

Szecskő Heléna¹, Horváth Tamás²

ALACSONY ENERGIAIGÉNYŰ LAKÓÉPÜLET KOMPLEX TERVEZÉSE: ÉPÜLETSZERKEZETEK, ENERGETIKA ÉS ÉLETCIKLUS ELEMZÉS

COMPLEX DESIGN OF A LOW-ENERGY RESIDENTIAL BUILDING:
BUILDING STRUCTURES, ENERGY AND LIFE CYCLE ANALYSIS

KIVONAT / HUN

Az építés jelentős környezeti hatásokkal bír, melyekre egyre nagyobb figyelemmel kell lennünk a globális klímaváltozás kihívásai közepette. Cikkünkben egy alacsony energiaigényű lakóépület tervezési folyamatához kapcsolódóan szeretnénk megmutatni, hogy az építészeti és épületszerkezeti tervezés szempontjaihoz miként társulhat a környezeti hatások elemzése a teljes életciklus elemzés (LCA) módszerének használatával. A tervezett lakóépület esetén kétféle tartószerkezeti kialakítást hasonlítottunk össze, a falazott, vasbeton födémes megoldást és a CLT fapaneles építést. A homlokzati hőszigetelés tekintetében megvizsgáltuk a polisztirolhab, az ásványi hab és az ásványgyapot anyagok alkalmazását. Vizsgálatunkat BIM környezetből kiindulva a One Click LCA szoftver segítségével végeztük el. Az alkalmazott módszer és a vizsgálat eredményei érdekesek lehetnek mindazok számára, akik a környezeti hatások figyelembevételével szeretnék döntést hozni tervezett épületük anyaghasználatát illetően.

Kulcsszavak: épületszerkezet-tervezés, épületenergetika, életciklus elemzés, környezeti hatások, LCA, BIM

ABSTRACT / ENG

Construction has significant environmental impacts, which need to be increasingly taken into account in the face of global climate change challenges. In this article, we would like to show how the aspects of architectural and structural design can be combined with the analysis of environmental impacts using the method of total life cycle analysis (LCA) in connection with the design process of a residential building with low energy demand. In the case of the planned residential building, two types of structure designs were compared, the masonry, reinforced concrete slab solution and the CLT wood panel construction. With regard to thermal insulation, we examined the use of polystyrene foam, mineral foam and mineral wool materials. Our study was conducted starting from a BIM environment using One Click LCA software. The method and our results may be interesting for all those who would make a decision regarding the material use of their planned building taking into account the environmental impacts.

Keywords: structural design, building energy, life cycle analysis, environmental impacts, LCA, BIM

¹ okl. építészmérnök, doktorandusz, Széchenyi István Egyetem, Építészeti és Épületszerkezettani Tanszék, e-mail: helenaszecsko@gmail.com

² okl. építészmérnök, PhD, egyetemi docens, Széchenyi István Egyetem, Építészeti és Épületszerkezettani Tanszék, e-mail: htms@ga.sze.hu

1. | TÉMAFELVETÉS

A globális felmelegedést az üvegházhatású gázok kibocsátásának növekedése olyan mértékűre fokozta, amelyet a bolygó biokapacitása talán már nem képes visszafordítani. A népességszám és az életszínvonal növekedése egyre több erőforrást igényel, amit a természet hosszú távon nem tud biztosítani. A környezettudatos megközelítés minden területen sürgető.

Az energiafelhasználás és a szén-dioxid kibocsátás jelentős része az építőiparhoz köthető. Az épületek építéséhez, karbantartásához és használatához szükséges energia mennyisége nagyon magas, a világ energiafogyasztásának 40%-a. Az épületek energiatakarékos létesítése és működtetése érdekében az építéshez szükséges energia- és nyersanyag-felhasználás mérséklése szükséges, melyhez komplex tervezői megközelítés szükséges [1].

Cikkünkben egy alacsony energiafelhasználású családi lakóház tervezése kapcsán, arra a kérdésre keressük a választ, hogy a szerkezetek anyagválasztása milyen hatással van az épület teljes életciklus alapú CO₂ kibocsátására. Az eltérő szerkezeti anyagok hatásának vizsgálata mellett a jellemző épületszerkezeti egységek részarányára vonatkozóan is szeretnénk következtetéseket megfogalmazni. A vizsgálathoz szükséges módszertani háttér összegzése mellett, bemutatjuk az épületszerkezeti, épületenergetikai és teljes életciklus alapú elemzés eredményeit is.

2. | AZ ÉLETCIKLUS ELEMZÉS KERETRENDSZERE ÉS LÉPÉSEI

Az építőiparban a teljes életciklus elemzés (LCA: Life Cycle Analysis vagy Assessment) keretrendszerét az MSZ EN 15978:2012 magyar szabvány definiálja, amely az elemzés minden aspektusára iránymutatást ad. A szabvány szerint az építési termékek és épületek életciklusa négy fő szakaszra osztható **(1. ábra)** [2]:

A1-A3 Termék szakasz: Magában foglalja a nyersanyag kitermelését, szállítását és a gyártási folyamatokat az energiaáramokkal és emissziókkal.

A4-A5 Építési folyamat: Az építési termékek helyszínre szállítása és a kivitelezési folyamat szintén energiát igényel és hulladékképződéssel is jár.

B1-B7 Használat: Lefedi az épület / építési termék használatát, a karbantartását, javítását, felújítását. Az épület élettartama (pl. 50 év) alatt ezek a műveletek bizonyos időnként ismétlődnek (5, 10, 15 évente). A használati fázisban jelentős környezetterhelést jelent az üzemeltetéshez szükséges energiafelhasználás és vízfogyasztás. A közel nulla energiaigényű épületek létesítése nagy kihívás az ágazat számára.

C1-C4 Életút végi szakasz: Magában foglalja a bontást, szállítást, hulladékfeldolgozást és lerakást. Ez a szakasz por-szennyezéssel és zajjal jár. A környezetterhelések csökkentése érdekében a bontott anyagok szelektív elkülönítése, a helyszíni aprítási műveletek hozzájárulnak az újrahasznosításhoz és a lerakás minimalizálásához.

D Az épület életciklusán túli szakasz: A rendszerhatáron kívül eső előnyök és terhelések szakasza, amibe beleértendő az újrahasználat, az újrahasznosítás vagy az energetikai célú hasznosítás. Ez a szakasz, a körforgásos megoldások számára nyújt innovációs lehetőségeket. Potenciális haszonnal jár, ha már a tervezési fázisban a hulladékképződés elkerülésére törekszünk.

Az MSZEN15978 szabvány alapján az LCA az alábbi lépések szerint történik [2] [3] [4]:

- Az elemzés céljának meghatározása.
- Az elemzés tárgyának, az épület modelljének létrehozása.
- Szenáriók meghatározása az épület életciklusára vonatkozóan (például: nincs felújítás, részleges felújítás, bontás és új építés).
- Anyagmennyiségek meghatározása a modell segítségével.
- Környezeti hatások beszerzése hiteles adatforrásokból vagy független termékadatokból (pl. EPD-k).
- A fajlagos környezeti hatások multiplikációja az anyag- és energiafelhasználás függvényében a különböző szenáriók szerint.

Az elemzés eredményének pontosságát elsősorban két tényező határozza meg: az épület anyagkimutatásában szereplő anyagmennyiségek részletessége és a környezeti hatásadatok hitelessége. Az építőiparban az LCA-t termékfejlesztésre, környezetvédelmi terméknnyilatkozatok (EPD) elkészítésére és épületminősítő rendszerek (pl. LEED, BREEAM, DGNB) részeként használják.

