



PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM
MŰSZAKI ÉS INFORMATIKAI KAR
ÉPÍTÉSZETI TANSZÉK



**AZ ÉPÍTÉSZETI TERVEZÉS KORAI
SZAKASZÁBAN, ÉPÍTMÉNYINFORMÁCIÓS MODELLBE
(BIM) IMPLEMENTÁLHATÓ ÉLETCIKLUS-ÉRTÉKELÉSI
(LCA) MÓDSZEREK VIZSGÁLATA, CSALÁDI HÁZAK ÉS
KISMÉRETŰ KÖZÉPÜLETEK ESETÉBEN**

(Investigation of Life Cycle Assessment (LCA) methods that can be implemented into Building Information Model (BIM) in the early stages of architectural design for single-family houses and small public buildings)

Konzulens:
Dr. Rák Olivér
Pécsi Tudományegyetem
Adjunktus

Készítette:
Simon Dóra Erika
KYXCZC
Építészmérnök (o) hallgató
Évfolyam: 2019. évfolyam

PÉCS
2024.10.07.
2024/25 – Őszi félév

„Ha nem tudod megmérni, nem tudod fejleszteni sem”

- *Sir William Thomson, Lord Kelvin*

TARTALOM JEGYZÉK

Tartalom jegyzék	2
Bevezetés	3
Motiváció és Célkitűzés.....	6
1. Kutatási Metódus	8
1.1. Kutatási metódus rövid leírása.....	8
1.2. Kutatási Kérdés Pontos Megfogalmazása.....	9
1.3. Adatbázisok, források, keresési stratégia.....	10
1.4. PRISMA módszer	10
1.5. PRISMA meghatározott kritériumok.....	12
1.6. Kutatások elemzése.....	15
2. A fenntartható építészet	17
2.1. 1,5°C jelentősége.....	17
2.2. Körforgásos gazdaság	19
3. Építményinformációs modellezés (BIM).....	20
3.1. A BIM Definíciója és Célja	20
3.2. A BIM szerepe az építészeti tervezésben	21
4. Az Életciklus-értékelés (LCA) Áttekintése	22
4.1. Az LCA Definíciója és Célja	22
4.2. Az LCA elvégzésének általános keret rendszere	23
4.3. 0LCA az Építészeti Tervezésben	26
4.4. Adatbázisok, Környezeti termék nyilatkozatok	27
4.5. Az LCA integrálásának célja a BIM-be, és annak szükségessége.....	28
5. A szisztematikus irodalom kutatás eredményei.....	29
5.1. A kiválasztott források elemzése	29
5.2. Átfogó cikkek, irodalmi kutatások a témában	31
5.3. LCA és BIM Integrációjának vizsgálata:.....	34
5.4. LCA vizsgálata a tervezés korai szakaszában:	37
5.5. Kisméretű középületeken és családi házakon elvégzett LCA:	39
6. Következtetés, összefoglalás	42
Köszönetnyilvánítás.....	44
Hallgatói nyilatkozat.....	45
Irodalomjegyzék	46

BEVEZETÉS

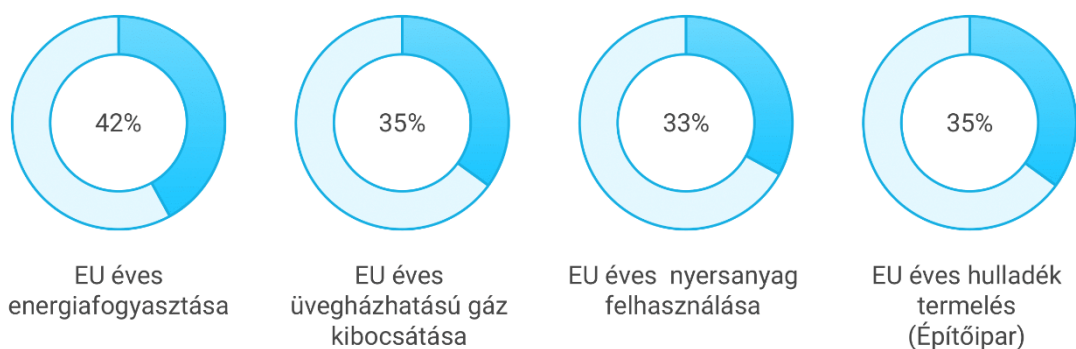
Az emberiség népessége, az elmúlt évszázadban drasztikusan megnövekedett, amely számos problémát okozott természetes környezetünkben. A tengerek elszennyeződtek, kevesebb lett az érintetlen természetes övezet, valamint a globális felmelegedés, mint olyan jelenség jelentősen felgyorsult az emberiség által kibocsátott üvegház hatású gázok miatt. Ennek ellenére számos kutatás szerint, a népesség növekedése nem áll le.

Jelenlegi becslések szerint 8,2 billiárd ember él a földön. A különböző kutatások egyetértenek abban, hogy ez a növekedési ráta nem fog lelassulni a következő 3-4 évtizedben, vagy még később sem. Egyes kutatások szerint az emberiség népessége 2065-ben éri el a csúcspontot 9.73 billiárddal [1], míg más kutatások szerint 2100-ra akár 11,2 billiárdra is gyarapodhat az emberiség népessége [2].

Ezeket a számokat tekintve elmondható, hogy ezeknek az embereknek, otthonra, lakhatásra lesz szükségük. Az egy ember számára szükséges négyzetméter száma nagyon képlékeny, nagyban függ kultúrától, az adott ország gazdasági álláspontjától. Ezek alapján a minimumnak véve a WHO (World Health Organization) által meghatározott vészhelyzeti menedékhely minimális méretét [3], ami 4,5 m²/ember, elmondható hogy 2065-re, 6,88 billiárd m² további építményt kell létrehoznunk, csak lakhatási célra.

Az építő ipar azonban már jelenleg is drasztikus mértékben túl terheli a földet, és jelentős környezeti hatásokat okoz, amelyek súlyosbíthatják a klímaváltozás mértékét, és gyorsaságát. Az Európai Környezetvédelmi Ügynökség 2024-es felmérése szerint, Európa teljes karbon lábnyomának több mint 30%-áért felelős az építőipar, az épületek

Az épületek környezeti hatása az EU-ban



1. ábra Az építőipar és az épületek évi környezeti hatása az EU-ban

üzemeltetése és elbontása. Tovább bontva ezt a számot kijelenthető, hogy az épületek felelősek az EU éves energiafogyasztásának 42%-áért, az üvegházhatást okozó gázok (GhG) éves kibocsátásának 35%-áért, valamint Az EU éves nyersanyag felhasználásának közel egyharmadáért. Az építőipar (nem számítva az üzemeltetést) felelős az EU éves teljes hulladék termelésének 35%-áért és az éves nyersanyag felhasználás 50%-áért, és a teljes GHG kibocsátás 5-12%-áért [4].

Ennek következményi érzékelhetőek már napjainkban is az építő anyagok hiányában, azok árának radikális növekedésében, valamint természetes környezetünk rohamos romlásában, változásában és szélsőséges esetekben az egyre gyakoribb természeti katasztrófákban.

Ezek alapján a világ több kormánya, és szervezete számos megállapodást, rendeletet és jogszabályt hozott létre, amelyek célja, hogy előrelendítsék a fenntartható fejlődést, minden iparág terén, annak érdekében, hogy visszafordítható legyen a természetes környezet kipusztulása, a légkör és a vízháztartás elszennyeződése.

Az egyik legismertebb ilyen megállapodás az úgynevezett „Európai Zöld Megállapodás” (European Green Deal), amely Magyarországon és az összes Európai Unió országban jelenleg is érvényben lévő megállapodás. Céljai között az egyik kiemelt, hogy az üvegházhatású gáz kibocsátás terén, 1990 és 2018 között elért 23%-os csökkenést, 2050-re 60%-ra csökkentse [5].

Ennek a megállapodásnak megfelelően, és a hasonló világszerte érvényes „zöld irányelv” megállapodásoknak megfelelően, a világ kormányai, számos rendeletet és jogszabályt hoztak létre, és jelentős mennyiségű tervezett rendelet van, amelyek az elkövetkezendő években várhatóan életbe fognak lépni. Azonban ezek a rendeletek is folyamatosan fejlődnek, változnak illetve bizonyos esetekben kicserélődnek.

Ezen rendeleteknek a betartásához jelentős beruházásokra, fejlesztésekre, képzésekre, módszertanok kidolgozására van szükség a közel jövőben, amiknek önmagukban is a fenntartható stratégiáknak megfelelően kell létre jönniük.

Ezen jelenleg is fejlődésben lévő eszközök, módszertanok között említendőek az életciklus elemzések is, amelyeknek használata, egyre nagyobb figyelmet kapnak, több országban ajánlottá és a közel jövőben kötelezővé válhatnak. Ez az „eszköz” nagyban segítheti, az építőiparnak a gyökeres átalakulását egy tudatosabb irányzat felé azáltal,

ezzel előrelendítve a fenntartható tervezési gyakorlatok alkalmazását, amelyek képesek csökkenteni, minimalizálni a környezetre gyakorolt hatásokat.

Az életciklus-értékelés (LCA) elősegítheti, hogy a tervezők már a projekt korai szakaszaiban fontos döntéseket, tudatosan a fenntarthatósági elveknek megfelelően hozzanak meg, amelyek jelentős mértékben befolyásolhatják az épületek teljes életciklusára vetített mutatóit.

Azonban jelenleg nincs meghatározott, módszertan az LCA-k elvégzésére. Ez nagyban gátolhatja az életciklus elemzések elterjedését és alkalmazását. Az élet ciklus elemzések kimenetelét nagyban befolyásolja, hogy milyen indokkal készítették azt, mit vizsgáltak, és milyen módon, így szabályozás nélkül nem biztos, hogy két LCA releváns módon összehasonlítható.

Az építőiparban a korábban említett ponthoz képest, súlyosbító tényező, hogy az életciklus elemzés elvégzése egy egész épületre vetítve, nagyon bonyolult és hosszadalmas folyamatot is jelenthet.

Kutatásom során azt szeretném megvizsgálni, hogy az életciklus elemzések milyen módon alkalmazhatóak a mindennapi BIM-es munkafolyamatok során, világszerte milyen LCA-BIM integrációs folyamatokat alkalmaznak, azoknak milyen hátrányaik, előnyeik, hiányosságaik, nehézségeik vannak, azok milyen formában fejleszthetők.

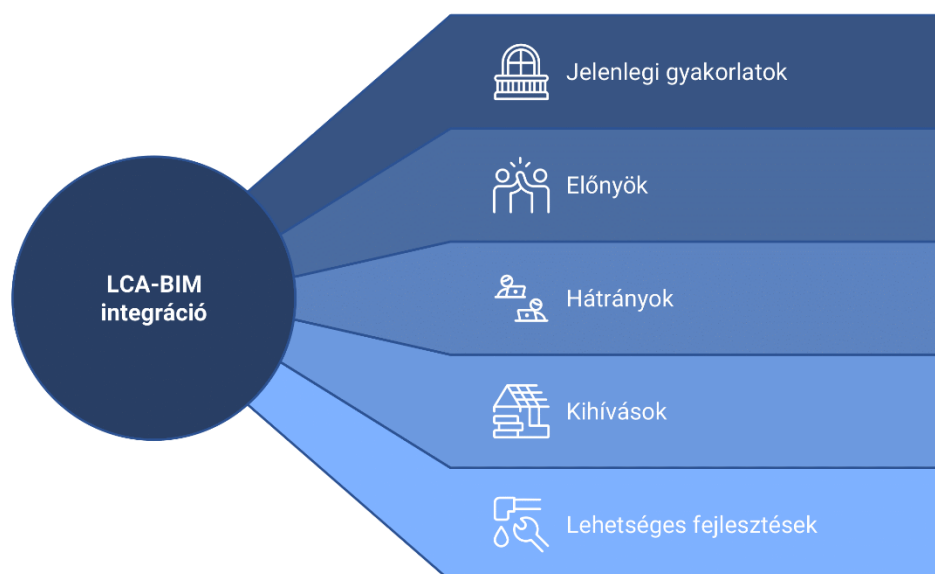
MOTIVÁCIÓ ÉS CÉLKITŰZÉS

Az építőipar fenntartható fejlődése az elmúlt években jelentősen fellendült részben az egyre szigorúbb környezetvédelmi előírások miatt, részben az ipar egyre nagyobb felelősségvállalása miatt is.

Mint leendő építész, véleményem szerint kiemelkedően fontos feladata és kötelezettsége minden tervező mérnöknek, hogy munkája során olyan környezet tudatos döntéseket hozzon, amely nemcsak a saját munkáját teszi fenntarthatóbbá, hanem hozzájárul a környezeti hatások csökkentéséhez is. Ehhez azonban szükségesek lehetnek, olyan eszközök és módszertanok alkalmazása is, amivel a tervezők számszerűen is bizonyítani tudják, hogy tervezési döntéseiket milyen okok miatt hozták meg.

Az életciklus-értékelés (LCA) ebben lehet nagy segítségére az építészeknek. A környezeti hatásokat átfogóan értékelő eszközök bevezetése már a tervezési folyamat korai szakaszában jelentősen befolyásolhatja a tervezési folyamat kimenetelét is. Azonban az ilyen folyamatok manuális módszerek elvégzésével hosszadalmas, akár több napot is igénybe vevő munka, így napjainkban főleg a tervezési folyamat végén végzik el az ilyen kiértékeléseket, annak érdekében, hogy bizonyítani tudják az épület megfelelését a különböző előírásoknak.

Az LCA-BIM integrációjának vizsgálata



2. ábra Kutatási fókuszpontok, célok

Kutatásom megkezdésekkor azt a célt tűztem ki magam elé, hogy egy szisztematikus irodalomkutatással megvizsgáljam, milyen lehetőségek vannak az életciklus elemzések (LCA) építményinformációs modellezés-be (BIM) való integrációjára. Megismerjem az integrációval járó kihívásokat, fenn álló problémákat, amelyek akadályozzák az élet ciklus elemzések széleskörű használatát.

