelművé vált, hogy bár a körforgásos elvek, mint a hulladékmegelőzés, újrahasználat és az anyagok értékének megőrzése elméleti szinten széles körben támogatottak, gyakorlati adaptációjuk számos akadályba ütközik. Korhonen és munkatársai (2018) külön kiemelik, hogy a teljes körforgásosság ideálja fizikailag és gazdaságilag is korlátozottan valósítható meg, ezért szükséges a realisztikus, szektorra szabott körforgásos modellek kialakítása. Különösen nagy kihívást jelent a bontási hulladék heterogén jellege, a szelektív visszanyerés alacsony szintje, valamint a modern, kompozit alapú anyagok újrahasznosításának technológiai korlátai. Az új típusú építőanyagok például a szálerősített betonok bár jelentős műszaki előnyöket kínálnak, új típusú újrahasznosítási és környezetgazdasági dilemmákat vetnek fel, amelyekre a jelenlegi iparági gyakorlat még nem kínál megfelelő megoldást. A gazdasági tényezők szintén komolyan befolyásolják a körforgásos átmenet realitását. Az elsődleges nyersanyagok viszonylag alacsony ára, valamint a másodlagos anyagokkal szembeni minőségi bizalmatlanság gátolja a piac fejlődését. Ehhez társul a szabályozási keretrendszerek széttagoltsága, amely nem kedvez az újrahasznosított építőanyagok széleskörű alkalmazásának. A tanulmány megállapításai arra mutatnak rá, hogy a körforgásos gazdaság nem univerzális megoldás, sokkal inkább egy olyan irány, amely szelektív és fokozatos adaptációval járható be. A fenntartható építőipar felé vezető út nem csupán technológiai fejlesztést, hanem rendszerszintű átalakítást is igényel: új típusú anyagtervezést, bontási technológiák fejlesztését, egységesített szabványokat és hatékony ösztönző rendszert. A jövőbeli kutatásoknak ezeken a pontokon szükséges elmélyülniük annak érdekében, hogy a körforgásos átmenet ne csupán célkitűzés, hanem fokozatosan megvalósítható gyakorlattá váljon az építőiparban.

Hivatkozások

- [1] Ellen MacArthur Foundation. (2013). Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition. https://kidv.nl/media/rapportages/towards_a_circular_economy.pdf
- [2] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy - A new sustainability paradigm? Journal of Cleaner Production, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- [3] Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>

- [4] Juhász, K. P., Schaul, P., & Veres, B. (2022). CO₂-optimization design of a concrete slab structure. 13th Central European Congress on Concrete Engineering (CCC 2022), Zakopane, 13–14 September.
- [5] Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Wu, Y.-F., Patnaikuni, I., & Zhou, Y. (2018). Effect of macrosynthetic fibers on the fracture energy and mechanical properties of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 189, 262–273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.091>
- [6] Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Wu, Y.-F., Patnaikuni, I., & Zhou, Y. (2021). Valorizing recycled concrete aggregates through mix design optimization. *Sustainability*, 13(3), 1373. <https://doi.org/10.3390/su13031373>
- [7] Kim, Y., Lee, H. S., & Kang, S. H. (2021). A review of fiber-reinforced concrete for energy-efficient building construction. *Buildings*, 11(10), 480. <https://doi.org/10.3390/buildings11100480>
- [8] Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- [9] Li, L., & Yu, M. (2020). Research progress on fiber-reinforced concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 265, 120250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120250>
- [10] Li, Y., Samad, Y. A., Taha, T., Cai, G., & Fan, X. (2017). Inkjet printing of stretchable graphene conductors on textiles for wearable electronics. *Advanced Functional Materials*, 27(28), 1705183. <https://doi.org/10.1002/adfm.201705183>
- [11] Meyer, C. (2007). The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 29(8), 601–605. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.005>
- [12] Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), 369–380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
- [13] Napier, R., et al. (2022). Microplastic generation during mechanical processing of fiber-reinforced composites. *Journal of Cleaner Production*, 371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133564>
- [14] Ness, D. A., & Xing, K. (2017). Towards a Resource-Efficient Built Environment: A Literature Review and Conceptual Model. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 572–592. <https://doi.org/10.1111/jiec.12545>
- [15] Rezaei, H., & Yazdi, M. A. (2025). Circular economy pathways in construction: A systems approach. *Circular Economy and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00209-9>

- [16] Santamaria, E., Belboom, S., & Léonard, A. (2023). Comparative LCA of different types of concrete for sustainability assessment of a single-family house. *Cleaner Materials*, 9, 100205. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100205>
- [17] Sarmiento, A. M., Yepes, V., & Alcalá, J. (2021). Circular economy in concrete construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00656. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00656>
- [18] Tam, V. W. Y., Soomro, M., & Evangelista, A. C. J. (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications. *Construction and Building Materials*, 172, 272–287. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>