

# EGY LÉPÉS A SZÁMÍTÓGÉPPAL SEGÍTETT ÉPÜLETSZERKEZETI TERVEZÉS FELÉ

*Az épületszerkezeti tervezés folyamatának objektivizálása és algoritmizálása ma még számos nehézségbe ütközik, pedig ez lenne talán a legfontosabb feladat annak érdekében, hogy a számítógéppel segített épületszerkezeti tervezés a jövőben hasonlóan markáns helyet foglaljon el a gyakorlatban, mint a mérnöki tevékenység más területein. Sürgető szükség van az épületszerkezeti tervezés során alkalmazott adatok, ismeretek, szokásos eljárások és figyelembe veendő sajátos körülmények összegzésére és rendszerezésére. A cikk nem oldja meg a tervezés problémáját, nem hoz létre ilyen algoritmust, csak felsorolja az ehhez szükséges előkészítő feladatokat, nehézségeket, de ezen keresztül betekintést kapunk, hogyan is történik valójában az épületszerkezeti tervezés.*

## 1. Bevezetés

Annak érdekében, hogy a számítógéppel segített épületszerkezeti tervezés a jövőben hasonlóan markáns helyet foglaljon el a gyakorlatban, mint a mérnöki tevékenység más területein, sürgető szükség van az épületszerkezeti tervezés során alkalmazott adatok, ismeretek, szokásos eljárások és figyelembe veendő sajátos körülmények összegzésére és rendszerezésére.

Az épületszerkezeti tervezés számos nehézséggel küzd. Az építőanyagok gyors fejlődése és szinte átláthatatlanul széles spektruma hatalmas kihívás elé állítja a tervezőket. Az építészeti és ezen belül az épületszerkezeti tervezésre vonatkozó jogszabályi környezet egyszerre túl- és alulszabályozott. Eközben a követelmények szigorodása és finomodása, a tervezési folyamat felgyorsulása és differenciálódása, valamint az esetleges tervezési hibából származó anyagi felelősség mértéke minden eddiginél aktuálisabbá teszi olyan lépések megtételét, amelyek hamar elvezetnek a minél inkább algoritmizált, gyors, objektív és hibamentes döntésekhez hozzásegítő

tervezési eszközök kifejlesztéséhez. A különböző numerikus eszközök, szimulációs szoftverek már ma is sok területen rendelkezésre állnak, elsősorban az épületszerkezetek épületfizikai működése és tartószerkezeti méretezése terén. Kínálkozó lehetőség a mesterséges intelligencia különböző formáinak (szakértői rendszerek, döntéstámogató eszközök, neurális háló, fuzzy rendszerek) bevonása az épületszerkezeti tervezésbe. Azonban – ahogy az alábbiakban kirajzolódik – az épületszerkezeti tervezés folyamatának objektivizálása és algoritmizálása számos nehézségbe ütközik.

A mérnöki tervezési tevékenység számítógépes eszközökkel történő segítségével a technológiailag fejlett országokban számos kutatás foglalkozik. Gauffre és Miramond már a '80-as évektől kezdve épülettervezési feladatokban alkalmazható számítógépes szakértői rendszer fejlesztésén munkálkodott [1]. Lu et al. egy széles körű összefoglalót adott közre a mérnöki gyakorlatban alkalmazható mesterséges intelligencia eszközök különböző csoportjaira és alcsoportjaira [2]. M.F. Rooney-t a teljesen automatizált tervezés algoritmusán kívül a személyes tapasztalatok rendszerbe történő applikációja foglalkoztatta [3]. Poyet és Delcambre a lapostető vizsgizetelésének problémáihoz fejlesztett szakértői rendszert [4]. Hyunmin Ch. et al. a természetes nyelven megfogalmazott problémaleírások CAD-rendszerbe történő implementálásának lehetőségét kutatta [5]. Más publikációjuk szintén a természetes szövegből kivonható szerkezeti tudás szemantikai problémájára fókuszál [6], melynek nagy jelentősége valószínűsíthető a számítógéppel segített épületszerkezeti tervezés kapcsán is. J.D. Sylvestre et al. a gipszkarton falak károsodásainak szakértői rendszerrel segített feldolgozására tett javaslatot [7]. Szintén épülethibák szakértőrendszer-alapú diagnosizálásával foglalkozik K.S. Mathur [8]. A.M. Redmond

egy teljes beruházási folyamaton keresztül szemléli az épületleíró standardokat (.ifc), a BIM-megközelítést, a tervezési eseményeket (szimulációk, jogszabályok), az épületfenntartás majd bontás lépéseit [9]. Kuo et al. a hidak dilatációs megoldásainál alkalmazható fuzzy rendszert írja le [10]. S. Das et al. összekapcsolja az építészeti tervezés térbeli és szerkezeti optimalizálásának problémáját [11]. M.R. Asl et al. a BIM-bázisú parametrikus épületenergetikai tervezés több szempontú optimalizálására ad példát [12].

Az épületszerkezeti tervezés algoritmizálásával foglalkozó hazai kutatás alapjait Petró Bálint tette le [13], gondolatmenetét hasonló témával folytatta Fülöp Zsuzsanna [14]. Kapovits Géza egy, a kutatáson kívül álló felhasználók számára is elérhető, működőképességű, internetalapú tervezői segédeszközt fejlesztett [15]. Később ennek a különleges, egyedi épületekre történő alkalmazásának lehetőségét kutatta [16]. Molnárka Gergely a fuzzy rendszerek lakóépületek felújítása terén történő alkalmazásáról készített értekezést [17].

A kutatás fő kérdése tehát: algoritmizálható-e az épületszerkezeti tervezés, milyen mértékben, és mi mindenre van ehhez szükség? A cikk tehát az épület-szerkezettan egyfajta leltárja, katalógusa, a tervezés során érintett adatok, eljárások és összefüggések listája. Bár korábbi publikációk már foglalkoztak ilyesmivel, mégsem ismert teljes körű áttekintés a témában. A cikk nem oldja meg a tervezés problémáját, nem hoz létre ilyen algoritmust, csak felsorolja az ehhez szükséges előkészítő feladatokat, nehézségeket, de ezen keresztül betekintést kapunk, hogyan is történik valójában az épületszerkezeti tervezés.