ÉPÜLET ÉRTÉKELÉSE														
épület életciklusa													életcikluson túl	
A1-3			A4-5		B1-7					C1-4				D
termék szakasz			építési szakasz		használati szakasz					életút vége szakasz				rendszerhatárokon kívüli előnyök és terhelések
nyersanyag kitermelése	szállítás	gyártás / előállítás	szállítás	építés / kivitelezés	használat	karbantartás	javítás	csere	felújítás	bontás	szállítás	hulladék-feldolgozás	deponálás	újrahasználat / újrahasznosítás / energetikai hasznosítás
					üzemeltetési energiafelhasználás									
					használati víz felhasználás									

1. ÁBRA: Az életciklus elemzés szokásos keretrendszere [2]

3. | A BIM MODELL ALAPÚ TERVEZÉS LEHETŐSÉGEI

Az építmenyinformációs modellezés (BIM: Building Information Modeling vagy Management) napjainkban egyre fontosabb szerepet játszik a hatékony tervezési és építési folyamatokban, ez részben a gyorsuló gazdaság miatt kialakuló építőipari turbulenciának, részben pedig az egyre bonyolultabb projekteknek köszönhető. A tervezési, kivitelezési és üzemeltetési folyamatok hatékonyságának fokozása mellett, a BIM alapú modellezés az épület teljes életciklusának kezelésére is kiválóan alkalmas.

A Lechner Tudásközpont BIM kézikönyve [5] így határozza meg a BIM lényegét: „A BIM olyan CAD-alapú tervezési módszerek és irányelvek összessége, amely lehetővé teszi az építmények létrehozásában és üzemeltetésében részt vevő szereplők (építetők, tervezők, kivitelezők, üzemeltetők) számára a valóságnak megfelelő virtuális térben történő együttműködést és információmegosztást, valamint a releváns adatok gyors megjelenítését”. A BIM modell részletesen tartalmazza az épület minden elemét, megkönnyítve a projekt résztvevőinek az épület előzetes megismerését és megértését, még mielőtt megépülne. A BIM és a hagyományos 3D modellezés közötti lényeges különbség abban rejlik, hogy a BIM modell számos információval egészül ki. Ezek az információk meghatározzák, hogy milyen széles körben és részletesen használható fel később a modell. A BIM-modellezés lehetőséget ad arra is, hogy a projektben résztvevő szakemberek megosz- szák és feltöltsék saját területük adatait, hozzájárulva ezzel a teljes modell pontosításához.

A BIM modell segíthet megérteni az épület energetikai működését is, támogatva az energiahatékony tervezést. A modell lehetővé teszi a tájolás, a szerkezeti megoldások és a beépített anyagok elemzését, így segít abban, hogy a tervezés során az optimális energetikai döntések születhessenek meg.

A BIM alapú tervezés és az LCA integrációja

Az épületek teljes életciklusban vizsgált környezeti hatásainak növekvő jelentősége miatt egyre nagyobb igény van arra, hogy már a tervezés korai szakaszában elvégezzék az életciklus elemzést. Ehhez biztosítani kell a különböző szoftverek közötti hatékony adatátvitelt. Különböző LCA-BIM integrációs stratégiákat ismerünk, melyek a gyakorlati használhatóságra fókuszálnak. Az integráció szintjei a félig manuális módszerektől egészen a BIM szoftverekhez kapcsolódó speciális LCA szoftverekig terjednek, ahol a manuális adatbevitel minimális.

Az életciklus elemzés lépései BIM környezetben:

- *Modellezés:* a BIM modell felépítése az épület geometriájával és a kapcsolódó információkkal;
- *Mennyiségkimutatások:* a BIM modell alapján elkészül az elemek és anyagok listája a megfelelő mennyiségekkel.
- *LCA-profilok létrehozása:* a modellben használt anyagok környezeti hatásainak összegyűjtése LCA adatbázisokból.
- *Összekapcsolás:* az anyagmennyiségeket össze kell kapcsolni a megfelelő LCA-profilokkal.
- *Számítás:* a környezeti hatások kiszámítása az anyagmennyiségekhez rendelt LCA adatok alapján.
- *Vizualizáció és elemzés:* az LCA számítás eredményeinek megjelenítése és elemzése.

A BIM és az LCA több különböző stratégiát követő integrációs módszere is jelen van a piacon [6] [7] [8]:

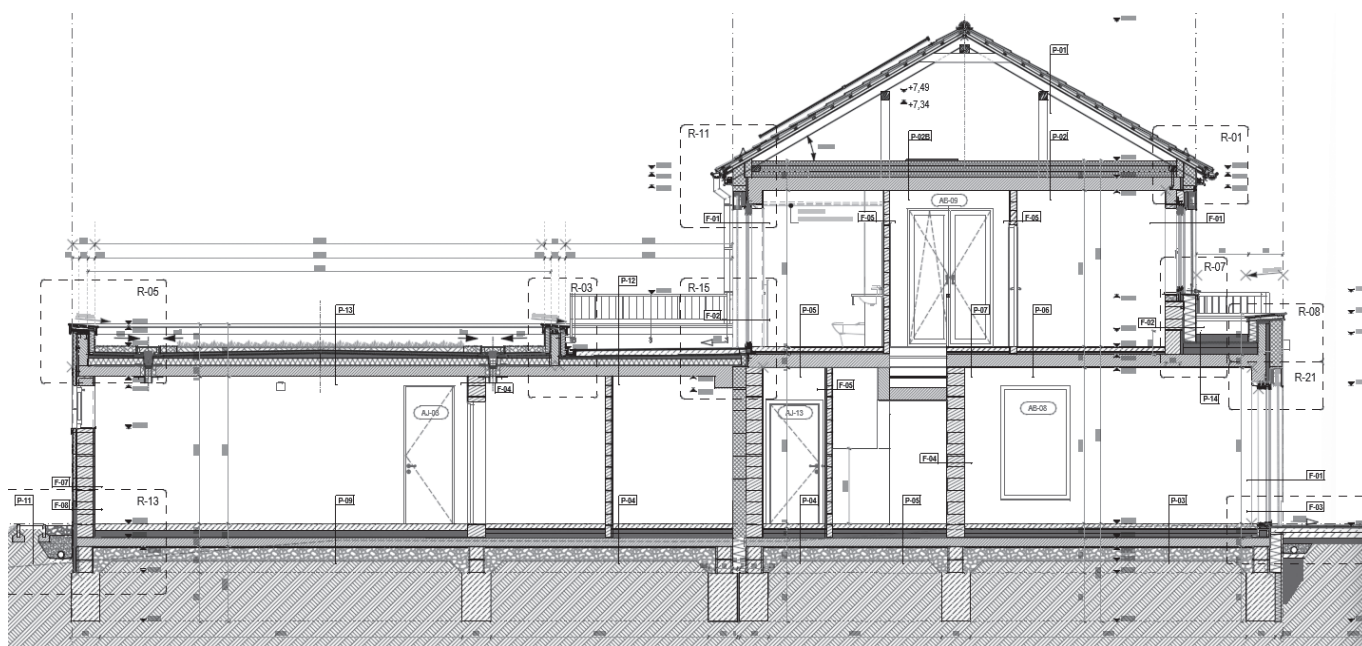
- *Bill of Quantities (BoQ) exportálása:*
Ebben a módszerben az anyagkimutatást a BIM modellből táblázatos formában nyerik ki, majd egy LCA szoftverbe importálják, ahol az LCA számításokat el tudják végezni. Ez egy alapvető integrációs forma, ahol a BIM modell csak a mennyiségi adatokat szolgáltatja, a számításokat pedig egy független szoftver végzi.
- *IFC formátumú modell importálása:*
Ebben a folyamatban a BIM modell geometriáját és anyagmennyiségeit IFC formátumban importálják az LCA szoftverbe. Ez a módszer több adatot visz át a szoftverek között, például a globális egyedi azonosítókat is, így az LCA profilok megőrződnek a modell frissítésekor.
- *BIM viewer alkalmazása:*
Ebben a módszerben a BIM modellt egy BIM viewer programba importálják, amely már tartalmazza az LCA profilokat. Ez a köztes lépés megkönnyíti az LCA profilok hozzárendelését az anyagokhoz, majd a modellt továbbítják a számítások elvégzéséhez.
- *BIM szoftverekhez fejlesztett LCA plugin:*
A BIM modellhez integrált LCA plugin segítségével az LCA számításokat közvetlenül a BIM szoftveren belül végezhetik el. Az adatok kevesebb veszteséggel, gyorsabban és hatékonyabban kezelhetők. Az eredmények 3D-ben is megjeleníthetők, ami közvetlen betekintést nyújt a legfontosabb hatásokba. Például az Archicad programhoz ilyen plugint biztosít a One Click LCA, vagy a Revit programhoz a Tally plugin használható e célra.
- *BIM objektumok LCA profilokkal:*
Ez a módszer az egyik legfejlettebb integrációs forma, amelynél az LCA információk már a BIM objektumok részei. Így a modell építése közben az LCA profilok automatikusan társulnak a geometriai és anyagadatokhoz. Az LCA számításokat vagy a BIM szoftver beépülő moduljával, vagy az adatok exportálása után egy dedikált LCA szoftverrel végzik.