A kutatásomban külön figyelmet szeretnék fordítani azokra a módszerekre és eszközökre, amelyek lehetővé teszik az LCA BIM-en belüli alkalmazását a tervezés korai szakaszában, illetve lehetővé teszik a tervezési folyamat során történő automatikus kiértékelést. Valamint a kutatás második felében szeretnék kitérni rá, hogy milyen eszközök léteznek már, családi házak és kisméretű középületek tervezése során az ilyen folyamatok egyszerű elvégzésére, hiszen az ilyen épületeknek sokkal kisebb a beruházásra szánt keret összeg, így lényeges, hogy az elemzések elvégzése, ne terhelje tovább a beruházást gazdasági szempontból, akár a befektetett munkaórák szemszögéből, akár a befektetett eszköz, vagy software beszerzési ára szempontjából.

Az eredmények alapján remélhetőleg pontosabb kép alakul ki arról, hogyan támogathatja az LCA-BIM integráció a fenntarthatósági célokat, és hogyan lehetne ezt a kapcsolatot tovább fejleszteni a jövőbeli kutatások során.

Reményeim szerint, kutatásom révén elérhetőbbé váljon a BIM-es környezetbe való LCA integrálás, ezzel is hozzájárulva, hogy a tervezők aktívan használják az élet ciklus elemzéseket. Céлом ezen felül, hogy a kutatást az eredmények alapján tovább folytassam, és egy olyan keret rendszert tudjak felállítani, amely egyszerűsítheti a fentebb említett folyamatokat.

1. KUTATÁSI METÓDUS

1.1. Kutatási módszer rövid leírása

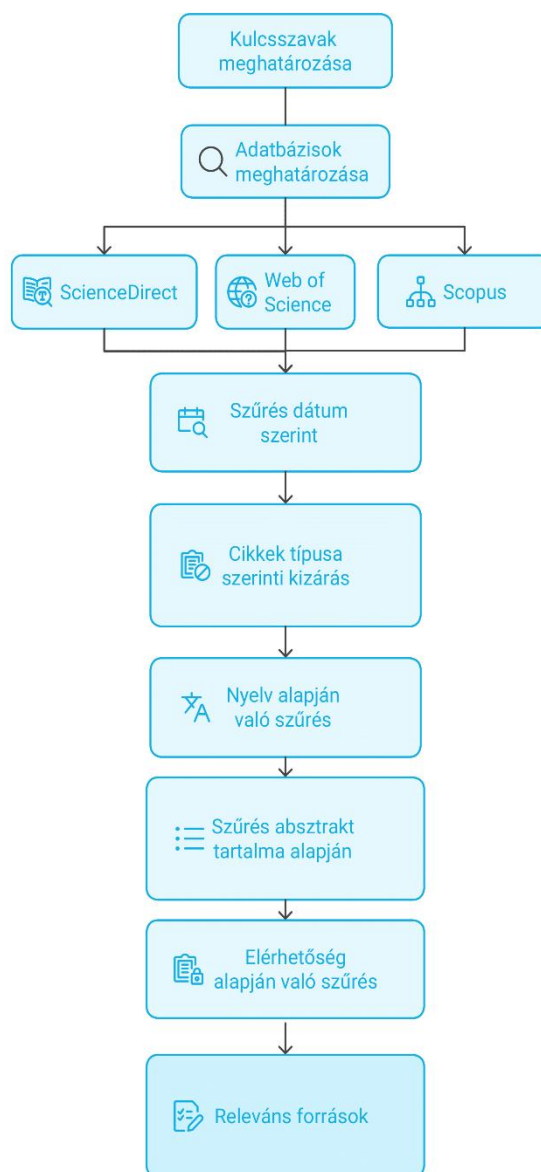
Jelen kutatás egy szisztematikus szakirodalom kutatást (systematic literature review- SLR) kísérel meg végrehajtani.

A keresést meghatározott kulcsszavakkal, kifejezésekkel, azonos keresési módszerekkel kezdem meg.

A forrásokat kezdetben az adatbázisok szerint elkülönítve kezeltem, csak későbbi lépések során összegeztem azokat.

A forrásokat a Zotero forráskezelő alkalmazással, a Microsoft Excel alkalmazásokkal rendszereztem és szűrtem.

A keresés során, a különböző adatforrásokból kinyert találatokat a PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) protokoll alapján kezeltem, amely magában foglalja az eredmények szűrését és az ismétlődések eltávolítását, így biztosítva a keresési folyamat átláthatóságát és következetességét.



3. ábra Kutatási módszer egyszerűsítve

Ennek megfelelően szűrési kritériumokat hoztam létre, amelyek célja az volt, hogy a kutatás szempontjából releváns tanulmányok kerüljenek kiválasztásra.

A kinyert adatok alapján elvégzett szűrések és kizárások után, a megmaradt publikációk absztraktjait elolvastam, és azok alapján döntöttem el, hogy bekerülnek-e a vizsgált cikkek végleges listájába. Az absztraktok vizsgálata során igyekeztem csak azokat a forrásokat kiválasztani, amelyek valóban relevánsak lehetnek a kutatás szempontjából.

1.2. Kutatási Kérdés Pontos Megfogalmazása

A fő kérdésnek a következő került meghatározásra: az LCA és BIM korai tervezési szakaszban történő integrációjának jelenlegi állapota és a lehetséges fejlesztési irányok. A módszertan célja a kutatási kérdés szisztematikus megválaszolása, a releváns források azonosítása.

A keresés megkezdése során keresési kulcsszavak kellett meghatároznom, melyek első sorban, a következők voltak: LCA; Life Cycle Analysis azaz életciklus elemzés; BIM, Building Information Modeling azaz építményinformációs modellezés. A rövidítések teljes kibontására azért volt szükség, mert az általuk jelölt fogalmak pontos definiálása elengedhetetlen volt a keresés során, annak érdekében, hogy a keresés során ne zárjak ki véletlenül lényeges publikációkat.

Ez azonban még egy nagyon tág keresést eredményezett, hiszen az LCA-t és a BIM-et számos felhasználási módon össze lehet kötni. Számomra kiemelten fontos volt, hogy olyan releváns forrásokat találjak, melyek kiemelten a tervezés korai szakaszára vonatkozik, igyekeztem kizárni a működtetés, illetve az elbontás során alkalmazott életciklust tárgyaló forrásokat, hiszen ezek a kutatás vizsgálati témáján kívül estek, azonban jelentős számú kutatás és vizsgálatot végeztek a témákban az elmúlt időszakban.

Ennek megfelelően két további kulcsszóval bővítettem a keresési kritériumot, melyek az „early” azaz korai, és a „design” azaz tervezés kulcsszavak lettek. Ezekkel igyekeztem szűrni a forrásokban az „early stage, early design stage, design stage” kifejezésekre, amelyekből arra lehetett következtetni, hogy az életciklus elemzés az épület tervezési szakaszában lett alkalmazva.

A keresési kifejezéseket logikai operátorokkal (AND, OR) kombináltam, hogy pontosítsam a kereséseket. Ennek megfelelően a következő keresési kifejezést alkalmaztam, amelyeket a publikációk címében, kulcsszavaikban, és absztraktjukban kerestem a kereső motorokkal:

„(LCA OR Life cycle analysis) AND (BIM OR Building information modelling) AND (Early OR design)”

1.3. Adatbázisok, források, keresési stratégia

A kutatás során, igyekeztem olyan adatbázisokat választani, amelyek átfogóan lefedik az építészeti és mérnöki tudományterületek releváns publikációit. A lehető legtöbb a témához kapcsolódó releváns publikáció kiszűrésének érdekében, több adatbázison is végrehajtottam ugyanazt a keresést.

3db adatbázist választottam ki ennek megfelelően, a publikációk kinyerésére:

- Scopus
- Web of Science
- ScienceDirect

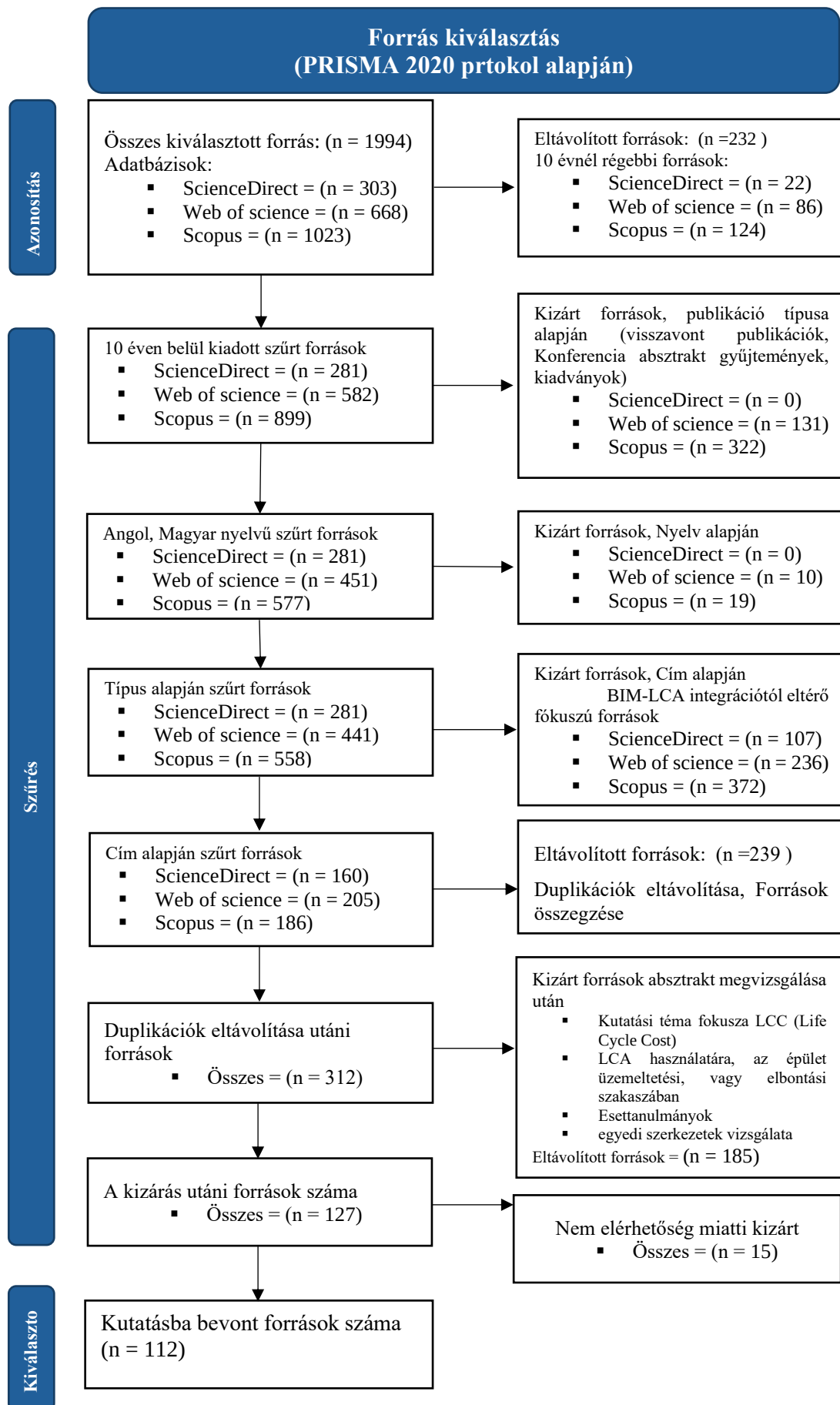
Mind három adatbázisban a források címében, kulcs szavaikban, és absztraktjukban keresttem a saját kulcs szavaim, kifejezéseim. Ezen felül mind a három oldal lehetőséget ad számos egyéb szűrési opciókra is, amelyeket a későbbi lépések során alkalmaztam is.

1.4. PRISMA módszer

A keresés során nyert találatokat a PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) módszer alapján kezeltem, amely magában foglalja az eredmények szűrését és az ismétlődések eltávolítását, így biztosítva a keresési folyamat átláthatóságát és következetességét.

A PRISMA protokoll-ról 2009-ben adtak ki egy nyilatkozatot, ami alapján a későbbi években a szisztematikus irodalomkutatások, felülvizsgálatok többsége készült. Ezt a nyilatkozatot váltotta fel a 2020-as PRISMA nyilatkozat, amely egy újabb felülvizsgált útmutatást ad a vizsgálatok azonosítására, kiválasztására és értékelésére. Ezek a vizsgálatok kritikus szerepet töltenek be a tudományos életben, hiszen az ilyen kutatások egyértelmű álláspontot tudnak adni az adott terület tudásállapotáról, a kihívásokról, a lehetséges célokról, amelyek alapkövei lehetnek a jövőbeli kutatásoknak.

A PRISMA módszertan továbbá magába foglalja a „PRISMA 2020 Flow diagramot” amely az elfogadott folyamat ábrája az ilyen módszerrel vizsgált kutatások munkafolyamatainak bemutatására. [6]



4. ábra Folyamat ábra a PRISMA 2020 flow diagram alapján

egyszerűsítését. Ebből kifolyólag, mivel a kutatás célja, a napjainkban használt LCA-BIM integráció megvizsgálás volt, a 10 évnél régebbi kutatások, módszertanok már nem relevánsak.)