Képzelnék el, hogy valakinek sikerülne egy olyan gépet készíteni, amely képes épületszerkezeti tervek automatizált elkészítésére, a tervező helyettesítésére. Nem kell különösebben bizonygatni ennek előnyeit: a tervezési idő rövidülése, kevesebb hibalehetőség, megalapozottabb döntések, a drága emberi munkaerő csökkentése stb. Természetesen ez fikció, ilyen gép nem létezik, de gondolat-kísérletként alkalmas annak feltárására, hogy lehetséges-e egyáltalán az épület-szerkezettan algoritmizálása. Előre látható, hogy az algoritmus nem lenne egyszerű. A tervezési folyamat nem lineáris, markáns elágazások, ugrások, kereszthatások vannak benne. Sok tényező és szempont nem kölcsönösen egyértelmű. Ugyanakkor biztos, hogy vannak olyan lépések, melyek viszonylag jelentéktelen egyszerűsítések árán már most is algoritmizálhatók lennének, és vannak, melyek semmiképp sem. Ehhez azt kell megvizsgálni, vannak-e a tervezés során olyan események, amelyek mindig ugyanúgy történnek, vagy a tervezés mindig egyedi. Melyek a tervezőtől és a konkrét tervtől elvonatkoztatható szabály-

szerűségek, tanulságok. Mi az egyes munkáknál az egyedi és a rutinszerű események aránya. A továbbiakban folytatva a gondolat-kísérletet számba vesszük az elképzelt gép működéséhez szükséges adatokat, a program által megoldandó problémákat.

## 2. Kiinduló megállapítások

- Szükséges egy digitális épületszerkezeti leírónyelv, mely képes kódolni minden olyan információt, amelyet a tervezés használ, alkalmaz vagy eredményez. A leírónyelvnek szabványosnak, kölcsönösen egyértelműnek kell lennie, és alkalmasnak kell lenni olyan megoldások leírására is, amelyek még nem léteznek.

- Egy terv nem azonos az általa létrehozott épületszerkezettel, utóbbi a megvalósítás során, egyedileg alakul ki, esetlegességeket is tartalmaz. A terv a valóság ideálizált virtuális mása, mely lényeges elhanyagolásokkal él a geometria, az anyagtulajdonságok, a létrehozás körülményei és a használati állapotok tekintetében. Nem a terv megfelelése a cél, hanem a valóság szerkezete, hogy megy tönkre, mennyibe kerül, milyen az üzemeltetés költsége, hogyan néz ki, hogyan működik. Ezért a terv és a valóság közötti különbséget a programnak figyelembe kell vennie.

- Az épületszerkezet nem dísz tárgy, amely elkészülte után nem változik, hanem a környezetével közösen alkotott rendszer, amely reagál és visszahat a környezetére. A terv a jövőben már nem modell lesz, hanem egy nagyobb rendszernek egyetlen eleme, míg a többi elem a valóság környezet, annak minden változásával és kiszámíthatatlanságával együtt.

- Az épületszerkezet kettős céllal jön létre: egyrészt a tágran értelmezett funkció kielégítése, mely alatt az építészeti szándékok megvalósítását is értjük, másrészt az, hogy a környezeti hatásokat és igénybevételeket megfelelő ideig, érdemi károsodás nélkül kibírja.

- A tervezés során ismerni, összeállítani, biztosítani szükséges:

- a tervezés összes bemenő adatát (építőanyagok, környezeti adottságok stb.),
- működési folyamatok, fizikai törvények, példák, analógiák, esettanulmányok táráát,
- a szerkezetet érő hatásokat, igénybevételeket,
- a tervezendő épület geometriáját, a lehető legpontosabb digitális modelljét.

- A tervezés során használni, alkalmazni kell:

- az épület egyes részei, komponensei közötti viszonyokat, belső összefüggéseket,
- a tervezési célokat, igényeket, követelményeket, prioritásokat,
- a szokásosan alkalmazott szabályokat, módszereket, döntési mechanizmusokat,

- a tervezés során együttműködő felek közötti interakciókat, beavatkozásokat.
- A tervezés legfontosabb jellegzetessége az, hogy minden építészeti alkotással új, az összes előzményektől és előképtől különböző épület jön létre. Ezért a már korábban bevált megoldások sohasem alkalmazhatók rutinszerűen, a megismert összefüggések minden alkalommal ellenőrzésre szorulnak. A tapasztalat szerint minden tervezési feladatnál sor kerül valamilyen új megoldás kifejlesztésére, vagy legalább a meglévők innovatív adaptációjára. A tervezés tehát mindig új feladatot jelent, ahol a végső kialakítás nem előre megjósolható, éppen ez a tervezés sajátos nehézsége, az algoritmizálhatóság legfőbb akadálya.

### 3. Az építőanyag-adatbázis

Az épületszerkezeti tervezéshez szükséges termék- vagy készletheadatbázis sajátosságai még markánsabbá válnak, ha újszerű feladatokat kell megoldani, ahol a végeredmény előre nem ismert.

- Sokkal több, többféle és differenciáltabb adatra van szükség, mint az általános gyakorlatban.
- A konkrét feladattól függ, hogy mely tulajdonságok ismerete szükséges.
- Egy anyagnak más-más tulajdonsága lehet releváns különböző feladatokhoz.
- Olyan tulajdonságok is érdekessé válnak, amelyek nem kellően vizsgáltak.
- Az adatok csak a vizsgálati peremfeltételekkel együtt igazak, annak ismeretében használhatók.
- Újszerű feladatok esetén szokatlan, még nem vizsgált peremfeltételek fordulhatnak elő.
- A tulajdonság-adatbázist a mérési feltételek szempontjából parametrikussá kell alakítani.
- Az építőtíparra jellemző peremfeltételek korlátos volta ellenére végtelen paraméterkombináció tartozhat egy tulajdonsághoz.
- Az adatbázisnak bővíthetőnek kell lennie, nemcsak új anyagokat, hanem az egyes tulajdonságok mérési paramétereinek szélesítését, aktualizálását is beleértve.

Példák:

- Az ablakok szoláris nyeresége által a belső padlót érő napsugárzás elnyeléséből származó felmelegedés hatása a belső komfortra az üveg különböző hullámhosszakon való transzmissziós tulajdonságaival függ össze, ez egy összetett, de jól dokumentált tulajdonság.
- A hőszigetelő anyagok hővezetési tényezője függ azok beépítési módjától, erről vannak részleges adatok, irányszámok, de az adatszolgáltatás nem teljes körű.
- Egy vakolt felület öntisztuló képessége az építész ál-

tal megálmodott vakolatstruktúra érdességével is összefügg, ez kevéssé vizsgált, nyitott kérdés.