Az LCA és BIM integrációja lehetővé teszi, hogy már az építési projektek korai szakaszában számszerűsítsük a betervezett építési termék környezeti hatásait. A BIM modell használata az engedélyezési terv és a kiviteli terv szakaszaiban különösen előnyös, mivel ekkor már rendelkezésre állnak a jövőbeli épületet jellemző konkrét információk [9]. A vizsgálat lehetőséget ad arra, hogy a tervezés korai fázisában változtatásokat hajtsunk végre, illetve összehasonlíthassunk különböző tervezési alternatívákat a környezeti hatások szempontjából.

Az életciklus elemzés lehetőséget kínál komplexebb vizsgálatokra is, mint például:

- a Life Cycle Cost Assessment, melyben az életciklusra vonatkozó költségek meghatározása a cél;
- a Life Cycle Sustainability Assessment [], melyben a fenntarthatósági szempontok értékelése a cél;
- a Social Life Cycle Assessment, melyben a társadalmi hatások értékelhetők.

A következőkben egy esettanulmányon keresztül mutatjuk be a BIM alapú életciklus vizsgálatot. Egy lakóház esetében fogjuk megnézni, hogy a tartószerkezeti és hőszigetelő anyagok megválasztása milyen környezeti hatásokkal jár.



2. ÁBRA: A tervezett lakóház metszete [11]

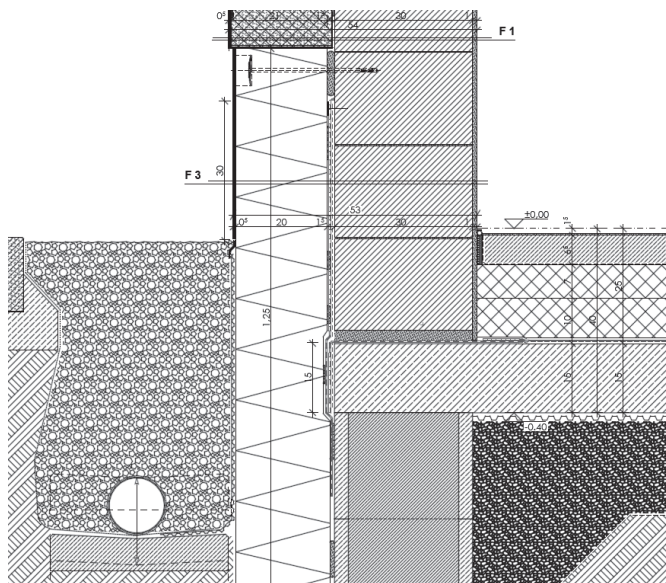
4. | EGY ALACSONY ENERGIAIGÉNYŰ LAKÓÉPÜLET TERVEZÉSE ÉS ELEMZÉSE

4.1. ÉPÜLETSZERKEZETI KONCEPCIÓ

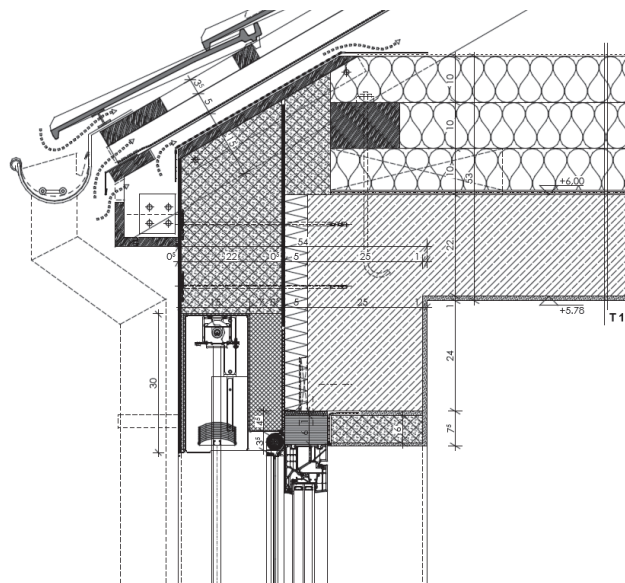
Meglévő lejtős telken új egyalakásos családi lakóház építésének igénye merült fel [11]. A tervezett épület falas rendszerű, magas és lapos tetővel fedett, földszint plusz egyemelet kialakítású, alapincézetlen. Az építészeti koncepcióterv szerint kerámia cserépfedésű magastetővel készül, vakolt

homlokzattal. Az épület két részre osztható: a lakóterre és a garázs, illetve a tárolók számára kialakított épüleategységre. A lakórészrel ellentétben a garázs épüleategysége nem fűtött, csak temperált.

A beruházói igénynek megfelelően egy alacsony energiafelhasználású és környezeti terhelés szempontjából is kedvező hatású épület tervezése volt a cél. Komplex tervezési szemlélet szükséges, mert önmagában az energetikai megfelelés vizsgálata nem elégséges, az anyagok kiválasztásánál is meghatározó szempont az épületbe vitt energiák mennyiségének monitorozása. Az épület tervezése a vonatkozó energetikai előírások figyelembevételével történt, a fűtött teret



3. ÁBRA: Épületszerkezeti részlet: lábazatkialakítás [11]



4. ÁBRA: Épületszerkezeti részlet: ereszkialakítás, nyílászáró beépítés [11]

határoló szerkezetek tervezése során figyelembe vettük a hatályos épületenergetikai előírásokat [12] [13], különös tekintettel a határoló szerkezetek hőátbocsátási tényezőjére vonatkozóakat [2. ábra].