- Publikáció típusa alapján való kizárás (A visszavont publikációk, Konferencia absztrakt gyűjtemények, és a konferencia kiadványok kizárásra kerültek)
- Nyelv alapú kizárás (Csak a Magyar és az Angol nyelvű publikációkat tudtam jelen kutatás során megvizsgálni)
- Cím alapú szűrés (A korábbi szűrések eredményeinek a címük alapján való szűrés. Azok a cikkek kerültek kiszűrésre amelyek címe alapján a kutatási téma fókuszja egyértelműen eltér a BIM és az LCA integrációjának kérdés körétől, valamint amelyek a témával foglalkoznak, de már a címben is egyértelműsítésre került, hogy a kutatást az épület üzemeltetési szakaszában, vagy az elbontási szakaszban végezték el.)
- Ezután a 3 kereső motorból kinyert források összegzésére került sor, amely során eltávolításra kerültek a duplikációk.
- A duplikációk eltávolítása után, az így megmaradt cikkeknek kinyertem a metaadataikat is, amely során a következő adatokat gyűjtöttem:
 - A kutatás cím
 - szerzők
 - publikálás éve
 - DOI szám, ISBN szám (amennyiben volt a forrásnak)
 - A publikációk PDF formátuma
 - Absztrakt
 - A kutatás fő témája
 - Alkalmazott módszerek
 - Eredmények és fő következtetések
- Az így kapott forrás listában még egyszer átolvastam a cikkek címét, ezúttal azonban az absztraktok is feldolgozásra kerültek
 - Kizárásra kerültek azok a cikkek, amelyek bár érintőlegesen foglalkoznak a BIM és LCA kérdéskörével, azonban csak említést tesznek róla, és az absztrakt alapján a kutatás fókuszja egyértelműen más területhez kapcsolódik

- Kizárásra kerültek az LCC/ Life Cycle Cost azaz az életciklus költség elemzésekkel foglalkozó kutatások, mivel jelen kutatásnak nem célja az ilyen típusú elemzéseket elemezni
- Kizárásra kerültek az egyéb fenntartható módszereket elemző kutatások, amelyek bár megemlítték az LCA-t annak módszertanát nem kutatták mélyebbre hatóan
- Végezetül az így kapott forrásokat ellenőriznem kellett, hogy elérhetőek-e számomra, így csak azokat a publikációkat tudtam a kutatásba bevonni, amelyek vagy „open acces” vagyis szabadon elérhetőek, vagy amelyekhez a Pécsi Tudományegyetem polgáraként, jogosultságom volt hozzá jutni.

Ezzel a módszerrel a több lépcsős szűrés, és kizáráson keresztül a kezdeti 1994 db forrásból, 123 db került kiválasztásra, amelyeket az alább leírt módszerek alapján dolgoztam fel.

1.6. Kutatások elemzése

A kutatások elemzéséhez tematikus elemzést alkalmaztam, amely lehetővé tette a különböző tanulmányok eredményeinek részletes összehasonlítását, valamint az LCA-BIM integráció különböző aspektusainak átfogó értékelését. Ez a módszer segített rendszerezni a kutatásokat és azonosítani a terület főbb témaköreit, amelyeket az alábbi öt tematikus fókuszcsoporthoz foglaltam össze:

- Átfogó cikkek, irodalmi kutatások a témában

Számos átfogó, „review” cikk foglalkozott a témával, így ezeket is igyekeztem megvizsgálni. Az ilyen típusú tanulmányok fontos alapot szolgáltatnak a terület átfogó megértéséhez, jelen kutatáshoz pedig előképet biztosítanak, mint összehasonlítási alap, hogy hol tartott a tudomány ezen ága az elmúlt években, mely kérdésekre adott már választ a fejlődést, és milyen problémák állnak továbbra is fent.

- LCA és BIM Integrációjának vizsgálata:

A kutatások e része az LCA és BIM közötti adatkapcsolatokra, interoperabilitási kihívásokra, valamint a különböző szoftverek integrációjának technikai aspektusaira fókuszál. E tanulmányok kiemelik a szabványosított adatcsere-formátumok (pl. IFC)

szerepét és a BIM modell-el exportálásával járó adatvesztés hatását az LCA pontosságára.

- LCA vizsgálata a tervezés korai szakaszában:

Az ebbe a csoportba tartozó tanulmányok az LCA alkalmazásának lehetőségeit vizsgálják a tervezés kezdeti fázisaiban, amikor a döntések jelentős hatást gyakorolhatnak az épület teljes életciklusára. Kiemelt figyelmet kapott az egyszerűsített LCA-modellek alkalmazása és azok kompatibilitása a BIM-mel.

- Kisméretű középületeken és családi házakon elvégzett LCA:

Ebben a témakörben a kutatások a kisebb léptékű épületek – például családi házak, óvodák, könyvtárak, vagy egyéb kisméretű középületek – életciklus-elemzését vizsgálják. Az ilyen típusú épületeknek, sajátos kihívásokkal kell megbirkózniuk az LCA számítások során.

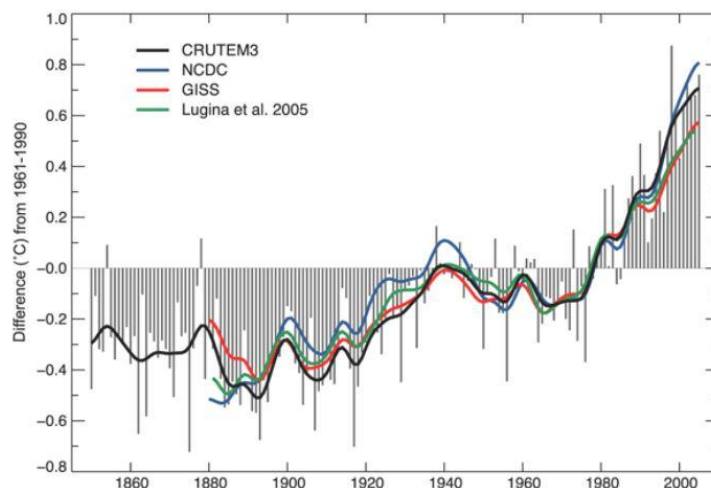
2. A FENNTARTHATÓ ÉPÍTÉSZET

2.1. 1,5°C jelentősége

A fenntartható fejlődés olyan fejlődés, amely kielégíti a jelen szükségleteit anélkül, hogy veszélyeztetné a jövő generációk képességét saját szükségleteik kielégítésére. Két kulcsfontosságú fogalmat foglal magában:

- 1. a "szükségletek" fogalma, különösen a világ szegényeinek alapvető szükségleteit, amelyeknek elsődleges prioritást kell biztosítani; és*
- 2. a technológia és a társadalmi szerveződés állapota által, azokra a korlátokra vonatkozó elképzelést, amelyek a környezet képességét korlátozzák a jelenlegi és jövőbeli szükségletek kielégítésében. [7]*

A klíma modellek szerint, az emberi tevékenységek egyértelműen hozzá járulnak a globális felmelegedés felgyorsulásához, és előrehaladottságához. Az Éghajlat-változási Kormányközi Testület (IPCC) 2007-es értékelései [8] már, akkoriban is kimutatták, hogy amennyiben az emberiség által kibocsátott természetes üvegházhatást fokozó üvegházhatású gázok mennyisége nem csökken, a 21. század végére a globális melegedés mértéke elérheti a 2,5-5,5°C fokot is.

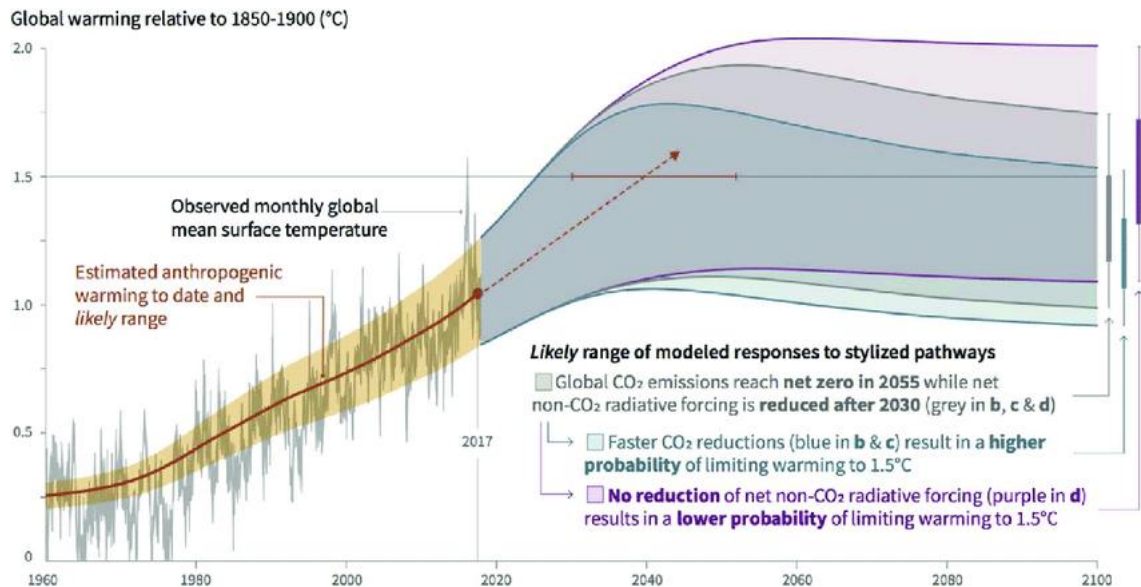


8. ábra Az északi félteke átlagos évi középhőmérsékletének alakulása az elmúlt ezer évben (IPCC 2007a) [9]

Az ilyen mértékű változásnak a hatása drasztikus lehet, nem csak a tengervízszint emelkedésre, de az egyes földrészek természetes éghajlatára, a természetes biológiai rendszerekre, veszélyeztetheti számos ökoszisztéma fennmaradását, és humán rendszerekre is jelentős hatást gyakorolhat. Egyes becslések szerint már 2-3°C fokos

felmelegedés hatására is, eltolódnak a biogeográfiai övezetek, ami az eddig ismert fajok 20-30%-ának a kihalását is jelentheti. [9]

Ebből kifolyólag határozták meg a klíma kutatók célként az 1,5°C fokot, ami alatt kell az emberiségnek tartania a globális felmelegedést, annak érdekében, hogy megelőzhetőek legyenek a kritikus éghajlati körülmények, változások, katasztrófák. [10]



9. ábra A globális felmelegedés mértéke 1960-2017-ig és várható további felmelegedés[9]

Ennek érdekében jött léte a Párizsi Megállapodás is, amely 2016. november 4.-én lépett hatályba. Célja, hogy 2050-re megvalósuljon a klíma semleges, azaz net zero uniós gazdaság. Ennek érdekében szabályozásokon és beruházásokon keresztül is támogatja az Európai Unió tagállamait, annak érdekében, hogy a különböző üvegházhatású gázok, kiemelten a CO₂ kibocsátási értékek minimalizálásra kerüljenek.

Ezen elv alapján, a fenntartható építészetnek át kell alakulnia. A környezeti, gazdasági és társadalmi elveknek egyen rendűvé kell válniuk az építészeti tervezés folyamatában. Olyan megoldásokat kell, alkalmazni, amelyek mellett, hogy gazdaságosak és biztosítják az emberi egészséges életkörülmények feltételeit, minimalizálják az építés, és az épületek használata által kialakuló környezetre gyakorolt káros hatásokat, mindeközben pedig energia hatékony megoldásokat kínál, hosszú távra is.

Előtérbe kell, kerüljön a megújuló anyagok felhasználása, az energiahatékonyságra való törekvés, a szén-dioxid-kibocsátás csökkentése és az ökológiai lábnyom minimalizálása. Ezeknek az elveknek azonban számos alszintje van. Az energia felhasználás csökkentésének jegyében, érdemes olyan anyagok, technológiák használata, amelyek

környezetbarátka, újrahasznosíthatóak, és lehetőleg helyi forrásokból származnak. Azonban ezeknek az agyagoknak is ugyan úgy van, kitermelés, előállítás és szállítás közbeni káros anyag kibocsátása, a kitermelés, előállítás és a beépítés közben is jelentős hulladék termelődik, valamint az üzemeltetési, használati szakasz után, az elbontás során jelentős mértékű hulladék, és egyéb, környezetre káros anyag felszabadulása is valószínű.

Épp ezért, optimális esetben, az építőiparban szükséges az arra való törekvés, hogy az épület egész életciklusát vizsgálva hozzunk, építészeti tervezői döntéseket, itt gondolva az szerkezet és anyagválasztástól kezdve egészen, a kivitelezési szakaszban, az építési hulladékok elszállítása, azok feldolgozásáig.

2.2. Körforgásos gazdaság

A körforgásos gazdaságnak, a fenntartható fejlődéssel ellentétben még nincs kiforrót definíciója, hiszen ez nem egy olyan gazdasági forma, amely egy gyakorlati megoldást javasol. A körforgásos gazdaság keretén belül számos egyéb ökológiai és gazdasági koncepció összpontosul. A körforgásos gazdaság célja, hogy megreformálja a mai vásárlási szokásokat, azt egy fenntarthatóbb, erőforrás hatékony irányba terelje, amely redukálhatja az évente keletkező több milliárd tonna hulladékot. [11,12]



10. ábra A körforgásos gazdaság modellje, forrás: [12]

Az építőiparban ez egy nehezen integrálható fogalom, ugyan akkor egy hatalmas piaci rés is lehet. E szerint a gazdasági koncepció szerint, minden esetben a már meglévő épületek felújítása kell elsőbbséget élveznie, új építésű házak esetében, pedig törekedni kell arra, hogy a különböző rétegek, szerkezetek anélkül legyenek javíthatóak cserélhetőek, hogy a környező rétegek sérüljenek. Emellett egy előremutató irányzat lehet még az, hogy a gyártók szolgáltatásként értékesítik termékeiket, azonban a tulajdonjogot megtartják, visszavásárlási kötelezettséggel, ezáltal elősegítve a hatékony anyag körforgást.[13]

3. ÉPÍTMÉNYINFORMÁCIÓS MODELLEZÉS (BIM)

3.1. A BIM Definíciója és Célja

„A BIM olyan CAD-alapú tervezésmódszertani folyamatok és irányelvek alkalmazásának összessége, amely lehetővé teszi az építmények létrehozásában és üzemeltetésében érdekelt szereplők (építetők, tervezők, kivitelezők, üzemeltetők) számára a valóságnak megfelelő virtuális térben történő együttműködést és információátadást, illetve a releváns adatok gyors és hatékony megjelenítését.” [14]

Az első sorban a tervezési folyamatok egyszerűbb, gyorsabb és pontosabb dokumentálása volt a célja a számítógépes modellezésnek, azonban ez a koncepció, elégtelennek minősült, a szakágak közti kommunikációhoz, így lépcsőfokon keresztül, több ipari szereplő, egyetemek és software fejlesztő cég közreműködésével fejlesztették ki NBSIR 80-1978 szabványt. Ebben szerepelt az ANSI IGES (Initial Graphics Exchange Specification) 1-es verziója, amely az első igazi digitális adatcserét szabályozó semleges adattömb formátum volt, a CAD rendszerek közt.[15]

A BIM azaz az építményinformációs modellezés, mint fogalom csak ezután 1992-ben jelent meg, amikor már elsődleges célja az volt a BIM-es technológiáknak, hogy olyan adatokkal feltöltött modelleket hozzanak létre az iparban, amelyek teljes mértékben támogatják a kommunikációt a különböző szakágak között, elérhetővé téve az összes információt, az építési folyamat résztvevői számára. Az ilyen modellek, hosszútávon nemcsak a tervezési és kivitelezési folyamatokat képes támogatni, hanem az épület üzemeltetésében és karbantartásában is kiemelkedő szerepet játszhat.