- A tulajdonságok egy része jól definiált, más része pillanatnyilag csak szubjektív leírásokkal kezelhető (pl. felület érdessége), ezeket számszerűsíthetővé kell tenni.
- Az épületszerkezeti döntésekben a költség jelentős tényező, az adatbázisnak ezt is tartalmaznia kell.
- A piaci viszonyok az anyagárakat módosítják, a költségadatbázis nem statikus, azt időben változó módon kell megadni.
- Régióspecifikus adottságokkal is számolni kell (hol mi kapható, mennyit kell várni). A szállítási távolság költségnövelő hatásával is számolni kell.
- A munkadíjak további tényezőktől is függenek (pl. munkaerőpiaci viszonyok, vagy nagy volumenű beruházások következtében keletkező szakemberhiány).
- További nehezen kiszámítható tényezők is hatnak a döntésekre (pl. ÁFA-visszaigénylés lehetősége).
- Interaktív rendszerre van szükség, amely az új építészeti trendekhez szükséges egyedi, innovatív szerkezeti megoldásokhoz szükséges új adatok beszerzése érdekében párbeszédet nyit a felhasználóval, releváns kérdéseket tesz föl, amelyre adott válaszokkal az adatbázis bővíthető.
- Nemcsak az építőanyagoknak, hanem a belőlük készült alrendszereknek is vannak az egyes komponensek tulajdonságain túlmutató jellemzőik. Ez az adatbázis egy teljesen új dimenzióját nyitja meg, hiszen ezek nem nyerhetők ki egyszerűen gyártói teljesítménynyilatkozatokból.

### 4. Működési folyamatok

Az épületszerkezetek nem magukra hagyott tárgyak, hanem a környezetükkel kölcsönhatásban lévő rendszerek, melyekben a körülmények változásának hatására sokféle, időben változó történések zajlanak le. A tervezés egyik legfontosabb lépése a működési folyamatok megértése és a meglévő tudás adaptálása az új tervezési feladatokra. Újszerű feladatok megoldása érdekében különösen ismerni kell a „megszokott” megoldások működését:

- Meg kell különböztetni egymástól a szerkezeten keresztül és a szerkezet síkjában létrejövő folyamatokat. A különböző folyamatok egyidejűleg is történhetnek. Példák:
- A homlokzati fal síkjára merőlegesen nemcsak hőáram, hanem páradiffúziós folyamatok, a csapóesőből származó nedvesség beszívódása, nedvességvezetés is létrejön.
- A pikkelyes tetőfedés alá jutó nedvesség az alátét-szigetelés felületén, tehát a szerkezet síkjával párhuzamosan áramlik az eresz felé.

· A működési folyamatok hatással vannak a tulajdonosságokra, következésképpen ideiglenesen vagy véglegesen megváltozhat a szerkezet valamely fontos teljesítménye. Példák:

- A hőszigetelésbe jutott nedvesség megváltoztatja annak hővezetési tényezőjét.
- A többrétegű, átszellőztetett burkolatú homlokzati fal hőátbocsátási tényezője a légrétegben létrejövő függőleges légáram erősségétől is függ.
- A működési folyamatok egymással is összefüggnek, kölcsönhatásban vannak, a valóságban egymástól nem szeparálhatók. Ez meglepően távoli komponensek között is létrejöhet. Ezért ki kell alakítani a folyamatok közötti keresztihatkozások lehetőségét.
  - A homlokzati kifagyás létrejötte a csapóeső okozta átnedvesedésen kívül a külső alacsony hőmérséklet időtartamától is függ.
- A működési folyamatok az épület különböző szintjein (épületszint, alrendszer szint, rétegrend, részlet- vagy anyagszint) lehetnek relevánsak, a rendszernek kezelnie kell ezt a többszintűséget. A különböző rendszerszintek között is van átjárás, összefüggés:
  - egy rétegrend U-értéke az épület egészének energiamelegét befolyásolja.
  - egy menekülési útvonalon elhelyezett burkolat miatt lehetséges, hogy az egész épület egésze csak egy alacsonyabb tűzvédelmi osztály követelményeit fogja kielégíteni.

## 5. Fizikai törvények, a működési folyamatok modellezése

- Ismerni kell a fizikai törvényeket, amelyek az előző pontban leírt működési folyamatokat irányítják, hogy azok lefolyása és mértéke modellezhetővé váljon.
- Nagyszámú szimuláció futtatása szükséges, hogy az egyes megoldási alternatívák teljesítménye összevethetővé váljon, ezáltal kiválasztódjon az optimálisnak tekintett végleges megoldás.
- A szimulációk során alkalmazott modellnek a valóságnak csak az adott szituációban érdekes és a relevánsnak tekintett fizikai törvényekkel összefüggő részleteket szabad tartalmaznia, hiszen ellenkező esetben a túl sok paraméter és az egyedi, még nem kutatott mechanizmusok nagyon lelassítanák, akár ellehetetlenítenék a szimuláció lefuttatását.
- Intelligens beavatkozást igényel a megfelelő modell kiválasztása, amelybe az adott helyzethez illeszkedő fizikai törvények kiválasztása is beleértendő, akár az adott részletre vonatkozó többféle szimuláció esetében többféle modell is szükséges lehet.

## 6. Példák, analógiák, esettanulmányok, a már létező megoldások tudásbázisa

- A tervezői gyakorlatban új feladatok esetén mindig érdemes először analóg helyzetekkel, ismert megoldásokkal próbálkozni. A tervezők ezt részint saját tapasztalataikra, másrészt szakkönyvekre, szakcikkekre alapozva meg is teszik. Jelenleg hiányzik egy olyan összefüggő, teljes körű, nyilvánosan elérhető tudásbázis, amely az elképzelt programba bevihető lenne. Ezért először össze kellene állítani a meglévő, ismert jó megoldások gyűjteményét, készletét.
  - Típusmegoldások és ökölszabályok alkotják a tudásbázis gerincét. A meglévő sokféle megoldásból a mesterséges intelligencia segítségével kiemelhetők általános tanulságok, megalkothatók „alapértelmezett” megoldások, „ökölszabályok”.
    - Ugyanez adja az épületszerkezet-tan oktatásának nehezségét is: noha nincs minden esetre igaz, általános megoldás, de mégis, amennyire csak lehet, meg kell alkotni a sok egyedi megoldás „átlagát”, vagy legalább fő típusait. Lehet, hogy ezek abban a formában sehol sem tekinthetők igaznak, sehol sem alkalmazhatók változtatás, adaptálás nélkül, mégis ez az az út, amelyen keresztül az épületszerkezeti tervezés leggyorsabban elsajátítható.
    - Az általánosítható tapasztalatok során szükséges a kísérő paraméterek, peremfeltételek megadása, ennek hiányában olyan „átlagos” megoldások születnek, melyek távol állnak bármelyik tényleges alkalmazástól, tehát nem alkalmasak semmire. Ebből az a nehezen megválaszolható kérdés következik, hogy a paraméterek variációs száma alapján hányféle alaptípust célszerű megalkotni, más szavakkal: melyek a lényegesen különböző típus-megoldások, és melyek csak alvariánsok.
      - Az emberi épületszerkezeti tervezésre is erősen jellemző egyfajta öntanuló mechanizmus, amely a már megszerzett tapasztalatokat mindig „rápróbálja” az adott feladatra. Mód lenne ennek az öntanuló folyamatnak elektronikus megvalósítására is. A szükséges „tanulási készletet” nem annyira megvalósult tervekből, hanem inkább szakértői jelentésekből, tanulmányokból kellene összeállítani, hiszen ott az egyes meghibásodási jelenségek meg is vannak magyarázva, ezáltal a meghibásodást okozó folyamat magyarázata is le van írva.
        - A terv és a megvalósult szerkezet is csak egy adott időpillanatban, néhány ember által megfelelőnek ítélt „egyedi mintának” tekinthető, mert a megvalósulás ténye még nem igazolja, hogy a tervek valóban jó megoldásokat tartalmaztak.
        - Egy algoritmus csak az öntanuló folyamat során magas pontszámmal rangsorolt „mintákat” rögzíteni, felismerni, és alkalmazni, míg a valós humán tervezés igyek-