Az épület alapozása a főfalak alatt a teherhordó talajig, illetve a fagyhatárig lemenő sávalap [3. ábra]. A beton zsaluzóelem lábazati falak kitöltőbetonnal és vasalással készülnek, amire vasalt aljzat kerül. A tömörített kőzúzalékon dombornyomott lemez szerelőréteg és 15 cm vasalt aljzat készül, amire talajnedvesség elleni védelem miatt poliészter fátyol hordozórétgű, SBS modifikált bitumenes lemez vízszigetelés készül, kellőstített aljzatra fektetve. A padlóba fokozott teherbírású expandált polisztirolhab hőszigetelés kerül.

A lakóház külső és belső teherhordó falszerkezetére vonatkozóan több lehetőséget is megvizsgáltunk, a hagyományosnak tekinthető szilikát szerkezet és a terjedőben lévő rétegelt ragasztott fa[CLT] építéstechnológia alkalmazása is felmerült. A külső falazatokra hőszigetelő rendszerű vakolat készül. A főépület (lakótér) esetében a falszerkezetre 22 cm hőszigetelés, a lábazati zónában 20 cm lábazati hőszigetelés kerül. A garázs épületegységénahőszigetelés mindenhol, a lábazati zónában is 6 cm-es.

A korszerű, hőszigetelt nyílászárók a külső teherhordó mészhomok blokk téglafal külső síkján, a homlokzati hőszigetelés mögött közvetlenül, hőhidmentes beépítéssel készülnek [4. ábra].

Az átszellőztetett magastetőn kerámia cserépfedés készül, a fedélszék tartószerkezete szelemenés ácsszerkezet. A nyeregtetős padlástér fűtetlen, a szűlő hőszigetelés vonalvezetése a padlástér födém vonalában fut.

Az épülethez egy nem járható terasz, egy járható greslap burkolatú lapostető, és ehhez kapcsolódóan zöldtető tartozik [5. ábra], illetve az emeleti közlekedőről erkély nyílik [6. ábra]. A lapostető egyenes rétegfelépítésű belső vízelvezetésű lapostető, a hőszigetelés 12 cm PIR hab hőszigetelés, a lejtést adó réteg változó vastagságú 2%-os lejtéssel kialakított, expandált polisztirolhab anyagú. A vízszigetelés 1,8 mm

vastag, poliészterszövet erősítésű, FPO lemezből készül, egy rétegben, amire a zöldtető rétegei kerülnek. Járható terasz esetében a burkolat alá vasbeton aljzat kerül, az aljzatbetonon vízszigetelő, feszültségleépítő, elválasztó és repedésát-hidaló lemez készül.

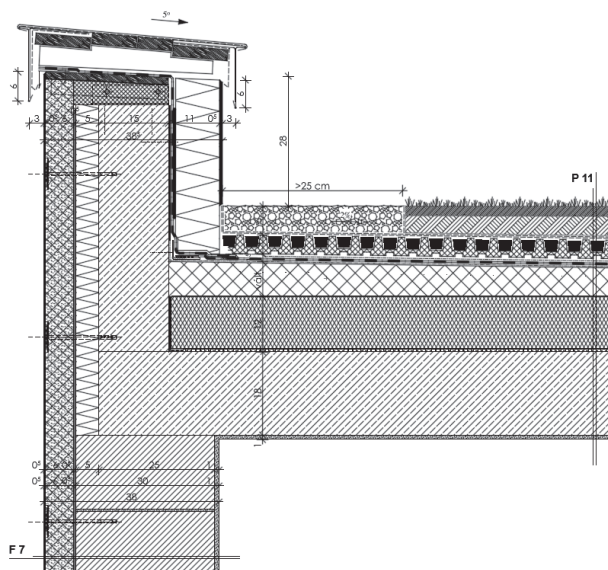
A tervezés során az Archicad szoftver 27-es verziójában építettük fel az épület BIM modelljét. A falszerkezeteket, illetve a padló rétegrendjeit réteges szerkezetként modelleztük, a réteges szerkezeteket külön definiáltuk a „réteges szerkezetek” menüpont alatt, a későbbi építési termék változtatások megkönnyítése érdekében.

4.2. ENERGETIKAI VIZSGÁLAT

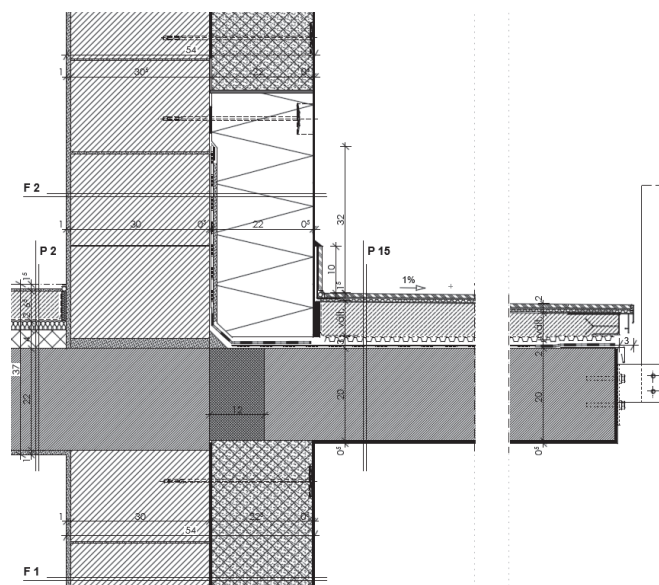
Az épületek energetikai megfelelőségét a 9/2023. (V. 25.) ÉKM rendelet szabályozza [12] [14]. A réteges szerkezetekre vonatkozó hőátbocsátási tényezők követelményeinek betartása kötelező, ezért a tervezés során ennek megfelelően terveztük meg a réteges épülethatároló szerkezeteket és hőszigetelésüket. Az épület fűtési energiaigényének csökkentése érdekében, az energetikai elemzés eredményei alapján a külső falszerkezeteket 22 cm hőszigeteléssel terveztük meg. A fal hőátbocsátási tényezője közel azonos maradtak különböző hőszigetelő anyagok használata esetén is. Az összesített energetikai jellemzőben ezért nem okoz jelentős különbséget az eltérő anyagválasztás. Az épület fűtése a tervek szerint elektromos üzemű levegős hőszivattyúval, felületi hőleadókkal, padló-, fal-, mennyezetfűtéssel készül.

Az épület energetikai méretezése a WinWatt szoftverben készült, a számítás legfontosabb eredményei:

- összesített energetikai jellemző:	62,98 kWh/m ² év,
- ennek követelményértéke:	76,00 kWh/m ² év,
- eszerinti besorolás:	A+ ₂₀₂₃ (82,9%),
- fajlagos szén-dioxid kibocsátás:	13,06 kg/m ² év,
- ennek referenciaértéke:	25,00 kg/m ² év,
- eszerinti besorolás:	A+ ₂₀₂₃ (65,3%).



5. ÁBRA: Épületszerkezeti részlet: lapostető attika kialakítása [11]



6. ÁBRA: Épületszerkezeti részlet: erkély lábazat kialakítása [11]

4.3. ÉLETCIKLUS ELEMZÉS

Az EN15978 szabványnak [2] megfelelően a tervezett épültre vonatkozóan elkészített életciklus elemzés lépései a következőképpen foglalhatóak össze:

Elemzés célja: meghatározni a lehetséges falszerkezeti kialakítások közül a környezeti hatások alapján kedvezőt.

Elemzés tárgya: egy tervezés alatt lévő alacsony energiaigényű lakóház Archicad 27 szoftverrel létrehozott épületmodellje többféle szerkezeti kialakítással.