Magyarországon 2020 decemberében fogadták el az ISO 19650-es szabványsorozat 1. és 2. részének magyar nyelvű változatát. E szabvány elfogadásával, egy időben módosításra került a BIM-el foglalkozó bizottság neve, és maga a BIM mozaik szó jelentése is, amely építményinformációs modellezésre változott. Ez a változás még napjainkban is sokszor, zavart okoz, sokszor használják még ma is az építményinformációs modellezést, mint a BIM mozaik szó jelentése, azonban ez a szabvány szerint helytelen.

A két elfogadott szabvány neve:

- MSZ EN ISO 19650-1:2019 Információk rendszerezése és digitalizációja az épületek és a mérnöki létesítmények esetében, beleértve az építményinformációs

modellezést (BIM). Információmenedzsment építményinformációs modellezés felhasználásával. 1. rész: Fogalmak és alapelvek (ISO 19650-1:2018); [16]

- MSZ EN ISO 19650-2:2019 Információk rendszerezése és digitalizációja az épületek és a mérnöki létesítmények esetében, beleértve az építményinformációs modellezést (BIM). Információmenedzsment építményinformációs modellezés felhasználásával. 2. rész: Létesítmények megvalósítási fázisa (ISO 19650-2:2018).[17]

3.2. A BIM szerepe az építészeti tervezésben

Napjainkban szinte minden építészeti tervezéssel foglalkozó kis- és nagyvállalkozás valamilyen tervezőszoftvert alkalmaz az építési projektek előkészítése és megvalósítása során. A legelterjedtebbek közé tartoznak az Autodesk által fejlesztett szoftvercsaládok (pl. AutoCad, Revit) és a Nemetschek Group-hoz tartozó software fejlesztő cégek termékei (pl. Graphisoft – ArchiCad; Allplan; Vectorworks). Ezen softwarek széleskörű használhatóságuknak és egyszerű felhasználói felületüknek köszönhetően, könnyen tanulhatóak. Valamint a csapatmunka opciónak köszönhetően lehetővé vált a tervező irodákon belüli hatékony együttműködés is a tervezési munkálatok során.

Az ezekben a szoftverekben létrehozott modellek rendkívül sokoldalúan felhasználhatóak. Többek között megemlíthetők az ütköztetésvizsgálatok, amely segítségével számos kivitelezési hiba megelőzhető, és a közös adatkörnyezet is, amelyben lehetséges az egységes adattárolás a szakágak között.

A modellek intelligens adatmodell jellegéből adódóan, lehetőség van arra, hogy akár modell elemenként, nagy mennyiségű, részletes információ kerüljön tárolásra (például az anyagtulajdonságokat, költségadatokat, energetikai mutatókat és karbantartási információkat is).

Ez a fajta adatmodell, az épület teljes életciklusa alatt értékkel bírhat, és különféle üzemeltetési, fenntartási elemzésekhez, felújításokhoz és még számos munkafolyamathoz adhat alapkövet.

4. AZ ÉLETCIKLUS-ÉRTÉKELÉS (LCA) ÁTTEKINTÉSE

4.1. Az LCA Definíciója és Célja

Az életciklus elemzés definíciója az ISO 14040 szabvány szerint:

„Az életciklus-elemzés egy olyan technika, amely a termékhez kapcsolódó környezeti tényezők és lehetséges hatások értékelésére szolgál, a következők figyelembe vételével:

- leltár összeállítása egy termékrendszer releváns inputjairól és outputjairól
- az említett inputokhoz és outputokhoz kapcsolódó lehetséges környezeti hatások értékelése
- a leltárelemzés és a hatásvizsgálati szakasz eredményeinek értelmezése a tanulmány célkitűzéseivel összefüggésben.” [18]

Az LCA az angol Life Cycle assesment/analysis rövidítése, ami az életciklus elemzést jelenti. Fő célja, hogy olyan szám alapú értékelési rendszerként szolgáljon, amely valós értékekkel képes támogatni kettő vagy annál több termék környezeti hatás alapú összehasonlítását.

1969-ben készült el az első olyan termék elemzés, amely már életciklus elemzésszerű, de még volt tényleges. Az ezt követő években, számos publikáció és kutatás jelent meg, hasonló környezeti hatásokkal életciklusonként foglalkozó elemzésekről. A módszertan egységesítésére az 1990-es évek elejétől törekedtek, míg végül 1997-ben megjelent az ISO 14040-es szabvány, amely stabil keretek közé fogta az életciklus elemzéseket, majd ezeket dolgozták át a 2006-os felülvizsgálatok alkalmával.

Az LCA nem kifejezetten építészeti technika, bármilyen árura, szolgáltatásra, termékre alkalmazható. Ebből kifolyólag azonban egy rendkívül komplex tudományágról van szó. Az eredeti koncepció, megegyezik minden elemzés esetében, azonban annak pontja változhatnak az elemezni kívánt termék komplexitásától függően. Első sorban termékfejlesztésre használják. Maga a termék gyártási folyamatát lehet optimalizálni, egy ilyen módszer segítségével

Az életciklus elemzések szempontjából három fő védendő érték van:

- Erőforrások használata, azok lehetőség szerinti minimalizálása
- Az emberi egészség, és annak védelme
- Az ökoszisztéma védelme

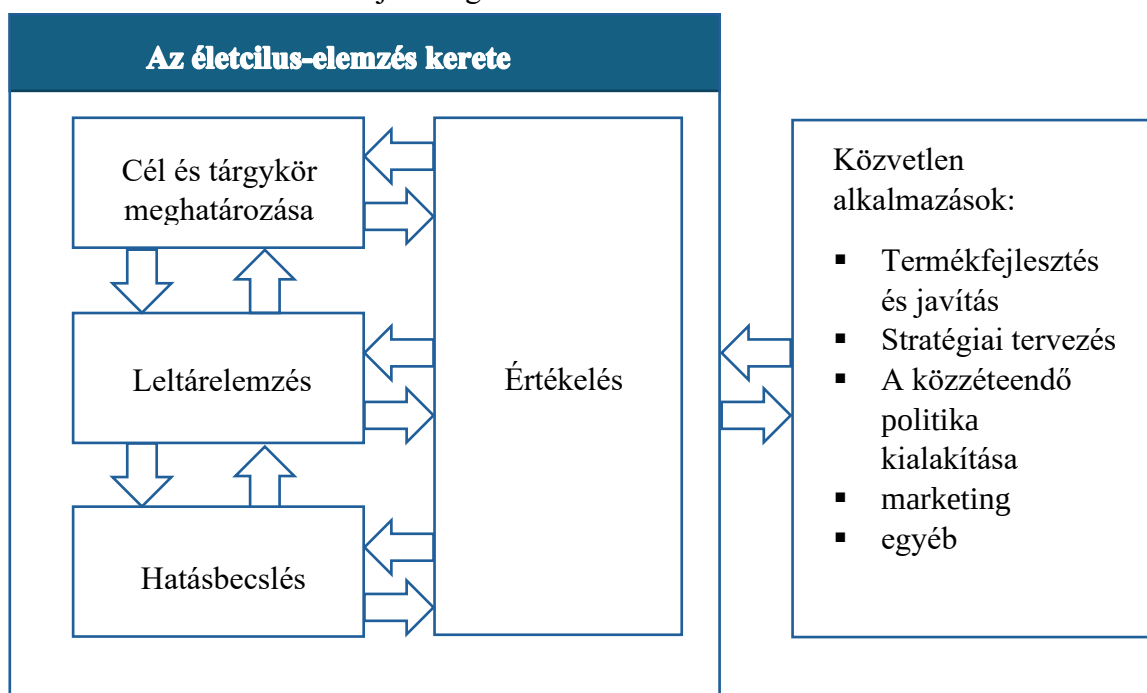
Az LCA-hoz nagyon hasonló elemzési folyamattal rendelkezik az LCC vagyis a „Life Cycle Cost”, életciklus-költségkalkuláció. Ez a technika arra szolgál, hogy a megvizsgálja egy termék várható közvetett és közvetlen költségét, és vizsgálja milyen költségmegtakarítási módszerek, alkalmazhatóak. A két módszertan hasonlósága miatt, az elemzéseket gyakran végzik el egyszerre, emiatt sok kutatásban együtt említik a két analízist, azonban jelen kutatásnak nem célja az LCC értékelések kutatása, így nem tér ki arra.

4.2. Az LCA elvégzésének általános keret rendszere

Az LCA vizsgálatok között három fő csoport van, az alapján hogy az élet ciklus mely szakaszára vonatkozik az elemzés:

- Bölcsőtől a sírig (Cradle to grave) -> minden életciklust vizsgál
- Bölcsőtől a gyárkapuig (Cradle to gate) -> kitermeléstől, a gyártási folyamat végéig vizsgál
- Kaputól kapuig (Gate to gate) -> csak a termelési folyamatot vizsgálja

Az életciklus elemzés elvégzésének módszertana nem tér el a csoportok között, csak a különböző életszakasz sajátosságaiban.



11. ábra Az életciklus elemzés keret rendszere

Az életciklus elemzéseknek négy fő szakasza van:

1. Cél és tárgykör meghatározás
2. Leltárelemzés (Life Cycle Inventory – LCI)
3. Hatásbecslés
4. Értékelés

Cél és tárgykör meghatározás:

Minden életciklus elemzés első lépése a cél egyértelmű meghatározása. Miért készül az életciklus értékelés? Kinek készül az életciklus értékelés? Mi az a termék, ami elemzés alá kerül? Ezek a kérdések egy produktumnál, igen komplikáltak is lehetnek, hiszen ebben a stádiumban meg kell határozni a termék rendszerek határait, a funkcionális egységet, az adatparamétereket és az adatminőségi célokat, valamint a hatásvizsgálati módszereket is.

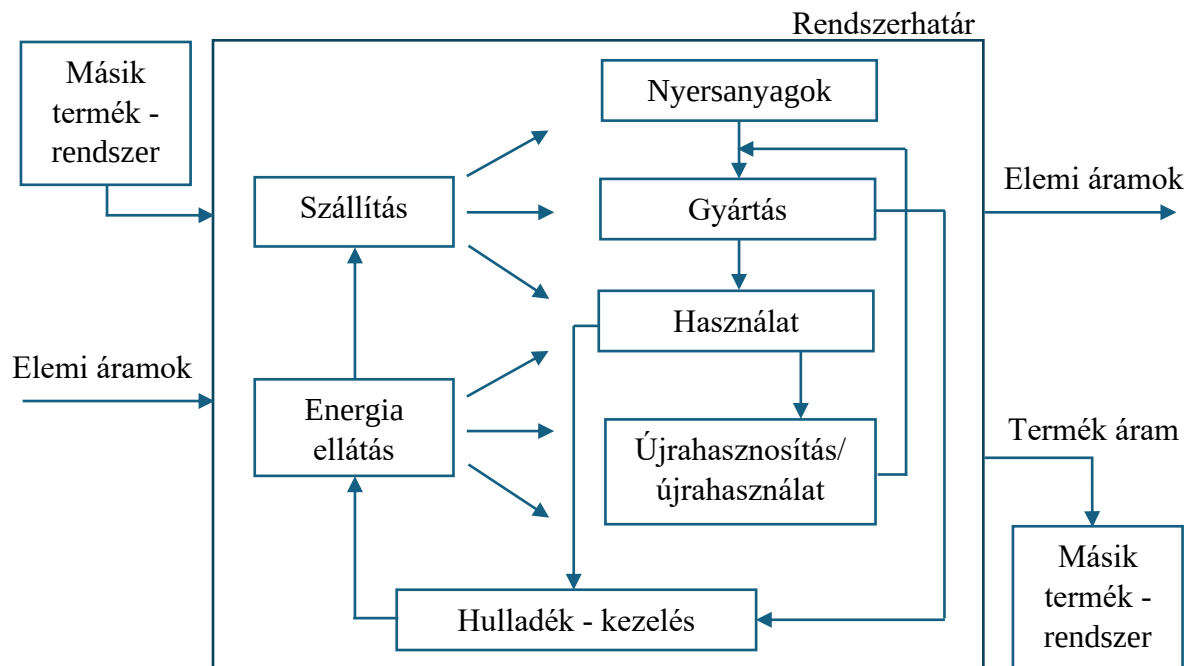
A célmeghatározás alapján, az LCA két féle típusú lehet: Hotspot, vagy összehasonlító elemzés. A hotspot elemzést általában termék fejlesztés céljából végzik, amely során az kerül megvizsgálásra, hogy a gyártási vagy a teljes életciklusnak melyek, azok a szakaszaik, amelyek a legnagyobb környezeti terhelést okozzák. Ezzel szemben az összehasonlító elemzés során kettő vagy több termék rendszert hasonlítunk össze, annak érdekében, hogy megvizsgáljuk, a meghatározott cél szempontjából, melyik termék teljesít jobban.

Az első lépés során kell továbbá meghatározni a már említett „funkcionális egységet”. Definíciója:”A termék rendszer számszerűsített teljesítménye, ez a vizsgálatnak a vonatkoztatási alapja. Ennek egy olyan egységnek kell lennie, amely le tud írni több anyagot is, például egy fal szerkezet vizsgálatának az esetében m² vagy akár m³ is lehet az egység. A célja a funkcionális egységnek, hogy hasonló funkciókat hasonlítsunk össze.