szik meg is érteni a jelenséget. Ehhez egy általánosabb, a valóságtól részben elvonatkozatható, absztrakt, virtuális koncepciót hoz létre az adott dologról, amelyhez a „tanulásokot” társítja. Az algoritmus ezt az „üres időben” folyamatosan végzett belső tesztekkel, az ok-okozati összefüggések, korrelációk folyamatos intenzív keresésével, próbálgatásával tudja részlegesen helyettesíteni.

· A „hogyan ment tönkre” típusú kérdések megválaszolásával lehet leginkább közel jutni egy adott feladatra és élettartamra optimalizált megoldás kiválasztásához. A tönkremeneteli okok elkerülése, mint stratégia, csak akkor segíti az algoritmust, ha feltételezzük, hogy a gép rendelkezésére bocsátott anyagok és dokumentumok igazak, azokat nem torzították el bizonyos érdekek, a szakértők valóban jó szakemberek voltak, meglátásaik többségükben helyesek stb.

· Az emberi tevékenység „lenyomatát” adó példákban létrejött tanulási készletek mellett szükség van minél nagyobb számú valós mérési adatra, mely sokféle épület különböző részeinek monitorozásával készül, annak érdekében, hogy a tényleges folyamatok ne csak az esetenként szubjektív, ember által, spekulatív módon megnevezett tönkremeneteli okokkal legyenek összekapcsolva, hanem nagy mennyiségű mért adat is rendelkezésre álljon ezen állítások validálására.

## 7. Hatások és igénybevételek

A szerkezet működése és élettartama szempontjából döntő működési folyamatok a szerkezetre ható hatások következtében jönnek létre.

· A szerkezetben lejátszódó folyamatokat és tönkremeneteli módokat okozó külső hatások fontos részei a program adatbázisának. Ezek részben fizetős adatbázisokból, részben a szimulációs programokba beépített adatkészleten generált random scénáriókból nyerhetők ki, de adott feladatnál helyszíni mérésekkel is ki kell egészíteni (ezt nevezzük „helyspecifikus” vagy régióspecifikus tervezésnek).

· A külső hatások többségükben függetlenek a tervezőtől, a tervezési feladattól, a tervezett megoldástól, kivéve néhány olyan esetet, amelyeket éppen az épület tömegformálása, vagy anyaghasználata okoz (pl.: két különálló épülettömeg között kialakuló szélcsatorna vagy egy ferde-visszahajló homlokzathoz tapadó esővíz jelensége).

· A hatásoknak parametrizálhatónak kell lenniük. Az adatbázisnak mindenképpen tartalmaznia kell az időfaktort, különös tekintettel a ciklikus (heti, napi, pár órák, évszakos) és alteráló hatások figyelembevételére, a halmozódásra. A programnak az időben változó hatásokat dinamikus módon kell adaptálnia a szerkezetekre.

· Nemcsak a külső, hanem a belső hatásokra is fel kell készülni: akár rendszeres (pl. takarítás okozta elárasztás, vagy forgalom okozta koptató hatások), akár a havária eseteire (nyitva hagyott csap, eldugult eresz vagy vízcsőtörés okozta alapalamosás).

· A hatások nem azonosak a szerkezet igénybevételeivel. A hatásokból számított igénybevételek igen sokféle lehetnek (kémiai, fizikai) és nem könnyen számszerűsíthetők. Ugyanazon hatások más szerkezeten, más anyagon eltérő igénybevételt is okozhatnak.

- Például az intenzív nyári napsugárzásból származó felmelegedést a nyári zivatar okozta sokszerű lehűlés követi, de ennek lefolyása és következményei nehezen számszerűsíthetők.

- A többretegű szendvicspanel külső és belső vértézésének eltérő hőmozgása párna-hatásnak vagy károsodásnak nevezett jelenséget eredményez, mely a panelek egymáshoz való kapcsolatánál nehézséget okoz, de ennek lefolyása és mértéke nehezen számszerűsíthető.

· A komplex rendszerek egyes komponensein ugyanaz a hatás eltérő igénybevételt jelenthet, így a rendszer összteljesítményét a gyenge láncszem elvén lehet csak megállapítani.

- Például a talajvízbe merülő vízzáró vasbeton pinceszint megfelelősége a betonminőségen és a repedéstágasságra vonatkozó szabályokon kívül – a tapasztalatok szerint – főképp a munkahézagok kialakításán, tömítésén, vagyis előre megtervezett voltán és a részlet kivitelezésének gondosságán fog múlni.

· A hatás és az okozott igénybevétel térben és időben szétválhat, egy hatás nem feltétlenül ott okoz változást, ahol támad, hanem akár jóval odébb és később.

- Például a felsőbb szinteken alkalmazott fémburkolatokról az alsóbb szintekre lecsorgó esővíz okozta kontakt korrózió jelensége.

· A beépített termék egyszerre több alrendszernek is része, többféle feladatot lát el. Ugyanazon a komponensen más rendszer részeként más igénybevétel lehet releváns. Tehát a sokféle termék, a sokféle hatás, a rendszerek többszintűsége, alrendszereink összetettsége, a végtelen számú geometriai kombináció mellett a hatások és igénybevételek közötti ez a nem kölcsönösen egyértelmű összefüggés adja az algoritmus fejlesztésének egyik fő nehézségét.

## 8. Igények és követelmények, a prioritások

Az elvárások köre és fontossági sorrendje nem állandó, nemcsak projektről projektre, hanem egy projekt időbeli lefutása során is változnak. Ez az építészeti alkotás egységéből és a műszaki kérdéseken túlmutató jellegéből

következik. Ez talán a legfontosabb nehézség az épületszerkezeti tervezés algoritmizálhatósága terén. A humán tervezési gyakorlat a műszaki problémákon túl az elvárások pontosításán és a közöttük felismert ellentmondások feloldásán is folyamatosan dolgozik.