Szenáriók az épület életciklusaira:

1. Mészhomok teherhordó falszerkezet, monolit vasbeton szerkezetű födémmel, vasbeton sávalappal, falazott szilikát válaszfalakkal, a külső falakon hőszigetelés:

- 1A: expandált polisztirolhab hőszigetelés
- 1B: ásványi hab hőszigetelés
- 1C: ásványgyapot hőszigetelés

2. Teherhordó CLT (Cross Laminated Timber: keresztrétegelt fapanel) fal- és födém szerkezet, vasbeton sávalappal, CLT válaszfalakkal, a külső falakon hőszigetelés:

- 2A: expandált polisztirolhab hőszigetelés
- 2B: ásványi hab hőszigetelés
- 2C: ásványgyapot hőszigetelés

Mennyiségek meghatározása: a mennyiségeket a BoQ (Bill of Quantities) módszer használatával importáltuk a a One Click LCA célszoftverbe.

Környezeti adatok gyűjtése: a szükséges adatokat a program adatbázisából rendeltük hozzá a felhasznált építőanyagokhoz.

Környezeti hatások számszerűsítése: a számításokat a szoftverrel végeztük el, szabványos módszerrel.

Jelentés elkészítése: az elemzőszoftverben készítettük el az eredmények publikálását.

Az életciklus elemzés során leggyakrabban használt mérőszám a globális felmelegedési potenciál (GWP: Global Warming Potential), melyet szén-dioxid egyenérték egységben (CO_2e) fejezünk ki. A GWP hivatalos meghatározása szerint „egy adott anyag egységnyi tömegű kibocsátását követő, egy választott időhorizonton felhalmozott sugárzási erősséget mérő index, a referenciaanyag, a szén-dioxid (CO_2) kibocsátásához viszonyítva”. A GWP így az anyagok légkörben való eltérő tartózkodási idejének és a sugárzási kényszer okozásában való hatékonyságának együttes hatását mutatja [15].

Az életciklus elemzést a One Click LCA segítségével végeztük el, amely egy web-alapú, automatizált program, ami az épületek környezeti hatásainak kiszámítására és optimalizálására használható, az anyagmennyiségeket manuálisan vagy különböző fájlformátumok (Excel, Revit, IFC, gbXML stb.) segítségével lehet importálni a szoftverbe. Az elemzés során a világ legnagyobb EPD adatbázisának adatait használhatjuk, mely szabványos adatokat és gyártóspecifikus információkat egyaránt tartalmaz. Az életciklus elemzést az egyes anyagokhoz társított környezeti adatok pontossága teszi megbízhatóvá. Az adatbázisban nagy mennyiségű EPD található, de ezek részletezettsége, a felhasználási terület definiálása nem minden esetben pontos, a megfelelő EPD-k kiválasztása kutatómunkával történik, a magyar EPD-k korlátozott számban érhetőek el [16]. Mivel az EPD-k az életciklus-elemzés (LCA) során figyelembe veszik az energiaszolgáltatásból származó kibocsátásokat, az adott ország energiamixe közvetlenül meghatározza a termék környezeti terhelését. A vizsgálat so-

rán a felhasznált EPD-k a hazai gyártási és ellátási lánc sajátosságaihoz igazodnak, magyar EPD-kel dolgoztunk.

Jelen vizsgálat során a bemutatott épület különböző szerkezeti kialakítási lehetőségeire koncentrálnunk, a fal- és födém szerkezetek, valamint a homlokzati hőszigetelés anyagához kapcsolódó környezeti hatások vizsgálatát végezzük el. Az üzemeltetés energiaigényét az összehasonlító LCA számításnál annak megközelítő állandósága miatt nem vettük figyelembe.

Eltérő anyagú fal- és födém szerkezetek összehasonlító elemzése

A fal- és födém szerkezetek anyaghasználatát illetően két eltérő építéstechnológiára vonatkozó scenáriót vizsgáltuk:

- az első esetben az épület teherhordó falai 30 cm vastag mészhomok falazattal, válaszfalai 10 cm vastag falazott szilikát szerkezettel, födémei pedig 22 cm vastag monolit vasbeton szerkezettel készültek.
- a második esetben az épület teherhordó falai, válaszfalai és födém szerkezetei is CLT, rétegelt ragasztott fapanelekkel készültek, a teherhordó falak vastagsága 14 cm, a válaszfalak vastagsága 10 cm, a födéme vastagsága 20 cm volt.

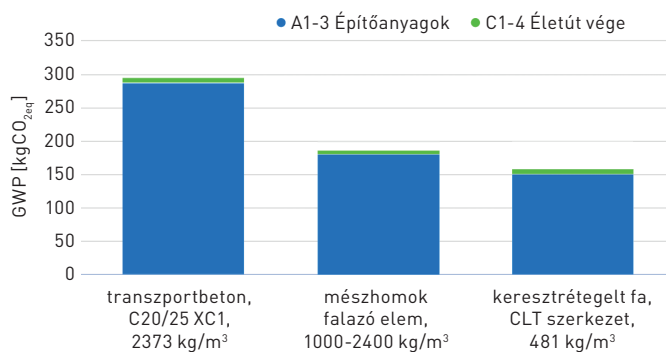
A **7. ábra** és az **1. táblázat** az épület szerkezetépítési munkáihoz használt három legfontosabb anyag globális felmelegedési potenciálját (GWP) mutatja, egységnyi (1 m^3) anyagra vonatkozóan az életciklus A1-A3 és C1-C4 szakaszaiban, vagyis az építőanyagok előállításának és semlegesítésének szakaszaiban. A környezeti határadatok alapján, egységnyi térfogatot tekintve a beton alkalmazása a leginkább előnytelen, a mészhomok téglák alkalmazása kedvezőbb, és a CLT anyag alkalmazása a leginkább előnyös. Utóbbi esetén vegyük azt is figyelembe, hogy a CLT technológia vékonyabb szerkezetekkel, vagyis kevesebb anyagfelhasználással dolgozik. Az anyagok összehasonlításának alapjaként szolgáló funkcionális egység m^3 -ben határozható meg.

Eltérő anyagú homlokzati hőszigetelések összehasonlító elemzése

Az energetikai megfeleléshez igazodva a főépület falszerkezetre 22 cm vastag hőszigetelést, a garázs épületegység falazata 6 cm szigetelést kapott. Az épületen elhelyezett összes homlokzati hőszigetelés 55 m^3 -re adódik.

A vizsgálat során a hőszigetelő anyagok A1-A3 és C1-C4 rendszerhatáron belüli környezeti hatásait hasonlítottuk össze, vagyis az anyag gyártásával és az életút végén történő hulladék kezelésével keletkező környezeti hatásokat. A három hőszigetelő anyag volt: ásványi hab, expandált polisztirolhab, ásványgyapot hőszigetelés.

A **8. ábra** a felhasznált hőszigetelő anyagok együttes globális felmelegedési potenciálját (GWP) mutatja, a **2. táblázatban** pedig a számításokhoz felhasznált fajlagos értékeket láthatjuk. Az A1-A3 szakaszban azonos mennyiségű hőszigetelés előállítása esetén az ásványi hab szigetelő anyag környezeti terhelése a legmagasabb. Az életút végi C1-C4 szakaszt is figyelembe véve a legrosszabb választás az expandált polisztirolhab hőszigetelés lesz, a legjobb választás pedig az ásványgyapot hőszigetelés.