Leltárelemzés:

A második lépés a leltár elemzés. A folyamat során felosztásra kerülnek az életszakaszok (gyártás, használat, hulladék). Ezeken belül kerülnek meghatározásra a termék rendszerek, amelyek egységfolyamatainak az inputja (anyag, energia), és az outputja (környezeti hatások) kimutatásra kerül. Ezeket normalizálni kell az egységfolyamatok egységtömegére. Ezt követően, a termékrendszeren belül össze kell adni egyes egységfolyamatokból származó outputokat és inputokat, ezek az értékek teszik majd ki a

vizsgálat tárgyának végleges életciklus-leltárát, azaz az LCI-t (Life Cycle Inventory) amely segítségével kvantitatív környezeti terhelési információkat lehet generálni egy termékről annak teljes életciklusa során.



12. ábra Termékrendszer egységfolyamatai forrás: Dr. Szalay Zsuzsanna

Hatásbecslés:

A hatásbecslés során kerül megvizsgálásra, hogy ezek az inputpotok potenciálisan milyen környezeti hatásokat okoznak. A hatásokat számszerűsíteni kell, hatáskategóriákon keresztül. A számítások után azért, hogy egyensúlyba kerüljenek az olyan anyagok is amelyek jellegükből adódóan kiugró értékeket produkálnak, a kapott értékeket normalizálni és súlyozni szükséges.

Értékelés:

Az utolsó fázis az értékelés, ahol a kapott környezeti hatást mutató számok kiértékelésre kerülnek, a teljesség (minden releváns információ, megvizsgálásra, bemutatásra került-e), az érzékenység (a végső eredmények mennyire megbízhatóak) és a következetesség (a különböző munkafázisok, módszerek és az adatok egymással, és a kitűzött céllal összhangban voltak-e az értékelés során) figyelembe vételével. Ezek alapján a számok alapján következtetések vonhatóak le környezetvédelmi szempontból. Az így kapott eredményeket egy jelentés formájában kerül összesítésre, amely javaslatokat, ajánlásokat is tesznek a termék lehetséges fejlesztési irányaira. [19]

Épület értékelés														
Az épület életciklusa											Az épület életciklusán túl			
A 1-3			A 4-5		B 1-7					C 1-4				D
Termék szakasz			Építési folyamat		Használat					Életút vége				Előnyök és terhelések, a rendszerhatáron kívül
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	
Nyersanyag kitermelése	Szállítás	Gyártás	Szállítás	Építési folyamat, kivitelezés	Használat	Karbantartás	Javítás	Csere	Felújítás	Bontás	Szállítás	Hulladékfeldolgozás	Deportálás	Újrahasználati-, újrahasznosítási-, energetikai hasznosítási potenciál
					B6	Üzemeltetési energia felhasználás								
					B7	Használati víz felhasználás								

4.4. Adatbázisok, Környezeti termék nyilatkozatok

A környezeti termék nyilatkozat (Environmental Product Declaration, EPD), egy adott termék, vagy termék család, környezeti hatásainak mutatóit bemutató nyilatkozat. Az ezekhez szükséges elemzéseket, amik maguk is LCA folyamatok, egy objektív fél kell, elvégezze, és minden esetben felül kell vizsgálni, csak azután lehet nyilvánosságra hozni.

A gyártóknak megéri az ilyen elemzések elkészítése, és nyilvánosságra hozása, hiszen amellet, hogy saját termékfejlesztését is elősegíti vele, marketing eszközként is fel lehet használni ezt a nyilatkozatot. Azonban hazánkban ezen nyilatkozatok még nem elterjedtek, csak pár gyártó hozta nyilvánosságra, ezzel szemben külföldön nagyon is elterjedt, több országban már kötelező is az elkészítésük.

Az EPD nyilatkozatok továbbá azért is nagyon fontosak, mert az ilyen nyilatkozatok alapján, létre lehet hozni adatbázisokat, az LCA-k elkészítéséhez. Az életciklus elemzések során kulcsfontosságú, a hiteles és minőségi adatbázis kiválasztása, vagy létrehozása. Azokban az országokban, ahol a környezeti termék nyilatkozatok, illetve az életciklus elemzés már jobban beépült az építőipari szabályozásokba, és tevékenységbe számos ingyenesen, online elérhető adatbázis van, amely az adott országra jellemző építőanyagok környezeti hatásait jól betudja mutatni. Ilyen adatbázisok:

- ecoinvent adatbázis (Svájci adatbázis, fizetős)
- Ibu-epd
- bauboo
- ökobaudat (Német adatbázis, ingyenes - DGNB elemzésekhez kötelezően használni kell)

Az ilyen magas minőségű, és széles körű külföldi adatbázisok hatalmas segítséget jelenthetnek hazánkban is, azonban a külföldi adatok nem használhatóak fel teljes valójukban. Ez abból következik, hogy a termékek életciklus elemzése során, jelentős mennyiségű káros hatás származhat a kitermelés gyártás során felhasznált elemi energiákból. Más a mutató értéke egy olyan ország elemi energiájának, ahol főként megújuló energiaforrásokat alkalmaznak, és egy olyan országé ahol fosszilis tüzelőanyagok – szén, olaj vagy földgáz – elégetésével termelik az áramot. Az ilyen energiaforrások magas szén-dioxid-kibocsátással járnak, ami jelentősen befolyásolja az adott termék életciklusának környezeti hatását. Emiatt a külföldi adatbázisok használata

során figyelembe kell venni az adott ország energia-mixét és az ottani körülményeket, hogy a helyi viszonyoknak megfelelő, reális képet kapjunk az elemzés eredményeiről.

4.5. Az LCA integrálásának célja a BIM-be, és annak szükségessége

Az Életciklus-elemzés (LCA) és az építményinformációs modellezés (BIM) integrációjának elsődleges célja, hogy a tervezési folyamat korai szakaszaiban átláthatóvá és mérhetővé tegye az épületek környezeti hatásait. Ez az integráció lehetőséget nyújt arra, hogy a tervezők még a végleges döntések meghozatala előtt optimalizálják az anyaghasználatot, az energiahatékonyságot, valamint az épület teljes életciklusára gyakorolt környezeti hatásokat.

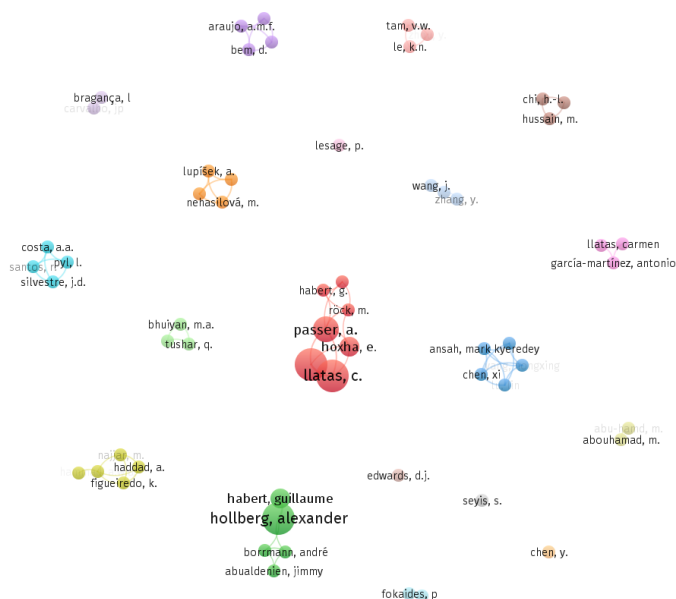
A BIM-en belüli LCA eszközök lehetővé teszik, hogy az egyes építőanyagok és építési megoldások környezeti mutatói, mint például a szén-dioxid-kibocsátás, energiafelhasználás vagy újrahasznosíthatóság, közvetlenül láthatóvá váljanak a digitális modellben. Ez a megközelítés nemcsak az ökológiai lábnyom csökkentésében játszik kulcsszerepet, hanem hozzájárul a tervezési folyamat hatékonyságának növeléséhez és a fenntarthatósági célkitűzések teljesítéséhez is.

Az LCA és a BIM integrációjának jelentősége az elmúlt években folyamatosan növekszik, különösen a nemzetközi zöld megállapodások, például az Európai Unió Zöld Megállapodása (European Green Deal) következtében. Ezek a szabályozások egyre szigorúbb követelményeket támasztanak az új építésű épületek környezeti hatásainak minimalizálására vonatkozóan.

Magyarországon is várható az LCA szabályozási kereteinek bevezetése. A jelenlegi tervek szerint 2026-2027-re készülhet el az a rendeletcsomag, amely jogszabályi szinten is kötelezővé teszi az 1000 m²-nél nagyobb alapterületű épületek életciklus-elemzésének elvégzését. Ez jelentős lépést jelent a fenntartható építési gyakorlatok irányába, miközben ösztönzi az innovatív digitális technológiák, például a BIM és LCA integrációjának szélesebb körű alkalmazását.

A kiválasztott publikációkat összesítve több módon is elemeztem.

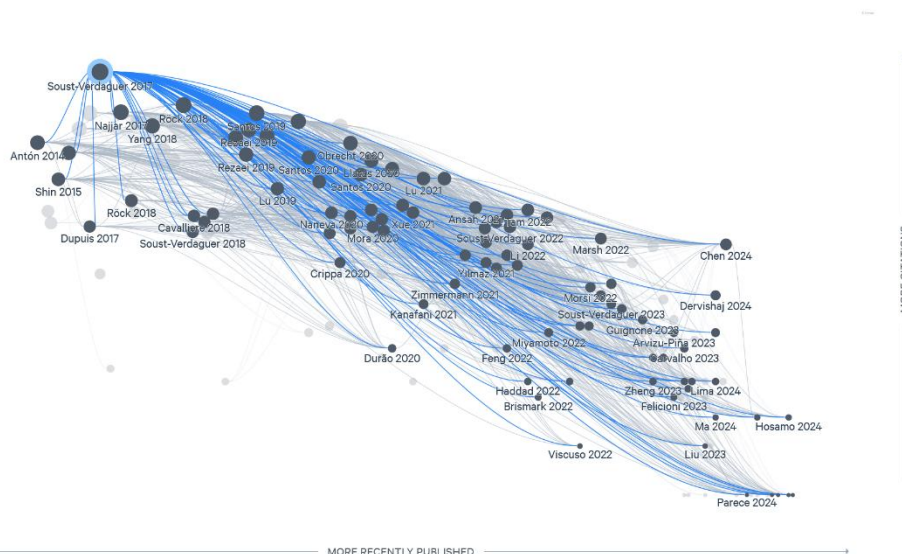
- Kiadás éve alapján, elmondható, hogy míg 2019-ig alig pár hasonló cikk jelent meg évente, addig a 2020-as évtől megugrott a megjelent publikációk száma, ami azt mutatja, hogy a téma fontosságából adódóan, egyre több kutató foglalkozik vele. (15. ábra)
- Szerzők alapján, kik azok a



16. ábra A kiválasztott források szerzőinek kapcsolata, források alapján

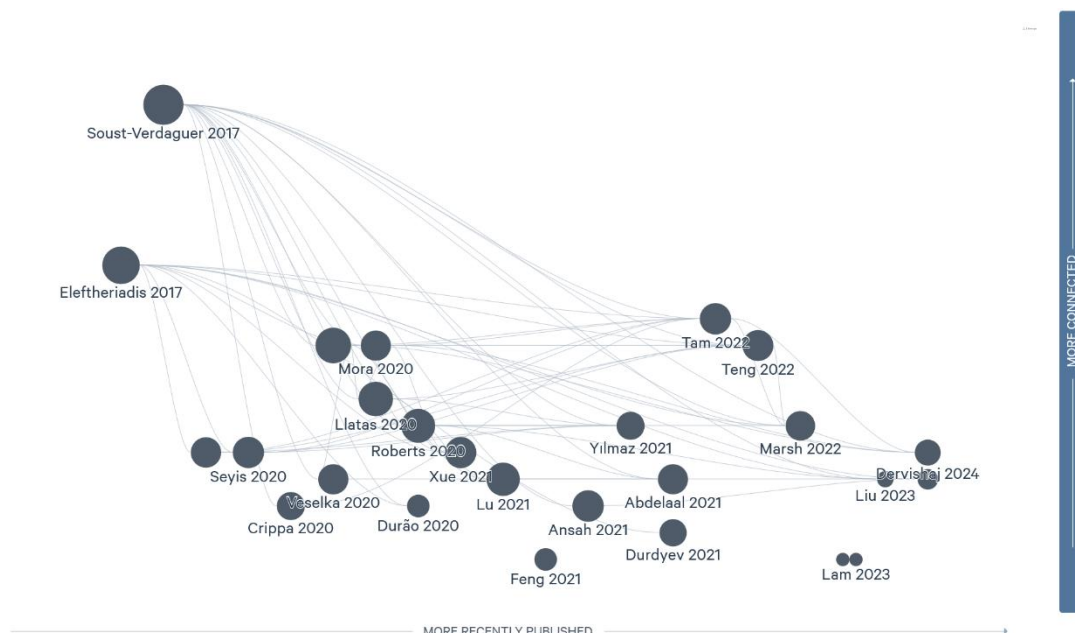
kutatók, akik jellemzően együtt dolgoznak, hiszen ők nagy valószínűséggel egy kutató csoportot, szervezetet képviselnek. Azt tapasztaltam, hogy közel 20 ilyen csoport dolgozik a témában világszerte, melyből két csoportnak van több kiadványa is. (16. ábra)

- Megvizsgáltam továbbá, a publikációkat, egymáshoz való kapcsolatuk révén is. Azt tapasztaltam, hogy az általam kiemelt kutatások, jelentős része, egymáshoz kapcsolódik, és vannak olyan „hotspot” publikációk, amelyek jelentős mennyiségű későbbi kiadványnak volt referenciája. (17. ábra)



17. ábra A kiválasztott források, kapcsolati hálója

5.2. Átfogó cikkek, irodalmi kutatások a témában



18. ábra Az átfogó cikkek kapcsolati hálója

Jelen irodalmi kutatás során, jelentősnek tartottam, hogy az átfogó jellegű kutatások is bevonásra kerüljenek. Ezeken a cikkeken keresztül, rálátás nyílik az ipar LCA irányú fejlődésére az elmúlt 10 évben. Megfigyelhetőek a tendenciák, illetve az, hogy melyek azok a pontok a módszertanban, amelyek régebb óta fent állnak és még nincs rájuk megfelelő válasz.