· Feloldandók a műszaki és az esztétikai szempontok közötti ellentmondások:

- Például általában érték, ha egy homlokzat jól megtervezett öntisztulása következtében nincsenek csurgásnyomok, más esetben az építésnek kifejezetten tetszik, amikor egy látszóbetonon végigfolyó esővíz nyomot hagy. Ha ez nem okoz további károkat, élettartam-csökkenést, akkor ez megengedhető.
- Fémlemez burkolat rozsdásodását általában hibának tekintjük, de néha gyárilag előrozsdásított anyagot használunk, mely nem csökkenti annak élettartamát.
- A homlokzatburkolatként alkalmazott faanyagot általában igyekszünk megvédeni az időjárás hatásaitól, de előfordul, hogy a faburkolat természetes öregedésével járó természetes feketedés kívánatos az építés számára, az építészeti hatás része. Ebben az esetben az élettartam csökkenését más módon kell ellensúlyozni, például a burkolat rögzítése lehetővé teszi a burkolat könnyű, gyors cseréjét.

· Döntéseket kell hozni a műszaki követelmények kielégítése és az elvárt élettartam között:

- A műszaki követelmények kielégítése mindig egy konkrét élettartamra értelmezhető. A „szokásosan elvárható” élettartamra tervezéshez képest rövidebb idejű, gyors megtérülésre optimalizált beruházások esetén gyakran a „szokásos” megoldásoknál olcsóbb, kifejezetten csak a rövidebb élettartamot garantáló megoldás az elvárás.
- Nem mindig jó vagy mindig rossz egy megoldás, az igények mindig egy célhoz kötődnek:
  - Például a vastag hőszigetelés csökkenti a fűtési költséget, de nyáron gátolhatja a fölös hőmennyiség el távozását a belső terekből.
  - A követelmények időbeli változása teljesen más megoldásokat hozhat előtérbe:
    - Az állékonyágon kívül szinte nincs egyetlen örökérvényű követelmény sem. Jó példa a hőtechnikai követelmények folyamatossá vált változtatgatása, szigorodása, mely már nem is követhető a hőszigetelés vastagításával, hanem más megoldásokat is be kell vonni az eszköztárba (megújuló források).
    - Néha igen nehéz az elvárások egzakt megfogalmazása és az esztétikai elvárások digitalizálása:
      - Az épületszerkezetek az építészeti szándék, a mondanivaló átadásának elsődleges eszközei. Mégis az építészeti megjelenéssel kapcsolatos elvárásokat néha nehéz egzakt módon megfogalmazni. Jelenleg hi-

ányzik egy olyan interfész, amely az építész gondolatait le tudná „fordítani” a gép vagy a szaktervező számára, matematikai jelsorrá tudná alakítani.

· Van egy szinte tervezhetetlen szempont az elvárások között: ez az épület későbbi élete, a jövőbeni változások számára fenntartott „műszaki tartalék”, az átalakíthatóság, a funkcióváltozás kérdése. Tapasztaljuk, hogy régi épületek sok átalakítást kibírtak, míg fiatal épületek a bontás sorsára jutnak, mert még átépítéssel sem tudnak alkalmazkodni az új elvárásokhoz. Az épület hosszú távú életpályáját kell felvázolni ahhoz, hogy tervezni lehessen, de gyakran a beruházás rövid távú megtérülésén túl a tervezés fázisában még semmi sem tudható az épület további sorsát illetően.

· Gyakori, hogy nem definiálható egyértelműen a követelményeknek való megfelelés állapota. Az algoritmus csak akkor tud végigfutni, ha az elvárásokhoz hozzá van rendelve az értékelési módszer is. Ez az építető és a tervezők közötti együttműködés nélkül nem lehetséges, mivel a jogszabályok, szabványok és irányelvek nem fedik le a követelmények teljes körét.

- Jól mérhető teljesítményértékek és egyszámjegyes követelmények közötti határérték-jellegű viszony könnyen kezelhető, de ez a legtrikább.
- Más esetben tartományokba, osztályokba sorolhatók a teljesítményértékek, melyek egy táblázatos formában előre elkészített eredménykészlettel összevethető, de ez már bizonyos intelligens interakciót követel.
- Bizonyos esetekben egyedi értékelési módszer (kvázi „háziszabvány”) fogalmazható meg, amely alapján rangsorolhatók a megoldások.
- A követelményeknek való megfelelés módjának kiválasztása az algoritmustól is az interakció lehetőségét kívánja, ehhez egy esetérzékeny beavatkozási felület szükséges létrehozni.
  - A követelmények és igények dinamikusan változhatnak a tervezés során:
    - Az igények eleve képlékenyek, mert a megrendelő nem feltétlenül szakember, de döntési jogot kíván magának, hogy mi és mennyire fontos a számára
    - A résztvevők általában lassan, nehézkesen (gyakran nem is racionálisan, hanem divatok és megérzések alapján) döntenek az alternatívák között.
    - A követelményeknek való megfelelés valójában egy optimalizálási folyamattal függ össze.
      - Ideális megoldások nem léteznek, mivel az egyes megoldások más-más szempontból (kivitelezési, üzemeltetési, ár, esztétikai stb.) más preferencia-sorrendet vesznek föl. A reális cél a „közel optimális” megoldások keresése, amely a szempontok többsége vonatkozásában kielégíti az igényeket. Ezenfelül a

megoldásoknak minden szinten, tehát a részletek, az alrendszer és egész épület szintjén egyidejűleg kell közel optimálisnak lenni.

- A követelmények fontossága között szükséges egyfajta prioritási sorrendet beállítani, ennek hiányában az algoritmus számára nincs bázis, amelyhez viszonyítva sorrendbe állíthatók lennének a megoldások. A prioritási sorrend alatt a követelményeknek való megfelelési kényszer erősségét kell érteni.

- Például egészen eltérő szerkezeteket eredményezhet a bekerülési költségekre optimalizált és egy, a fenn tartási költségekre optimalizált épület tervezése.

- Prioritási sorrendek a szempontok egy lehatárolt csoportjára is vonatkozhatnak, nem feltétlenül mindenre.

- Bizonyos követelményeket jogszabályok emelnek kötelező rangra, de a további követelmények esetén a sorrend kezdeti beállítása az elképzelt felhasználó által történik.