7. ÁBRA: A primer szerkezetek kialakításához alkalmazott anyagok (beton, mészhomok falazat, CLT fapanelek) fajlagos GWP értékei az életciklus A1-A3 és C1-C4 szakaszaiban

1. TÁBLÁZAT: A primer szerkezetek kialakításához alkalmazott anyagok (beton, mészhomok falazat, CLT fapanelek) fajlagos GWP értékei az életciklus A1-A3 és C1-C4 szakaszaiban

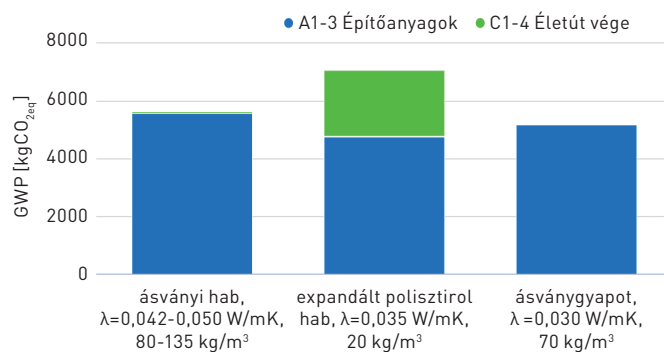
fal- és födém szerkezetek típusai (One Click LCA adatbázis)	globális felmelegedési potenciál, GWP [kgCO _{2eq} /m ³]	
	A1-A3 alapanyag / termék gyártás	C1-C4 bontás, semlegesítés
transzportbeton, C20/25 XC1, 2373 kg/m ³	288,15	7,76
mészhomok falazó elem, 1000-2400 kg/m ³	181,37	5,89
keresztrétegelt fa, CLT szerkezet, 481 kg/m ³	151,02	8,03

A kiválasztott hőszigetelések eltérő alapanyagigényekkel és gyártástechnológiával készülnek:

Az *expandált polisztirolhab* alapanyaga polimerizált sztirolgyöngy, amely pentán hajtógázt és egyéb adalékanyagokat tartalmaz. A gyártási folyamat során az első lépés az előhabosítás, melynek során a gyöngyök térfogata 20-50-szeresére növekszik, zárt cellaszerkezetet kialakítva. Ezt követi a pihentetés, szükség esetén utóhabosítás, majd a tömbhabosítás, ahol a gyöngyöket egy zárt formába töltik, és 110-120 °C közötti hőmérsékletű gőzzel ismételt duzzasztják. A gyöngyök képlékennyé válása és a belső nyomás hatására homogén szerkezetű tömb alakul ki. A kész blokkok pihentetése után izzószálas vágóberendezésekkel méretre vághatóak, vagy egyedi igények szerint formázhatóak.

A *kőzetgyapot* alapanyaga főként bazaltkő, amelyhez gyakran mészkövet vagy dolomitot is adnak. A megolvasztott bazaltot 1200-1500 °C hőmérsékleten centrifugahengerekkel szálalítják, majd a szálakat egyenletes vastagságú, vattaszerű táblákká préselik. Építészeti célra elsősorban műgyanta kötőanyagossal változtatnak, amelyet forró légáram alkalmazásával keményítenek ki.

Az *ásványi hab* hőszigetelő lapok gyártása egy több lépésből álló folyamat, az alapanyagok – homok, cement, mész, víz és pórusképző anyag, pl. alumíniumpor – gondos keverésével biztosítják a könnyű, porózus szerkezet kialakulását. A formázás és előedzés után a lapokat méretre szabják, majd autoklávban magas hőmérsékletű és nyomású gőzkezelésnek vetik alá, amely garantálja a végleges szilárdságot.



8. ÁBRA: A homlokzati hőszigetelések kialakításához alkalmazott anyagok (ásványi hab, EPS hab, ásványgyapot) GWP értékei az életciklus A1-A3 és C1-C4 szakaszaiban, a teljes anyagfelhasználásra vonatkozóan

2. TÁBLÁZAT: A homlokzati hőszigetelések kialakításához alkalmazott anyagok (ásványi hab, EPS hab, ásványgyapot) fajlagos GWP értékei az életciklus A1-A3 és C1-C4 szakaszaiban

hőszigetelő anyagok típusai (One Click LCA adatbázis)	globális felmelegedési potenciál, GWP [kgCO _{2eq} /m ³]	
	A1-A3 alapanyag / termék gyártás	C1-C4 bontás, semlegesítés
ásványi hab, λ=0,042-0,050 W/mK, 80-135 kg/m ³	101,00	0,64
expandált polisztirol hab, λ=0,035 W/mK, 20 kg/m ³	86,18	41,38
ásványgyapot, λ=0,030 W/mK, 70 kg/m ³	93,76	0,39

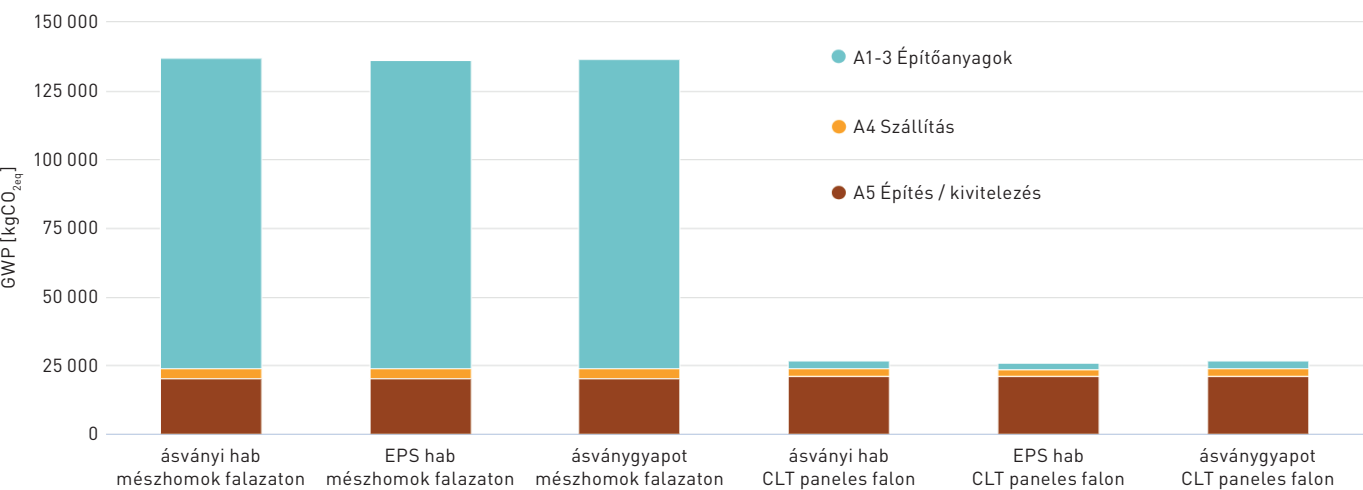
A teljes épület életciklus eredményei

Az eltérő építési módok összehasonlításához két Archicad modell és anyagadatbázis létrehozására volt szükség. Az egyik épület mészhomok téglá falazattal és vasbeton födém szerkezettel, a másik teljes egészében CLT fapaneles szerkezettel készült. Az alapozás, a lapostető szigetelési rendszere és magastető kialakítása, a nyílászárók, a burkolatok minősége egységes mindkét épületverzió esetében.

A kétféle szerkezetépítési és háromféle hőszigetelési megoldás együtt hat különböző épületverziót, vagyis hat életciklus scenáriókat adott. A homlokzati falakra vonatkozó vizsgálatunk eredményeit a **9. ábra** és a **3. táblázat** mutatja. Jól látható, hogy a falszerkezet megválasztása meghatározó a A1-A5 rendszerhatáron belüli vizsgálatkor, vagyis az építőanyag gyártás és az építkezés környezeti hatásainak vizsgálatakor.