A kiválasztott 123 db irodalmi forrásból 26 db forrás az átfogó kutatás, jelen kutatáshoz hasonló szisztematikus irodalmi kutatás vagy általános összefoglaló publikáció a témakörrel. A kutatásokat megvizsgálva, felfedezhető hogy többségében egymásra is hivatkoznak. Ez is annak a mutatója, hogy egy olyan problémáról van szó, amelynek megoldása csak hosszas kutatási folyamatok során oldódhat meg.

A kutatások összefoglalják a BIM és az LCA integrációjának történetét, vizsgálják a BIM és az LCA integrációjának fejlődési irányait, jelenlegi helyzetét és jövőbeli lehetőségeit, a lehetséges innovációkat és kihívásokat.

A kutatások során a következő téma csoportok jelentek meg a legtöbb [pl. 20; 21] kutatásban:

- BIM és LCA integrációjának előnyei és kihívásai
- BIM és LCA integrációját érintő interdiszciplináris együttműködés fontosságára

- LCA fontossága az energiahatékonyság és a hulladékkezelés terén kiemelkedően
- Kulcsszereplők meghatározása az LCA keretrendszerben
- Körforgásos gazdaság [22]

Az átfogó cikkek hangsúlyozzák a BIM kiemelkedő szerepét a fenntartható építészetben. Kiemelik, hogy az LCA-val párosítva drasztikus fejlődést hozhat az energiahatékonyság növelésében és a fenntarthatóság előmozdításában. Valamint az adat tároló képessége miatt, az átfogó cikkek egyhangúan a BIM alapú LCA-t tartják a megfelelő jövőbeli útnak.

A cikkek javasolják az LCA-k mindennapi használatának bevezetését a tervezési folyamatban, annak érdekében, hogy az építőipari működési modell megváltozzon és tér kaphassanak a körforgásos gazdaság alapelvei.

Azonban számos problémát is felvetettek. V. WY. Tam, Y. Zhou, C. Illankoon és K. N. Le (2022), többek között sürgetik a BIM és az LCA integrációjának szabványosítását, annak javítása érdekében, hogy ezek a folyamatok egységek és összehasonlíthatóak legyenek ipar szerte. Jelenleg a BIM és az LCA külön-külön van szabványosítva, integrációjukra csupán előképek és felvázolt keretrendszerek kerültek kidolgozásra, de egyik sincs ténylegesen szabályozva, így amennyiben eltérés van a két metódus között, könnyen megbukhat az LCA-k összehasonlítási értéke. Ezen túl a következő kiemelt problémákat vázolták fel a publikációk. [23]

F. Abdelaal és B.H.W. Guo (2021) a legtöbb kutatáshoz képest más szemszögből vizsgálták a témát. A publikációk többsége, csak az előnyeit és jövőbeli képét vizsgálja a BIM-LCA-nak, ezzel szemben ők kifejezetten az „érdekeltek”, vagyis a kulcsfontosságú építőipari szereplők (tervezők, kivitelezők) szempontjából keresték a választ arra, hogy vajon ténylegesen alkalmazható-e a BIM-be integrált LCA a mindennapokban. Kutatásuk szerint, az ipari szereplők, nyitottak az ilyen fajta megoldásokra, és pozitívnak gondolják az előképeket, azonban a technológia, kiforratlansága, és az egységesítés hiánya miatt, még alkalmatlannak találják, a mindennapi gyakorlati használatra. [24]

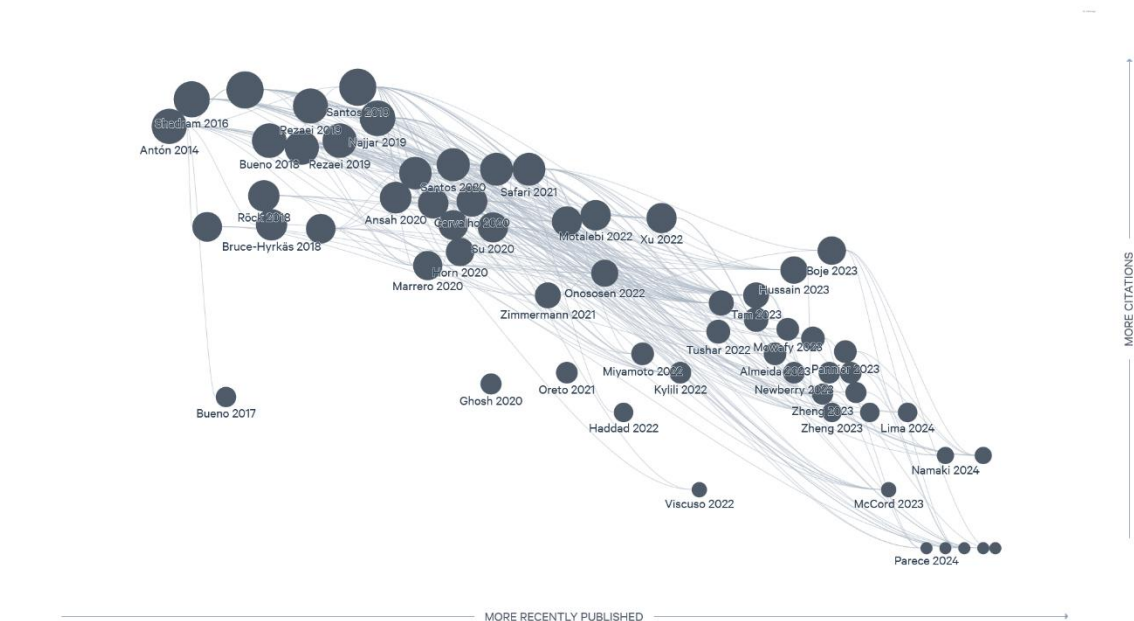
E. Marsh, S. Allen és L. Hattam (2022) kutatásukban az adatok minőségének és megbízhatóságának a problémáját emelték ki kutatásukban. Hangsúlyozták, hogy bár jelentős mennyiségű építőipari terméknek elkészült a környezeti termék nyilatkozata

(EPD) ezekben sokszor nem vették figyelembe a különböző változók jelentőségét emiatt környezetvédelmi szempontból, az ilyen EPD-ket alkalmazó LCA-k könnyen hamis adatot adhatnak. [25]

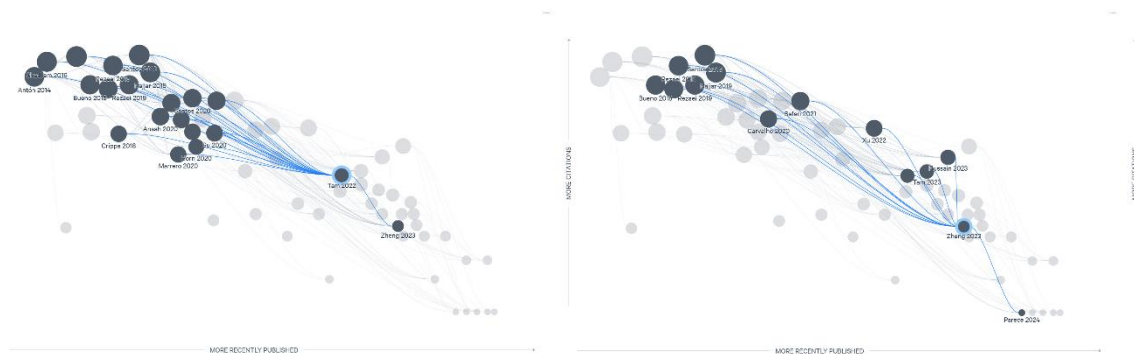
V. Durão, A. A. Costa, J. D. Silvestre¹, R. Mateus, R. Santos és J. de Brito (2020) egy teljes átfogó kutatást végeztek, amelyben számos oldalról megközelítik a BIM és LCA munkafolyamatokat. Az ő általuk kiemelt probléma, többek között, a LCA adatérzékenysége miatti konfliktus a BIM-es folyamatokba integrálva. Elemezték, hogy a modell LOD (level of detail) értéke, milyen mértékben, befolyásolja az LCA-k kimenetelét. Véleményük szerint, erre kell kidolgozni, egy szabályozott rendszert, annak érdekében, hogy az anyagokban, szerkezetekben alkalmazott LCA értékek illeszkedjenek az adott modell, kidolgozottsági szintjéhez. [26]

Z. Chen, L. Chen, X. Zhou, L. Huang, M. Sandanayake és P.S. Yap (2024) kutatásaik során a BIM-be integrált LCA szoftverek fejlődését vizsgálják, mint például a Tally és a SimaPro. A kutatás rávilágít az interoperabilitási nehézségekre, a meglévő szoftverek és automatikus LCA készítő programok között, valamint ennek fejlesztésére javaslatot is tesz. A legnagyobb problémát ők is a szabályozás hiányában látják, hiszen így a különböző softwarek fejlesztése is akadályokba ütközhet, szabályozás hiányában, egy software nem képes minden adat-linkre támogatni az optimalizációt. [27]

5.3. LCA és BIM Integrációjának vizsgálata:



19. ábra Az LCA és BIM Integrációjával foglalkozó források kapcsolati hálója



20. ábra A források közötti kapcsolatok, az egymáshoz való kapcsolataik megfigyelése

A 123 db irodalmi forrásból 55 db forrás foglalkozik mélyebb szinteken is a BIM-LCA integrációjával, annak problémáival, megoldási lehetőségeivel, jövőbeli fejlesztési irányzataival. Ezek a cikkek, jelentős mértékben kapcsolódnak, és számos frissebb publikáció hivatkozik egy-egy korábbi kiadványra (19.ábra). Ez azt mutatja, hogy a probléma megoldásával, számos kutató foglalkozik, és a korábban definiált problémákat igyekszik megoldani a tudományos közösség.

A BIM és az LCA hatékonyan integrálásának érdekében, számos keretrendszer, módszertant, és javaslatot vázoltak fel a kutatások. A cél a legtöbb esetben az adatgyűjtés egyszerűsítése, az eredmények optimalizálás, vagy pedig a munkafolyamat teljes automatizálása különféle kiegészítők (plug-in-ok), harmadik féltől származó automatizáló softwarek, vagy új fejlesztésű softwareeszközök alkalmazásával.

Több kutató is szorgalmazza a live- connection, vagyis a valós idejű visszacsatolás koncepcióját, amely egy tényleges állandó visszacsatolási forrást biztosítana a tervezési folyamat során. Azonban ennek létrejöttéhez, magas fokú automatizáció szükséges, megbízható adatbank, valamint szigorú szabályozások, amelyek bár eltérhetnek specifikus projektekben, de a BIM-es folyamatok során rögzíteni kell ezeket a szabályokat a BEP-ben és az EIR-ben. [28, 29, 30]

Az ebben a témában kiválogatott cikkekben, jelentős mennyiségű új módszertan, és software fejlesztési felhasználási keret rendszer került kidolgozásra. Ezek közül 1-1 példa, melyek valós projekteken is tesztelésre kerültek:

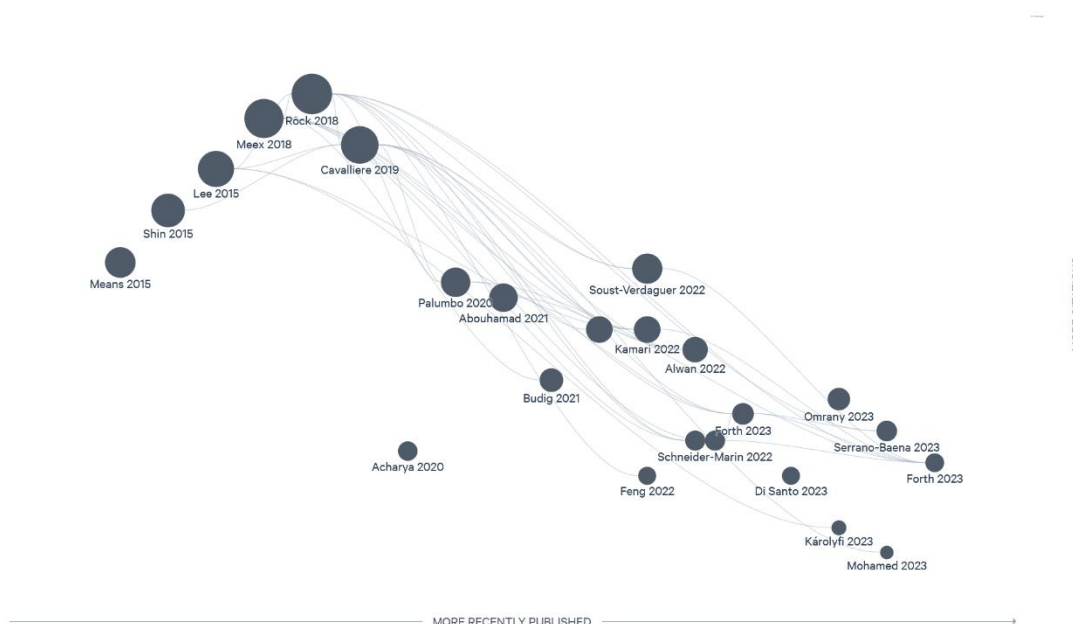
S. Parece, R. Resende, V. Rato (2024) kutatásuk során egy olyan módszert dolgoztak ki, amely megkísérli átlépni a BIM-LCA integrációban fenn álló hiányosságokat. Azt vizsgálták hogyan lehetne megoldani az adatátviteli problémákat, közel automatizált eszközökkel. Kutatásukban egy szigorúan felállított modellezési keret rendszert írtak elő, amelyben egy klasszifikációs rendszert állítottak fel. Ez a rendszer megfelelően előkészítve, érzékenyen tud reagálni, a modell LOD szintjéhez, így ennek a módszernek a segítségével, ki tudták nyerni a BIM-es modellből az elraktározott CO2 értékeit. Kutatásukat sikeresen alkalmazták valódi, különböző projekteken is, mely bizonyította, hogy alkalmazható a módszer a valós projektek esetében is. A szerzők becslése szerint közel 20 óra munkaidőt spóroltak meg ezzel a módszerrel. [31]