- A prioritási sorrend a tervezés folyamán nagyon gyakran (szinte mindig) megváltozik. A prioritási sorrend menet közbeni változtatása egy olyan tervezési alternatívának tekinthető, amelyhez a teljes algoritmust újra kell futtatni, mivel nem lehet előre pontosan lehatárolni, hogy a változás milyen hatással lesz a már meghozott döntésekre.

- Az öntanuló módszer érdekében minden elvetett alternatíva elmentendő, mert vélelmezhető, hogy a benne foglalt prioritási sorrend valós igényeket tükrözött, így más projektek esetében egy életszerű kiinduló pont lehet.

- Kellő számú példa után már nem szükséges a prioritási sorrendnek minden elemére rákérdezni a tervezés kezdetén, mert az öntanuló folyamat eredményeképp egyre több kérdésben alakul ki egy „alapértelmezett” prioritási sorrend.

- Ez egy jelentős hasonlóság az emberi tervezéssel, hiszen a valós gyakorlatban a prioritási sorrend kezdeti felvétele mondhatni öntudatlanul, rutinból történik, majd a tervezési kooperációk hosszú során lesz egyre nyilvánvalóbb, kiforrottabb, majd a tervezés végére (normális esetben) konszenzussal záruló.

### 9. Épületmodell, geometria, kódolás

Az épület digitalizálása, vagyis az analóg valóság szükségyszerű „lefordítása” az algoritmus számára jelentős problémákat vet föl. A különböző CAD-programok már számos módot kínálnak az épületek különböző részletességű modellezésére, a geometriai és további adatok rögzítésére. Azonban nem alakult még ki olyan fejlett kódolási standard (például .ifc), amely egyfajta közös nyelvként bármilyen bonyolult épület bevitelére alkalmas len-

ne, miközben megbízható átjárást, teljes körű és reverzibilis adatcserét biztosítana a már most is használt szimulációs eszközök, BIM platformok irányában.

- További kérdés, hogy ezek a digitális leírások mennyire hűen képezik le a valóságot, alkalmasak-e az épületszerkezeti kérdések modellezésére. Tudjuk, hogy a valóságot helyettesítő modellek mindig csak egy véges térrészt, az épületnek egy részét véges felbontással szimulálják, különben végtelen kiterjedésű fájlok és erőforrások kellenének.

- A modell behálózása (elemi térfogat vagy anyag részecskékre bontása) is intelligens felhasználói beavatkozást kíván, hiszen az egyes épületszerkezeti döntések érdekében végzett szimulációk egészen más felosztást kívánnak.

- Például más hálózást kíván egy tűzvédelmi, mint egy nedvességettechnikai szimuláció.

- Az épületmodellek és a szimulációs szoftverek nem a tényleges anyaggal dolgoznak, hanem egy határfelületekkel határolt térrészt definiálnak, melyet a valódi anyagot helyettesítő tulajdonságú, idealizált anyaggal töltenek ki. Az idealizált geometria elfedi a valóságban létező geometriai pontatlanságokat, és az anyagtulajdonságokban lévő szórást is. Ezek figyelmen kívül hagyása néhány esetben komoly tervezési hibához is vezethet.

- Például egy tetőburkoló anyag felületének egyenletlensége, kavernássága miatt a víz megállhat rajta, ennek következtében az anyag könnyebben szétfagy, vagy a porral, szerves szennyeződéssel keveredve biotóp keletkezhet benne. Ugyanez az anyag belső térben tartós, megfelelő, sőt esztétikus is lehet.

Ugyanakkor egy érdes felületű anyag alkalmazása az előbbi helyzetben még előnyös is lehet, mert a felületi érdesség gátolhatja a hó megcsúszását, a jégkéreg kialakulását.

- A geometriai pontatlanságoknak jelentős szerepe lehet a szerkezet működésében. Nem mindegy, hogy a valóságban két szomszédos anyag érintkezik is a felületükön, és ez a kontaktus milyen mértékű.

- Döntő lehet a két sík felülettel modellezett anyag felületi síkhibái miatt közöttük maradó kapilláris hézag.

- Máskor az egyik anyag részleges összenyomódása következtében záródhat ez a rés.

- Külön kezelendő két anyag teljes, részleges, foltonkénti összeragasztásának esete.

- Fontos lehet két anyagnak a felületi feszültség miatti összetapadása.

- Maga az anyag sem homogén (pl. kapilláris, inhomogén, összetett, légpórusos stb.). Fontos lehet, ha a határfelületén másként viselkedik, mint általános met-

szetében (pl. zártcellás anyag vágott felületén nyitott pórosok).

Az épület digitális modelljét és az algoritmust úgy kell megalkotni, hogy meg tudja különböztetni ezeket az aprónak tűnő különbségeket, de a későbbiekben ki is lehessen választani, hogy melyik műszaki kérdésben van ezeknek jelentősége és melyekben elhanyagolható.

## 10. A tervezés algoritmus

Az épületszerkezeti tervezés folyamatának modellezésére két, egymással látszólag ellentétes haladási irányú fastruktúra kínálkozik:

a) egy elágazó jellegű, „megoldásválasztó” fastruktúra, ahol a döntések az építésmódtól kezdve a szerkezeti alrendszerek egyes szintjein át a nagy egészről haladnak a részletek felé.

b) egy „szempont-egyesítő”, szintetizáló fastruktúra, ahol az egyes kérdések fontossági rangsora szerint, azok összehangolása felől haladunk egy mindent egyesítő, utolsó koncepció felé.

Az a) struktúrához minden szinten rendelkezésre kell állni egy döntési készletnek. Az algoritmusnak minden szinten végre kell hajtania egy optimalizációt, melynek során előre összegezni kell az egyes döntési ágakon található megoldásoknak a prioritási sorrenddel súlyozott értékét. A valós tervezési munkák során nemcsak az összteljesítményt, hanem az egyes irányok meghibásodási összkockázatát esélyét is figyelembe kell venni. Továbbá a döntések során szempont, hogy a későbbi lépések szempontjából nagyobb, több elágazási lehetőséggel bíró irányok preferáltak (ez a tervezési szabadság fenntartása).

Könnyen belátható, hogy ez a struktúra ebben a formában alkalmatlan a valós tervezési folyamat leképezésére. Ennél sokkal differenciáltabb szellemi tevékenységet végez még egy kezdő tervező is. Ha az egyes döntési szinteken csak előre betáplált, analóg példák „kiátlagolásával” elért és megtanult, tehát emberi intelligenciából eredő lehetőségek közül lehet választani, akkor nincs arra garancia, hogy egy új, addig ismeretlen tervezési feladat optimális megoldása megtalálható közöttük, bármilyen fejlett módon is történik ezek összehasonlítása. A megoldási készlet bővítése, vagyis a már kialakult megoldásokat a program szempontjából „mintáknak” tekintve, az ezekhez „hasonlító”, új és újabb variációk és mutációk generálása, egyfajta számítógéppel segített „brainstorming” elengedhetetlenül szükséges, ahogy a valóságban is történik az új feladat új megoldásának keresése. A számítógép segítségével rendkívül nagyszámú alternatív eset működése szimulálható. Ezáltal mérsékelhető az emberi tervezésnek az a jellegzetes problémája, hogy a

tervezés gyakran megragad egy első látásra jónak tűnő, majd aztán idő hiányában már nem módosított, de valójában közel sem optimális döntésnél.