Az életciklus elemzésben az épület üzemeltetési életszakaszát nem vettük figyelembe, hiszen az üzemeltetéshez felhasznált energia mindegyik vizsgált esetben közel azonos mértékű lenne, kutatásunk célja nem az épület használatának optimalizációja.

Az A5 szakaszról általános, a One Click LCA szoftver által meghatározott, építési adatot vettük csak figyelembe, mely csak nagyságrendileg mutat helyes értéket a többi szakaszhoz viszonyítva, nem a konkrét építési folyamatok részletes adatain alapszik a feltüntetett érték. A CLT panelek, illetve más fa szerkezetek esetében az A1-A3 szakaszban negatív CO₂ kibocsátásról beszélhetünk, hiszen a szerves anyag felnövekedése során megköti és tárolja a szén-dioxidot életcik-



9. ÁBRA: Homlokzati falszerkezetek variációinak GWP értékei az életciklus A1-A5 szakaszában

3. TÁBLÁZAT: Homlokzati falszerkezetek variációinak GWP értékei az életciklus A1-A5 szakaszában

homlokzati falszerkezet kialakítása		globális felmelegedési potenciál, GWP [kgCO ₂ eq/m ³]		
		A1-A3 alapanyag / termék gyártás	A4 közlekedés, szállítás	A5 építési folyamat
mészhomok falazat	+ ásványi hab	113011,85	3798,72	20267,73
	+ EPS hab	112193,69	3802,31	20100,11
	+ ásványgyapot	112617,44	3793,01	20234,63
CLT paneles falszerkezet	+ ásványi hab	2953,82	2627,84	21107,35
	+ EPS hab	2420,57	2631,44	20951,12
	+ ásványgyapot	3086,50	2622,13	21116,41

lusa végéig. A C3 szakaszban azonban ugyanez a mennyiség fel is szabadul, így a két érték GWP szempontból együttesen nullának tekinthető, emiatt ezt az adatot nem szerepeltettük a kimutatásban.

A hat épületverzió között a globális felmelegedési potenciál tekintetében a lényegi különbség az A1-A3-as szakaszban tapasztalható: A vasbeton, illetve a falazóelemek előállítás okozza a legnagyobb környezeti terhelést, jóval nagyobb, mint a faszervezetek. A hőszigetelés minősége ehhez képest kisebb hatással van az épület teljes GWP értékére. Nagyobb különbségeket ez alapján a tartószerkezeti alapkoncepció meghatározásakor érhetünk el. Megfelelő energetikai kialakítás mellett a hőszigetelés típusának megválasztása is befolyásolja az üvegház hatású gázok kibocsátásának mennyiségét, azonban lényegesen kisebb mértékben, mint egy kedvezőbb tartószerkezeti koncepció kidolgozása.

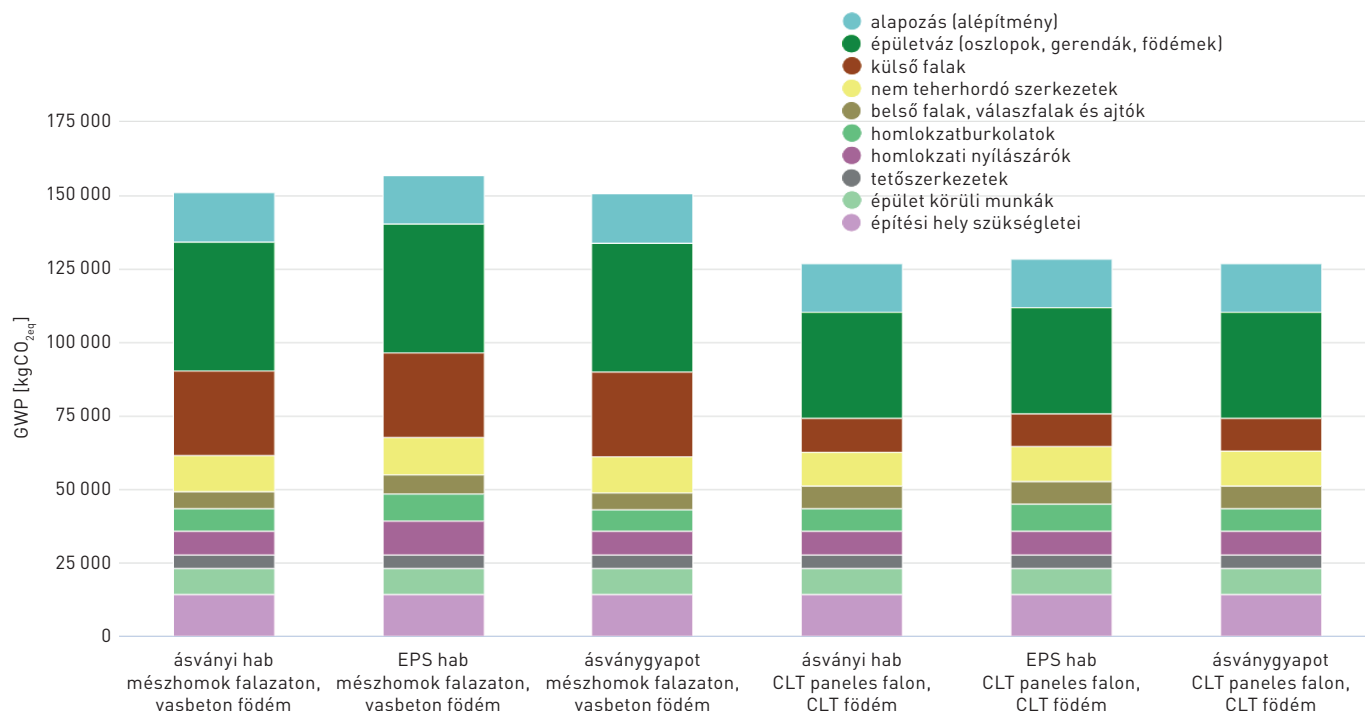
Az egyes épületszerkezetekhez köthető CO₂ eloszlás vizsgálatakor jól látszik (10. ábra), hogy a fő tartószerkezeti rendszer, az alapozás, a függőleges és vízszintes teherhordó szerkezet, a falazat és a födém szerkezetek a legjelentősebb tényezők. A vizsgált nehézszerkezetes megoldás esetén a falszerkezetek a teljes kibocsátás 18-19%-át, a vizsgált CLT szerkezet alkalmazása esetén ugyanez az érték 8-9%.

5. | ÖSSZEGRÉS

A cikkben bemutatott épületterv egy alacsony energiaigényű lakóház terve. Az épület hőtermelője elektromos üzemű levegős hőszivattyú, felületi hőleadókkal. Az épület hatályos szabályozás szerinti energetikai besorolása A+ osztályra adódik. A tervezett lakóépület szerkezeti anyagainak megválasztásakor a szokásos épületszerkezeti és épülete-nergetikai szempontokon túl szerettünk volna megalapozott döntést hozni az anyaghasználat fenntarthatóságát illetően is. Az életciklus elemzés olyan módszertant kínál, mely az építőipari folyamatok környezeti hatásainak számszerűsítésére is alkalmas. A módszer egyszerűen integrálható a BIM alapú épülettervezésbe, melyet az épülettervezés során alkalmaztunk.