K. Figueiredo, A.W.A. Hammad, R. Pierott, V. W.Y. Tam, A. Haddad (2024) Kutatásuk során egy olyan dinamikus keretrendszert állítottak fel, amely az LCA-t és a digitális iker modellt, olyan módon kapcsolja össze, hogy az biztosítani tudja a valós idejű-visszacsatolást és adatkommunikációt, az épület egész életciklusát vizsgálva. Ehhez az úgynevezett „blockchain” technológiát alkalmazták, amely egy innovatív informatikai technológia. A lényege, hogy minden adatszinkronizálást blokkokba rendez, amelyeket metaadatokkal lát el, ezzel is biztosítva, az adatbiztonságot, átláthatóságot. [32]

B. Zheng, M. Hussain, Y. Yang, A. P.C. Chanm H.-L- Chi (2023) A szerzők kutatásuk során 4 féle integrálási megoldást hasonlítottak össze: Plug-In, parametrikus, IFC, és a hagyományos integrálási módokat hasonlították össze. Mind a 4 módszernek megvoltak a sajátos előnyei és hátrányai. A Plug-in alapú módszerrel előnye, hogy jelentős modellezési időt tudtak vele meg spórolni, azonban inkonzisztens adatokat eredményezhet, A parametrikus módszer előnye, hogy folyamatossá tehető vele az LCA

értékek kinyerése, és automatizálható a kommunikáció az LCA adatbázissal, azonban a jelentős gépigény miatt, könnyen leáll, nem kommunikál az egyéb softwarekkel. Az IFC alapú módszer előnye, hogy egy megfelelően kidolgozott BIM modellel, jelentősen lecsökkenti a mennyiség kinyerési folyamat időtartamát, és egy állandó linkként szolgálhat az LCA software és a elem között, hátránya azonban, hogy jelentős mennyiségű adatvesztés alakulhat ki az exportálás-importálási folyamatok során. A hagyományos manuális módszer előnye, hogy számos anyag adatbázis alkalmazása lehetséges, azonban hátránya, hogy jelentősen időigényes munkafolyamat, illetve, sokkal nagyobb a valószínűsége az emberi hibának is. A kutatás során azt mutatták ki, hogy A plug-in alapú a leggyorsabb, míg a hagyományos a legpontosabb adatkinyerési forma. A parametrikus és az IFC alapú integráció össze hasonlításakor azt az eredményt kapták, hogy a parametrikus módszerrel gyorsabban lehet elvégezni az elemzést, azonban magasabb a hibázási lehetőség is, ezzel szemben pedig az IFC alapú megoldás, lassabb, de jelentősen pontosabb, 99% pontossági mutatóval. [33]

5.4. LCA vizsgálata a tervezés korai szakaszában:



21. ábra A tervezési folyamat korai szakaszaiban integrált LCA-val foglalkozó források kapcsolati hálója

A 123 db irodalmi forrásból, bár jelentős része a tervezés első szakaszaiban javasolja az LCA integrációt, kiemelten 25 db forrás foglalkozik a tervezés korai szakaszában az LCA előnyeivel és hátrányaival.

A már korábban is említett tudatos anyagválasztás, és egyszerűbb döntés hozatal mellett, számos cikk kiemeli, hogy az életciklus elemzések a tervezésnek már a koncepció szakaszban való alkalmazása, jelentősen befolyásolhatja a tervezési irányvonalat. Hatással lehet a funkció elosztásra, és a betelepítésre is, amely döntések alapján változhatnak a szerkezeti, nyersanyag követelmények is, de a megrendelők bevonásával, akár társadalmi hatása is lehet egy ilyen tervezési folyamatnak.

Azonban az életciklus elemzésekben számos olyan aspektus van, amely megnehezíti az épület szintű életciklust, az egyszerű termék életciklus elemzéshez képest. Egy épület életideje nagyon változó lehet, illetve energia igénye, és káros anyag kibocsátása, a használati szakaszban nagyban függ a felhasználók, szokásaitól. [34] Ebből kifolyólag napjainkban még nem teljes mértékben tudnak integrálódni a tervezési folyamat elején, az ismeretlen változók miatt, ezért is szorul a legtöbb alkalmazott LCA a tervezési folyamat végére, mint csak egyszerű nyilatkozat az épület által kibocsátott káros anyagokról.

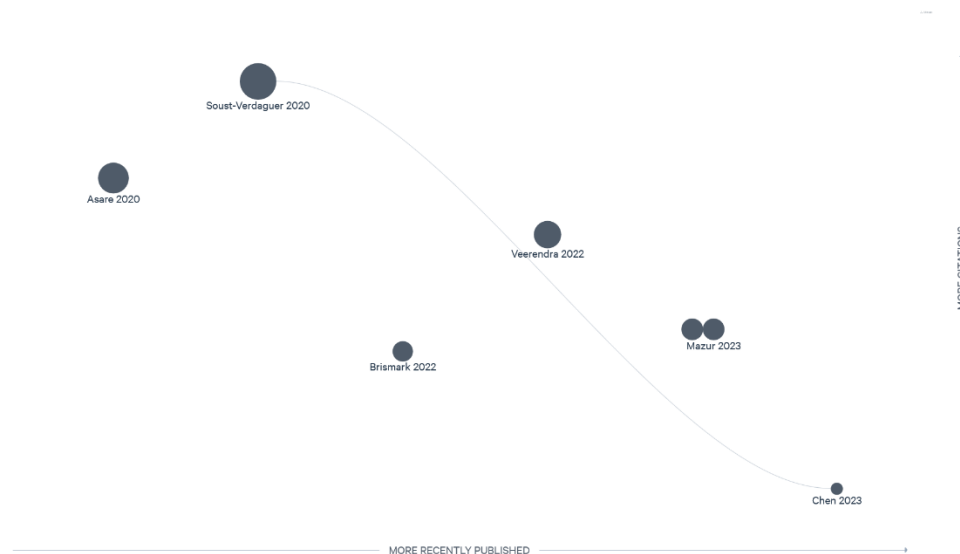
Kiemelik, hogy bár már léteznek valóban használható LCA módszerek és keretrendszerek egy épület életciklus elemzésének az elvégzéséhez, azonban egy-egy épület egyediségéből kifolyólag számos probléma merülhet fel, az életciklus elemzések során, amely bizonytalanságot, és nem teljes értékű adatokat eredményezhet.

Ennek fényében bizonyos kutatások szorgalmazzák, egy olyan módszer, software kidolgozását, amely egységben van az ISO szabványokkal, és amely egységesen beépíthető az AEC (Architecture, Engineering, Construction/ Építész, Mérnöki, Építő) ipar tényleges munkafolyamatiba, olyan módon, hogy az ne akadályozza a munkafolyamatok elvégzését, azonban bizonyos aspektusaiban egyedileg módosítható legyen a szükséges kritériumoknak megfelelően. [35]

Más források szerint (E. Meex, A. Hollberg, E. Knapen, L. Hildebrand, G. Verbeeck, 2018) olyan megoldás lenne célra vezető, amely magát az LCA folyamatot reformálja meg, és egy új LCA alapú környezeti hatás elemzést (enviromental impact assesment-EIA) hoz létre. Ennek a módszertannak az kell, legyen a célja, hogy egyszerűsítse szükség szerint az LCA összetettségét, hiszen az tervezési fázis elején, biztos geometriai keretek nélkül, a teljes értékű életciklus elemzés lehetetlen. Több megoldást is felvázoltak, köztük egy olyan keretrendszert is, amely az LCA-t három verzióra osztja, egyszerűsítés szintjei szerint: szűrés, egyszerűsített és részletes LCA. [36]

B. Soust-Verdaguer, I. Bernardino Galeana, C. Llatas, M.V. Montes, E. Hoxha, A. Passer 2022-ben egy ehhez hasonló munkafolyamatot dolgozott ki és mutatott be egy esettanulmányon keresztül. Kutatásuk szerint, egy becslésre kidolgozott LCA módszer több mint 60%-át meg tudja határozni a tervezett épület környezeti hatásainak, már a tervezési folyamat legelején, míg az erre a becslési módszerre felépített részletes LCA, a tervezési folyamat végén az épület káros anyag kibocsátásainak közel 100%-át meg tudja határozni. Az általuk alkalmazott módszer, az úgynevezett „elem módszer”. Többségében a költségbecslés során használják ezt a stratégiát, azonban ebben a kutatásban azt mutatják, be hogyan lehet ezt az LCA egyszerűsítésére is alkalmazni. A kutatásban részletezik, hogyan lehet ezzel a módszerrel egy konzisztens adat struktúrát felépíteni, ami a tervezés korai fázisaiban helyettesíti a még meg nem hozott döntések által okozott adat hiányokat. A kutatást manuálisan végezték el, azonban említik a kutatásban, hogy automatizálható a folyamat programozói felület alkalmazásával. [37]

5.5. Kisméretű középületeken és családi házakon elvégzett LCA:



21. ábra A családi házakon, kisméretű középületeken elvégzett LCA-val foglalkozó források kapcsolati hálója

A kiválasztott 123 db irodalmi forrásból csupán 6 db foglalkozik, családi ház méretű épületek LCA elemzésével. Ez abból is fakadhat, hogy a nagyobb épületekre alkalmazható LCA-k nagy valószínűséggel alkalmazhatóak kisméretű épületek elemzésének az elvégzésére is. Ez azonban nem teljes mértékben fedi le a valóságot. Egy kisméretű épület költségvetése, jelentősen alacsonyabb, korlátozottabb, mint egy nagyberuházásnak. Tervezője, sokszor egyéni vállalkozó, nem pedig egy iroda, ebből kifolyólag, nem valószínű, hogy a magas beszerzési áron elérhető külső softwarekhez, plug-inokhoz hozzá férése van. Ebből kifolyólag kisméretű épületek, családi házak tervezése esetén kiemelten fontos, hogy rendelkezésre álljon, ingyenes elérhető, hiteles adatbázisok, amelyeket a tervező alkalmazhat, illetve egyszerű és gyors LCA elemzési módszerek, melyek beépíthetőek, egy kisméretű épület tervezési folyamataiba.[Climate mitigation]

A 6 cikk kapcsolatait megvizsgálva, azt tapasztaltam, hogy csupán 2 cikk hivatkozik egymásra (19.ábra). Ez amiatt is lehet, mert a cikkek azon túl, hogy mindegyike családi ház méretű épülettel foglalkozik, más-más irányból közelítik meg az LCA témakörét.

A témakörben a következő kutatási eredményeket mutatták be:

Y. Chen and S. Gallardo (2023) egy Ecuadori családi ház esetében kísérelte meg az LCA integrációját a BIM-be. A kutatás és egyben tervezés során, az volt a cél, hogy egy LCA segítségével megvizsgálják, az épületbe beépíthető lehetséges helyi anyagok környezeti

hatásait, majd ezeket alapján az úgynevezett „Weighted sum approach – WSA” azaz a súlyozott összes módszerrel vizsgálták meg és állapították meg mely tervezett épületek felelnek meg a fenntarthatósági elveknek. A tanulmány igyekezett felhívni a figyelmet az anyagválasztás és az anyaghasználat fontosságára az építőipari szektorban és egyben népszerűsíteni a fenntartható építészetet Ecuador-ban. [38]

B. Soust-Verdaguer, C.Llatas, és L. Moya (2020) kutatásuk célja az volt, hogy megvizsgálják, mekkora különbség lehet egy családi ház környezeti hatásaiban, anyagválasztás alapján. Ennek érdekében a tervezés során létre hozták ugyan annak az épületnek, egy téglafalás tartószerkezetű és egy fa keret tartószerkezetes BIM modelljét, amelyeken részletes életciklus elemzést végeztek, és ezek alapján összehasonlították a két épület környezeti hatásait, életciklusaikra levetítve. A különböző beépített anyagoknak környezeti hatásaiban jelentős különbséget kaptak eredményül, és számos javaslatot tettek a lehetséges fejlesztési területekre, annak érdekében, hogy csökkentsük a CO₂ és egyéb üvegházhatású gázok kibocsátását. Eredményeikkel hangsúlyozni szerették volna, hogy már kisméretű épületek esetében is, gondolni kell a fenntarthatósági kérdésekre az építészeti tervezés során. [39] Ł. Mazur és A. Olenchuk, (2023) egy nagyon hasonló összehasonlításos kutatást végeztek el. Ők is egy épület tartószerkezetének a környezeti hatásait figyelték meg, anyagválasztás alapján (fa keret tartó szerkezet és a téglafal tartószerkezet). Ők azt az eredményt kapták, hogy az épület kétféle anyagválasztása között jelentős CO₂ kibocsátási különbség van. A téglafal szerkezetű épület CO₂ kibocsátása (43226.94kg CO₂e) több mint háromszorosa, a fa szerkezetes épületének (13522.13 kg CO₂e). [40]

J.Briskmark, T. Malmqvist, és S. Borgström (2022) kutatásaik során az LCA felhasználását kutatták a döntéshozatal támogatására a fenntartható családi házak tervezésében Svédországban. Tanulmányuk során kiemelték, hogy az LCA alapú információk döntéshozatalba való integrálásához, a társadalmi dinamika és a döntési hozatal részletes összefüggéseinek jobb megértése elengedhetetlen. Ennek érdekében végeztek egy felmérést kiemelten csak családi házak tervező építészek között. A kutatásuk során megállapították, hogy négy döntési kontextusban van az LCA alapú információknak ösztönző hatása az építőipari káros anyag kibocsátás csökkentése terén: Az épületrendszerek fejlesztése, épület modellek fejlesztése, és az építőanyagok termékek kiválasztása során, valamint a megrendelővel való párbeszéd során. A felmérések kiértékelése után, azt az eredményt kapták, hogy az első két aspektust teljes mértékben a

gyártók korlátozzák be, míg a második kettő faktorban a megrendelő döntése jelentősen befolyásolhatja az épület végső környezeti hatásait. Azt állapították meg hogy a cégekre a különböző klíma szabályozások nagy hatásokat gyakoroltak, (többek között kötelezővé tették a környezeti hatás nyilatkozat (EPD elkészítését), azonban a megrendelőkre a tervezőnek/tervező cégnek van hatása, így nekik is ösztönözniük kell az ilyen megoldások választását, annak érdekében, hogy a köztudatban is jelen legyen az ilyen irányú preferencia. A kutatás azonban bizakodóan látja a jövőt abból a szempontból, hogy a fiatalabb megrendelők nagytöbbsége, nyitott a fenntartható döntések meghozatalára, és prioritásként előtérbe helyezik, a fenntartható épületek megvalósítását Svédországban.[41]

6. KÖVETKEZTETÉS, ÖSSZEFOGLALÁS

Az LCA és a BIM közötti Integráció terén drasztikus fejlődések tapasztalhatóak az elmúlt évek publikációi alapján. Ettől függetlenül számos kutatás továbbra is hangsúlyozza, hogy a kifejlesztett módszertanok keret rendszerek, nem elegendők a rendszer szintű felhasználáshoz, és továbbra is számos ponton fejlesztést követelnek az ipartól. A szisztematikus irodalomkutatás során, számos ilyen fejlesztési témájú publikációt tanulmányoztam, azonban e publikációk sokszínűsége is azt bizonyítja, hogy még nincs egy olyan stabil rendszer, amely képes lenne egységesíteni az életciklus elemzéseket az építő iparban.