Az a) struktúra bevezetésének pillanatnyi akadályai a következők:

- A korábbiakban leírt, az elinduláshoz szükséges adatbázis nem áll rendelkezésre, az épületszerkezeti tervek és szakvélemények szerzői jogi védelem alatt állnak, nincsenek nyilvános adatbázisokba gyűjtve, az épületek gyakran a tervektől eltérően valósulnak meg, a szerkezetek tényleges működéséről nincs elegendő információ, visszacsatolás.

- A random generálandó új megoldások bonyolultak, összetettek, keresésük nem egy zárt körben lejátszódó kombinációs feladat, hanem a lehetséges kimenetek leírásához szükséges paraméterek száma igen nagy és megoldásonként eltérő lehet.

- A valós tervezési folyamat során maga a tervezési program is változik. A tervezés során már elért optimalizálási állapot kiértékelése nyomán olyan összefüggésekre derülhet fény, ami a kiinduló igények felülvizsgálatára készletet. A prioritási sorrendet a résztvevők nemcsak egyszer, hanem lényegében minden fázisban, rendszeresen felülvizsgálják – akár csak kimondatlanul, nem tudatosan.

A prioritási sorrend módosítása és ennek visszacsatolása a folyamatba azt eredményezi, hogy a folyamat a fastruktúra egy magasabb szintjéről többször is visszahullik egy alacsonyabb szintű döntéshez, ahonnan ismét végig kell járni az egész folyamatot. Ez tipikusan bekövetkezik akkor, amikor a műszaki megoldások, részletek már annyira konkretizálódnak, hogy az építészeti megjelenésük vizualizálható. Gyakran csak ebben a fázisban ismerhető fel, hogy ezek nem kellően szolgálják az építészeti szándékokat, vagy akár ellentétben állnak velük. Ez a „visszahullás” az emberi tervezés során időnként nagy idővesztést és feszültséget okoz a tervezők között. Elemi érdek tehát a prioritások minél gyorsabb és mélyebb megismerése, rutinszerű felülvizsgálata, amelynek színtere az építész és az épületszerkezeti tervező közötti rendszeres párbeszéd. Az algoritmus ezt egyfajta rendszeres állapotjelzéssel, munkaközi lekérdezésekkel segítheti.

A b) struktúra lényege a szempontok közötti összhang megteremtése a prioritási sorrend folyamatos figyelembevétel alapján. A szerkezetválasztás a magas prioritású szempontok egyidejű kielégítését szolgáló döntések felől halad a kevésbé lényegesek felé. Itt is előfordulhatnak olyan szcenáriók, ahol a folyamat előrehaladott állapotában zsákutcába jut, vagy a prioritási sorrend későbbi felülvizsgálata jelentős visszaugrást tesz szükségessé.

Ennyi szempont egyidejű kielégítése lehetetlennek tű-

nik. A Pareto-elv alapján mégis vélelmezhető, hogy kialakítható a prioritásoknak és a variációknak egy olyan együttese, amely kielégíti a „közel optimális” megoldás fogalmát, mert a szempontok túlnyomó részét elfogadható mértékű hibával elégíti ki [1].

A valóságban mindkét tervezési logika párhuzamosan jelen van a folyamatban. Ha egy adott pillanatban megoldhatatlannak látszik valamely részfeladat, feloldhatatlannak tűnik a szempontok közötti ellentmondás, akkor egy teljesen új műszaki megoldás (például új, nagyobb teljesítményű anyag, termék) keresése mellett a prioritási sorrend újratárgyalásával elérhető kompromisszumos módosítás jelenthet kiutat. Ez a résztvevő felek közötti együttműködést teszi szükségessé. A számítógépes algoritmus esetén ez az interakció többféle nehézséget jelent:

- Milyen időpillanatban történik a beavatkozás, az algoritmus választja-e ki az interakció pillanatát, vagy bármely pillanatban felkínálja-e a felhasználó számára a lekérdezés és a beavatkozás lehetőségét? Értelmes-e minden időpillanatban a lekérdezés eredménye, vagy elegendő, ha csak valamilyen mérföldköveknél, csak néhány „időablakban” villan fel az algoritmus pillanatnyi állapota.

- Az emberi beavatkozás mindenképpen szubjektív lesz, hiszen a program használója nem gép. A szubjektivitás csökkentése érdekében minél több információt közöl az algoritmus arról, hogy „hol tart”, annál jobb.

- Az aktuális állapotnak a felhasználó számára használható formában történő kiplotolása. Ezek lehetnek részletrajzok, rétegrendek, specifikáció, műszaki leírás, költségbecslés, ezek mindegyikére szükség lehet. Nem lenne szerencsés, ha a kiadott információ kiértékelése maga is egy újabb szakértő bevonását igényelné. Elképzelhető kimenet egy táblázatos formájú ellenőrző lista, amely csak a kockázatos helyzetekre hívja fel a használó figyelmét.

- Nehéz meggyőződni arról, hogy a beavatkozás pillanatában az algoritmus által kiplotolt információk értelmesek, reálisak, közel optimálisak-e. Gyakran előfordul, hogy az optimalizálási folyamat későbbi állapotában az aktuális döntés zsákutcának bizonyul. A válasz szorosan összefügg azzal is, hogy miképpen volt az algoritmusba bevitt az épület, a tervezési program, reálisak voltak-e a kiinduló peremfeltételek.

adja az épületszerkezeti tervezés algoritmizálásának legfőbb nehézségeit.

A fentiekben összegyűjtöttük és rendszereztük az épületszerkezeti tervezéshez szükséges adatok, ismeretek, alkalmazott eljárások, figyelembe veendő körülmények és feladatok körét, kifejezetten abból a szempontból, hogy mire lenne szükség egy épületszerkezeti tervező algoritmus létrehozásához. Ezek:

- korszerű építőanyag és termékadatbázis,
- az épületszerkezetek működési folyamatainak megértése és tudásbázisa,
- a szerkezetek működését meghatározó fizikai törvények ismeret és modellezése,
- példák, analógiák, korábbi megoldások tudásbázisa,
- hatások komplex feltérképezése, az igénybevételek teljes körű meghatározása,
- az igények és követelmények, a prioritási sorrend felvétele és menedzselése,
- adekvát épületszerkezeti „leírnyelv” fejlesztése,
- célszerű tervezési algoritmus és interaktív felhasználói felület fejlesztése.