Vizsgálatunkhoz Archicad környezetben készítettük BIM modellt, és a One Click LCA célszoftvert használtuk az elemzéshez. Az Archicadban tervezett épület modell alapú feldolgozása lehetővé tette az építési anyagok és termékek mennyiségének pontos kimutatását, a számszerűsített adatok One Click LCA szoftverbe történő exportját. A szoftver tartalmaz egy környezeti adatokra vonatkozó szabványos adatbázist. Az épület anyagkimutatásában szereplő anyagmennyiségek és az anyag típusok környezeti adatainak pontossága együttesen befolyásolják a számítási eredmények megbízhatóságát. Az építési termékek mennyiségének és típusának pontos meghatározása körültekintő munkavégzést kíván.

A vizsgálat eredményei szerint a betervezett anyagok közül az alapozás, a fal- és födém szerkezetek környezeti hatása a legjelentősebb. A betervezett építési termékek alapanyagának környezettudatos megválasztásával csökkenthető az épület CO₂ terhelése. Az alapozási rendszer tekintetében nem kerestünk alternatívákat, mindkét építési mód vizsgálatra alkalmas megoldással készült. A függőleges és vízszintes tartószerkezeti rendszer tekintetében viszont megvizsgáltunk két eltérő építéstechnológiát is, és összehasonlítottuk a mészhomok falazatos, monolit vasbeton födém építést a CLT fa-paneles építéssel. A homlokzati szerkezetek hőszigetelése tekintetében megvizsgáltuk az ásványi hab, az EPS hab és az ásványgyapot anyagú hőszigetelések környezeti hatásait.



10. ÁBRA: Épület alkotó fő épületszerkezetek felelegetedési potenciálja az életciklus A1-A5 szakaszában vizsgálva

Vizsgálatunkban a legkedvezőbb megoldást a CLT fal- és födém szerkezet adta, ásványi hab homlokzati hőszigetelés használata mellett. A hat épületverzió közötti globális felmelegedési potenciál (GWP) szempontjából a legjelentősebb eltérés az A1-A3 szakaszban figyelhető meg, amely elsősorban a vasbeton és a falazóelemek és CLT gyártásából adódik, a hőszigetelés minősége kisebb hatást gyakorol az épület teljes GWP értékére. A számítások alapján a legnagyobb különbségek a tartószerkezeti alapkoncepció meghatározásával érhetők el. Bár a megfelelő energetikai kialakítás mellett a hőszigetelés típusa is befolyásolja az üvegházhatású gázok kibocsátását, annak mértéke elmarad a kedvezőbb tartószerkezeti megoldások alkalmazásából származó hatások mögött. Környezeti szempontból a CLT alacsonyabb szénlábnnyal rendelkezik, mivel gyártása kevesebb üvegházhatású gázt bocsát ki, ráadásul a fa természetes módon megköti a szén-dioxidot, megújuló nyersanyagként fenntarthatóbb alternatívát kínál a betonnal szemben. Építési hatékonyság tekintetében a CLT gyorsabb kivitelezést tesz lehetővé az előregyártott elemek révén, csökkentve a helyszíni munkát és az építési hulladék mennyiségét. Szerkezeti előnyei közé tartozik a kisebb súly, amely mérsékli az alapozás anyagszükségletét.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Sophie Boehm és mtsi: State of Climate Action 2023, BEF – CAT – CA – CWF – NCI – UNCCHLC – WRI. <https://doi.org/10.46830/wriipt.23.00010>
- [2] MSZ EN ISO 15978:2012 Építmények fenntarthatósága. Épületek környezeti védelmi értékelése. Számítási módszer
- [3] ÉMI: 10_2022. ÉPMI (v1_2022. IX. 16.). Építésügyi műszaki irányelv Az életciklus-elemzés lehetséges módszerei és értékelési szempontjai. Építésügyi Minőségellenőrző Innovációs Nonprofit Kft., Szentendre, 2022. [https://www.emi.hu/EMI/web.nsf/Pub/ZLJ8SA/\\$FILE/ELETCIKLUS_iranyelv_0908.pdf](https://www.emi.hu/EMI/web.nsf/Pub/ZLJ8SA/$FILE/ELETCIKLUS_iranyelv_0908.pdf)
- [4] Shpresa Kotaji, Agnes Schuurmans, Suzy Edwards: Life-cycle assessment in building and construction: a state-of-the-art report, 2003. Society of

Environmental Toxicology and Chemistry, 2003. https://cdn.ymaws.com/www.setac.org/resource/resmgr/books/lca_archive/life_cycle_assessment.pdf

- [5] Zagorács Márk, Szabó Beatrix: BIM kézikönyv 1.kötet – Bevezetés az épületinformációs modellezésbe. Lechner tudásközpont, 2018. <https://lechnerkozpont.hu/doc/terbeli-szolgáltatások-attekintes/lechner-tudaskozpont-bim-kezikonyv-1-kotet-1-kiadas.pdf>
- [6] L. Wastiels, R. Decuyper: Identification and comparison of LCA-BIM integration strategies. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 323, Sustainable Built Environment D-A-CH Conference, Graz, 2019.09.11-14. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012101>
- [7] Farshid Shadram, Tim David Johansson, Weizhuo Lu, Jutta Schade, Thomas Olofsson: An integrated BIM-based framework for minimizing embodied energy during building design. Energy and Buildings 128 (2016), 592-604. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.007>
- [8] Ahmad Jade, Raidan Abdulla: Integrating building information modeling and life cycle assessment tools to design sustainable buildings. In: Proceedings of the CIB W78: 29th International Conference, Beirut, 2012.10.17-19. <https://itc.scix.net/pdfs/w78-2012-Paper-24.pdf>
- [9] Nagy Mercédesz Mirella, Szalay Zsuzsa, Nagy Balázs: Környezettudatos épületfelújítás BIM technológiákkal. TDK dolgozat, BME Építőmérnöki Kar, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 2020.
- [10] Carmen Llatas, Bernardette Soust-Verdaguer, Alexander Passer: Implementing Life Cycle Sustainability Assessment during design stages in Building Information Modelling: From systematic literature review to a methodological approach. Building and Environment 182 (2020), 107164. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107164>
- [11] Szecskő Heléna: Családi lakóház kiviteli terve, pallérterv és épületszerkezeti munkarész, 2024.
- [12] 9/2023. (V. 25.) ÉKM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról. <https://njt.hu/jogszabaly/2023-9-20-8X>
- [13] 176/2008. (VI. 30.) Korm. rendelet az épületek energetikai jellemzőinek tanúsításáról. <https://njt.hu/jogszabaly/2008-176-20-22>
- [14] Csoknyai Tamás, Szalay Zsuzsa, Nagy Balázs, Horváth Miklós és mtsi: Alkalmazott épületenergetika, ITM – MMK – BPMMK, 2024. <https://www.e-gepesz.hu/letoltes/alkalmazott-epuletenergetika-isbn.pdf>
- [15] [1]: Globális felmelegedési potenciál. Wikipédia szócikk, https://hu.wikipedia.org/wiki/Globális_felmelegedési_potenciál
- [16] Panu Pasanen, Anastasia Sipari, Erica Terranova, Rodrigo Castro, Tytti Bruce-Hyrkäs, Anna Katasonova: The embodied carbon review. Embodied carbon reduction in 100+ regulations & rating systems. One Click LCA Ltd, 2018. <https://oneclicklca.com/resources/ebooks/the-embodied-carbon-review>
- [17] Bozsaky Dávid: Építési hőszigetelő anyagok. TERC, Budapest, 2017.