Jelentős számú kiadvány tesz említést arról, hogy szabványosítás, és egységesítés nélkül, az LCA-k nem képesek olyan értékkel rendelkezni, amire a lehetőség benne van a technológiában, éppen ezért sürgetik az életciklus elemzések jogszabály szinten is kötelezővé tételét. Ezzel elérhetővé válna, hogy a gyártók rá legyenek kötelezve a környezeti termék nyilatkozatok kiállítására, és elérhetővé tételére, hiszen azok hiányában, nem lehetséges a teljes értékű életciklus elemzések elvégzése.

Jelentős kihívást jelent még, a helyi adatbázisok hiányossága, és azok elérhetősége. A meglévő és elérhető adatbázisok, bár lehetővé teszik az életciklus elvégzését, nem megfelelőek teljes értékű LCA készítéséhez, hiszen a helyi sajátosságok, nagyban eltérhetnek egymástól, ezáltal nagyban befolyásolva a teljes elemzés végkimenetelét.

Kijelenthető, hogy bár az elmúlt 10 évben jelentős fejlődést ment végbe az BIM-be integrálható LCA-k terén, azok valós alkalmazásához, még számos kutatásnak, egységesítésnek és szabályozásnak kell megvalósulnia, hogy valóban beépíthető legyenek az életciklus elemzések már az építészeti tervezés korai szakaszaiban is.

Kutatásom folytatásaként szeretném az irodalmi elemzéseket részletesen kibontani, széleskörű elemzésekkel megvizsgálni. Ezen kívül szeretnék végrehajtani egy felmérést, a magyarországi építésztervezők és kivitelezők körében, annak megvizsgálásának érdekében, hogy a mai ipari szereplők hogyan látják a fenntarthatósági kérdéseket, felmérni, hogy mely tervező irodák, kivitelező cégek foglalkoznak a tervezési folyamat alatt az épületek jövőbeli környezeti hatásaival, és hogy hogyan látják az életciklus elemzéseket, milyen formában tartják valóságosnak ennek a technológiának a mindennapos használhatóvá tételét.

Az esettanulmányok, a részletes LCA-t bemutató kutatások, és a felmérés eredményei alapján, egy olyan átfogó összegzést szeretnék elvégezni, amely útmutatást jelenthet, a szükséges és hasznos fejlesztési irányok meghatározásában, hazánkban is.

Véleményem szerint az LCA kutatások terén jelentős hiányt mutat a gazdaságos, módszertanok kidolgozása, kis és egyéni vállalkozók számára, akiknek nem áll rendelkezésükre, a nagyobb software beruházások lehetősége. Ebből kifolyólag, a jövőben szeretnék kidolgozni egy olyan keretrendszert, amely egy meglévő adatbázis alapján családi házak és kisméretű középületek esetében, könnyedén alkalmazható, és lehetőség szerint, nem igényel további beruházásokat, a tervező, kivitelező és a beruházó fél oldaláról sem, azonban lehetővé teszi, az épület életciklusainak az elemzését.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez úton is szeretném megköszönni mentoromnak, dr. Rák Olivérnek, a rengeteg szakmai segítséget, ösztönzést, és kitartást, amivel támogatta kutatásom és jelen dolgozat létrejöttét. Szeretném továbbá megköszönni a szakmai támogatást és tanácsadást és Novák Balázsnak.

A munkát a BIM Skills Lab kutatócsoport támogatta szakmai segítséggel és eszközpark biztosításával.

A tanulmány a PTE Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program (EKÖP-24 kódszámú) keretein belül jött létre.

A kutatás a Pécsi Tudományegyetemen, a Műszaki és Informatikai karon készült.

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a Tudományos és Művészeti Diákköri konferenciára benyújtott dolgozat a saját munkám eredménye.

A felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem, és szakszerűen kezeltem. Egyéb jelentősebb segítséget nem vettem igénybe.

Az elkészült Tudományos és Művészeti Diákköri konferenciára leadott kutató munkám által talált eredményeket a Pécsi Tudományegyetem, Műszaki és Informatikai kara saját céljaira térítés nélkül felhasználhatja.

Pécs, 2024.



.....

Hallgató aláírása

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Abubakar, I., 2020. The future of migration, human populations, and global health in the Anthropocene. *The Lancet* 396, 1133–1134. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31523-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31523-3)
- [2] Bongaarts, J., 2019. Population: The Current State and Future Prospects, in: McIvor, A., Dasgupta, P., Raven, P. (Eds.), *Biological Extinction: New Perspectives*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 193–213. <https://doi.org/10.1017/9781108668675.010>
- [3] World Health Organization, 2018. WHO housing and health guidelines. World Health Organization, Geneva. pp.(23)
- [4] Addressing the environmental and climate footprint of buildings, 2024th ed, 2024. . European Environment Agency, Denmark, Copenhagen. pp.(13-34)
- [5] Javaslat AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS RENDELETE a klímasemlegesség elérését célzó keret létrehozásáról és az (EU) 2018/1999 rendelet (az európai klímarendelet) módosításáról, 2020.
- [6] Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., Shamseer, L., Tetzlaff, J.M., Akl, E.A., Brennan, S.E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J.M., Hróbjartsson, A., Lalu, M.M., Li, T., Loder, E.W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L.A., Stewart, L.A., Thomas, J., Tricco, A.C., Welch, V.A., Whiting, P., Moher, D., 2021. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- [7] Secretary-General, U., Development, W.C. on E. and, 1987. Report of the World Commission on Environment and Development :: note /: by the Secretary-General. pp. 54
- [8] AR4 Climate Change 2007: Synthesis Report — IPCC, n.d. URL <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/> (accessed 12.3.24).
- [9] Nováky, B., 2009. Az éghajlatváltozás, hatásai és az intézkedések az IPCC negyedik értékelő jelentése tükrében. *TL* 7, 241–268. <https://doi.org/10.56617/tl.4107>
- [10] What's in a number? The significance of the 1.5°C warming threshold and reporting on its possible breach in popular media [WWW Document], 2023. . Science Feedback. URL <https://science.feedback.org/significance-1-5c-warming-threshold-reporting-possible-breach-popular-media/> (accessed 12.3.24).
- [11] NÉMETH K. (2021) A körforgásos gazdaság alapjai. Veszprém, Pannon Egyetemi Kiadó
- [12] Körforgásos gazdaság: mit jelent, miért fontos és mi a haszna? [WWW Document], 2023. . Témák | Európai Parlament. URL <https://www.europarl.europa.eu/topics/hu/article/20151201STO05603/korforgasos-gazdasag-mit-jelent-miert-fontos-es-mi-a-haszna> (accessed 12.3.24).
- [13] A körforgásos gazdaság az építőipar jövője [WWW Document], n.d. URL <https://www.hugbc.hu/hirek/a-korforgasos-gazdasag-az-epitoipar-jovoje/4108> (accessed 12.3.24).
- [14] Zaporácz M. Szabó B. (2019) BIM – Kézikönyv, Budapest, Lechner Nonprofit Kft.

- [15] gobesz, Zs.F., 2020. The Roots of Bim. *Műszaki Tudományos Közlemények* 12, 42-49. <https://doi.org/10.33894/mtk-2020.12.06>
- [16] International standard, ISO 19650, Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles Switzerland, International Organization for Standardization
- [17] International standard, ISO 19650, Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the assets Switzerland, International Organization for Standardization
- [18] International standard, ISO 14040, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (1997) Switzerland, International Organization for Standardization
- [19] Life Cycle Assessment Best Practices of ISO 14040 Series, n.d. (2004) Committee on Trade and Investment
- [20] Mahmud, J., Arefin, S., Ahmmed, M.I., 2024. Uncovering the research tapestry: bibliometric insights into BIM and LCA – exploring trends, collaborations and future directions. *Constr. Innov.* <https://doi.org/10.1108/CI-10-2023-0267>
- [21] Yılmaz, Y., Seyis, S., 2021. Mapping the scientific research of the life cycle assessment in the construction industry: A scientometric analysis. *Build. Environ.* 204. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108086>
- [22] Xue, K., Uzzal Hossain, M., Liu, M., Ma, M., Zhang, Y., Hu, M., Chen, X., Cao, G., 2021. Bim integrated lca for promoting circular economy towards sustainable construction: An analytical review. *Sustainability* 13, 1–21. <https://doi.org/10.3390/su13031310>
- [23] Tam, V.W., Zhou, Y., Illankoon, C., Le, K.N., 2022. A critical review on BIM and LCA integration using the ISO 14040 framework. *Build. Environ.* 213. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108865>
- [24] Abdelaal, F., Guo, B.H.W., 2022. Stakeholders' perspectives on BIM and LCA for green buildings. *J. Build. Eng.* 48. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103931>
- [25] Marsh, E., Allen, S., Hattam, L., 2023. Tackling uncertainty in life cycle assessments for the built environment: A review. *Building and Environment* 231, 109941. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109941>
- [26] Durão, V., Costa, A.A., Silvestre, J.D., Mateus, R., Santos, R., de Brito, J., 2020. Current Opportunities and Challenges in the Incorporation of the LCA Method in BIM. *The Open Construction and Building Technology Journal* 14, 336–349. <https://doi.org/10.2174/1874836802014010336>
- [27] Chen, Z., Chen, L., Zhou, X., Huang, L., Sandanayake, M., Yap, P., 2024. Recent Technological Advancements in BIM and LCA Integration for Sustainable Construction: A Review. *SUSTAINABILITY* 16. <https://doi.org/10.3390/su16031340>
- [28] Hosamo, H., Coelho, G., Buvik, E., Drissi, S., Kraniotis, D., 2024. Building sustainability through a novel exploration of dynamic LCA uncertainty: Overview and state of the art. *BUILDING AND ENVIRONMENT* 264. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111922>

- [29] Guignone, G., Calmon, J.L., Vieira, D., Bravo, A., 2023. BIM and LCA integration methodologies: A critical analysis and proposed guidelines. *J. Build. Eng.* 73. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106780>
- [30] Safari, K., AzariJafari, H., 2021. Challenges and opportunities for integrating BIM and LCA: Methodological choices and framework development. *Sustainable Cities and Society* 67, 102728. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102728>
- [31] Parece, S., Resende, R., Rato, V., 2024. A BIM-based tool for embodied carbon assessment using a Construction Classification System. *Developments in the Built Environment* 19, 100467. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100467>
- [32] Figueiredo, K., Hammad, A.W.A., Pierott, R., Tam, V.W.Y., Haddad, A., 2024. Integrating Digital Twin and Blockchain for dynamic building Life Cycle Sustainability Assessment. *Journal of Building Engineering* 97, 111018. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111018>
- [33] Zheng, B., Hussain, M., Yang, Y., Chan, A.P.C., Chi, H.-L., 2023. Trade-offs between accuracy and efficiency in BIM-LCA integration. *Eng. Constr. Archit. Manage.* <https://doi.org/10.1108/ECAM-03-2023-0270>
- [34] Atik, Ş., Aparisi, T.D., Raslan, R., 2024. Mind the gap: Facilitating early design stage building life cycle assessment through a co-production approach. *J. Clean. Prod.* 464. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142803>
- [35] Means, P., Guggemos, A., 2015. Framework for Life Cycle Assessment (LCA) Based Environmental Decision Making During the Conceptual Design Phase for Commercial Buildings. *Procedia Engineering* 118, 802–812. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.517>
- [36] Meex, E., Hollberg, A., Knapen, E., Hildebrand, L., Verbeeck, G., 2018. Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design. *Building and Environment* 133, 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.016>
- [37] Soust-Verdaguer, B., Bernardino Galeana, I., Llatas, C., Montes, M.V., Hoxha, E., Passer, A., 2022. How to conduct consistent environmental, economic, and social assessment during the building design process. A BIM-based Life Cycle Sustainability Assessment method. *J. Build. Eng.* 45. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103516>
- [38] Chen, Y., Gallardo, S., 2024. A Multi-Objective Optimization Method for the Design of a Sustainable House in Ecuador by Assessing LCC and LCEI. *Sustainability* 16. <https://doi.org/10.3390/su16010168>
- [39] Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., Moya, L., 2020. Comparative BIM-based Life Cycle Assessment of Uruguayan timber and concrete-masonry single-family houses in design stage. *Journal of Cleaner Production* 277, 121958. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121958>
- [40] Mazur, Ł., Olenchuk, A., 2023. Life Cycle Assessment and Building Information Modeling Integrated Approach: Carbon Footprint of Masonry and Timber-Frame Constructions in Single-Family Houses. *Sustainability* 15. <https://doi.org/10.3390/su152115486>
- [41] Brismark, J., Malmqvist, T., Borgström, S., 2022. Climate Mitigation in the Swedish Single-Family Homes Industry and Potentials for LCA as Decision Support. *BUILDINGS* 12. <https://doi.org/10.3390/buildings12050588>