A tervezés objektivizálása, szakértői rendszerrel történő támogatása, az optimumok keresése és a megoldások kockázati elemzése sürgető feladatunk. Megállapítható, hogy a felmerülő nehézségek miatt pillanatnyilag távol vagyunk az emberi tervezés kiváltásától, az épület tervezésének közel optimálisnak tekinthető döntések nyomán történő, akár csak részleges gépi elkészítésétől. Az emberi tevékenység „leképezése”, az egyszerű „tudásábrázolás” emulációja nem lehetséges és nem is elégséges a cél eléréséhez. Az építészeti tervezés szubjektivitásának kiiktatása nem is cél, a tervezés sokszemélyes jellege, egymás iránt kellő empátiával rendelkező, tapasztalt szakemberek együttműködése olyan érték, amelyet egyelőre nem lehetséges felülmúlni. Ugyanakkor rögzítettük a feladatokat, melyek csak egy részének végrehajtása esetén is a számítógép számos kérdésben már most hasznos tagja lehet a tervező teamnek.

**Dobszay Gergely, Bakonyi Dániel, Kapovits Géza**

## 11. Összefoglalás

Mi volt a kérdés, ha egy tervet vagy konkrét épületet az erre adott válaszként tekintünk? Ahhoz, hogy egy választ megítéljük, a kérdést kell alaposan ismerni, de úgy tűnik, hogy éppen a feltett kérdés körüli bizonytalanság

## Irodalom / References

- [1] Gauffre, P L – Miramond, M: „An Expert System for the Construction and the Resolution of Multicriteria Dwelling Design Problems”, in: *Proceedings of the 4th ISARC 1987*, Haifa, Israel, pp 602-618, DOI: <10.22260/ISARC1987/0038>, [utolsó belépés: 2018-11-03].
- [2] Pengzhen, Lu – et al: „Artificial Intelligence in Civil Engineering”, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol 2012, DOI: <10.1155/2012/145974>, [utolsó belépés: 2018-11-03].
- [3] Rooney, M F – Smith, S E: „Artificial intelligence in engineering design”, *Computers & Structures*, Vol 16, Issues 1–4, 1983, pp 279-288, DOI: <10.1016/0045-7949(83)90167-0>, [utolsó belépés: 2018-11-03].
- [4] Poyet, P – Delcambre, B: „NOE: Expert System on Technical Inspection of Waterproofing on Flat Roofs. Expert Systems in Civil Engineering”, *IABSE Colloquium, Expert Systems in Civil Engineering*, Bergamo, ISBN 3-85748-058-0, Vol 58, 1989, pp 175-187, DOI: <10.13140/2.1.3994.9760>, [utolsó belépés: 2018-11-03].
- [5] Cheong, H – et al: „Automated Extraction of System Structure Knowledge From Text”, *ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2016, DOI: <10.1115/DETC2016-59551>, [utolsó belépés: 2018-11-03].
- [6] Cheong, H – et al: „Natural Language Problem Definition for Computer-Aided Mechanical Design”, *Conference ACM CHI 2014 – DSLI Workshop*, Toronto, Canada, 2014, DOI: <10.1115/DETC2016-59551>, [utolsó belépés: 2018-11-03].
- [7] Silvestre, J D – et al: „Gypsum plasterboard walls: inspection, pathological characterization and statistical survey using an expert system”, *Materiales de Construcción*, Vol 62, No 306 (2012), DOI: <10.3989/mc.2011.62210>, [utolsó belépés: 2018-11-03].
- [8] Mathur, K S, – Leng, A A: „Efficacy of expert system technology for the diagnosis of building defects — A case study”, *Building Research & Information*, Vol 20, 1992, Issue 5, DOI: <10.1080/09613219208727230>, [utolsó belépés: 2018-11-03].
- [9] Redmond, A E – Smith, B: „Designing a cloud BIM business process model case study”, *Project: The FUSION+GIS+ONUMA Systems – MiraCosta College Oceanside Campus (California Community Colleges CCC)*, 2013.
- [10] Kuo, S S – Mahmoud, H: „Proposed Application Of Fuzzy Logic Expert System In The Selection Of Bridge Deck Joints”, *WIT Transactions on Information and Communication Technologies*, Vol 16, 1996, DOI: <10.2495/AI960091>, [utolsó belépés: 2018-11-03].
- [11] Das, S – et al: „Integrated Spatial-Structural Optimization in the Conceptual Design Stage of Project”, *eCAADe Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe*, eCAADe 34, Vol 2, pp 117-126 [utolsó belépés: 2018-11-03].
- [12] Asl, R M – et al: „BIM-based Parametric Building Energy Performance Multi-Objective Optimization”, Thompson, Emine Mine (ed.), *Fusion – Proceedings of the 32nd eCAADe Conference – Vol 2*, Department of Architecture and Built Environment, Faculty of Engineering and Environment, Newcastle upon Tyne, England, UK, 10-12 September 2014, pp 455-464, WOS: 000361385100048, [utolsó belépés: 2018-11-03].
- [13] Petró, B: *Az épületszerkezettan és az épületszerkezetek tervezése*, ÉTK, 1991, p 153, ISBN: 9635129890.
- [14] Fülöp, Zs: „Challenges of Structural Decisions in Contemporary Architecture”, *PERIODICA POLYTECHNICA-ARCHITECTURE*, Vol 43 : No 1, pp 1-9, (2012), DOI: <10.3311/PPar.7156>, [utolsó belépés: 2018-11-03].
- [15] Kapovits, G: „Épületszerkezetek változó paraméteres tervezése szakértői rendszer támogatásával”, *Magyar Építőipar*, Vol 60, No 6, (2010), pp 210-213.
- [16] Kapovits, G – Dobszay, G: „Use of Decision Support System for special challenges of building constructions”, In: Katarína Minarovičová, Jozef Hraška (eds): *Buildings and Environment: Proceedings of the 8th International Conference*, 2013, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, pp 112-117.
- [17] Molnárka, G – Kóczy, L T: „Building Renovation Cost Optimization with the Support of Fuzzy Signature State Machines”, in: Somnuk, Phon-Amnuaisuk, Thien, Wan Au (eds) *Computational Intelligence in Information Systems : Proceeding of the Fourth INNS Symposia Series on Computational Intelligence in Information Systems (INNS-CIIS 2014)*, pp 129-138, published by Springer International Publishing, (2015), DOI: <10.1007/978-3-319-13153-5\_13>.