

„Játékkal – komolyan”

Nagyméretű vízzáró vasbeton alaplemez kivitelezésének tervezése

Dr. Vattai Zoltán András

Bevezető gondolatok

Napjaink korszerű számítástechnikája sokszor ejt ámulatba és kényeztet el bennünket képességeivel, lehetőségeivel – az egyszerű numerikus feladatoktól kezdve a kiterjedt szakértői szoftver rendszereken, adatbázisokon, automatizált „viselkedő” rendszereken át egészen a 3D-s telemetriás-, vagy éppen multimédiás alkalmazásokig. A digitális számítástechnika szinte beláthatatlannak tűnő további fejlesztési lehetőségei már-már a mindentudás eszközét engedik sejtetni benne, holott egyre inkább kirajzolódnak korlátai, miközben az a „néhány” probléma, amit eddig nem sikerült érdemben eme új eszközzel sem megoldani, makacsul ellenáll a mégoly látványos fejlődésnek. Ilyenkor „marad a jó öreg humán algoritmus, amit legfeljebb támogathat a mesterséges intelligencia”.

E konokul nem engedő problémák egyike a matematikában kombinatorikai, avagy faktoriális robbanás néven ismert jelenség, amivel az építőiparban leginkább a sorrendtervezési („sorolási”) feladatoknál találkozhatunk. A sorolási feladatokat az építőipari gyakorlat általában egyszerűen megkerüli, avagy triviális megoldással él. Például: ha építmények sorolására gondolunk, a szerződéses határidők eleve eldönthetik a kérdést – holott regionális-, avagy infrastrukturális szinten akár több tíz százalékos idő- és költség nyereség is elérhető lenne. Vagy: a munkafolyamatok technológiai sorrendjének kérdését többnyire a bevett gyakorlat és egyéb – például térszervezési – megfontolások, illetve az elérhető erőforrások döntenek el.

Vannak azonban olyan technológiai sorolási feladatok, melyeknél a legcélravezetőbb megoldás megtalálása – a figyelembe veendő sokféle tényezőtől adódóan – komoly kihívást jelenthet, különösen akkor, ha annak megtalálására igen rövid idő áll a döntéshozó rendelkezésére. A látszólag egyszerűen megfogalmazható problémáról kiderülhet, hogy megoldó algoritmusának megtalálása matematikailag is nehézségekbe ütközik. Az alábbi írás egy ilyen helyzetben született, alkalmazói által csak „játék programnak” nevezett szoftver fejlesztésének és alkalmazásának rövid történetét meséli el.

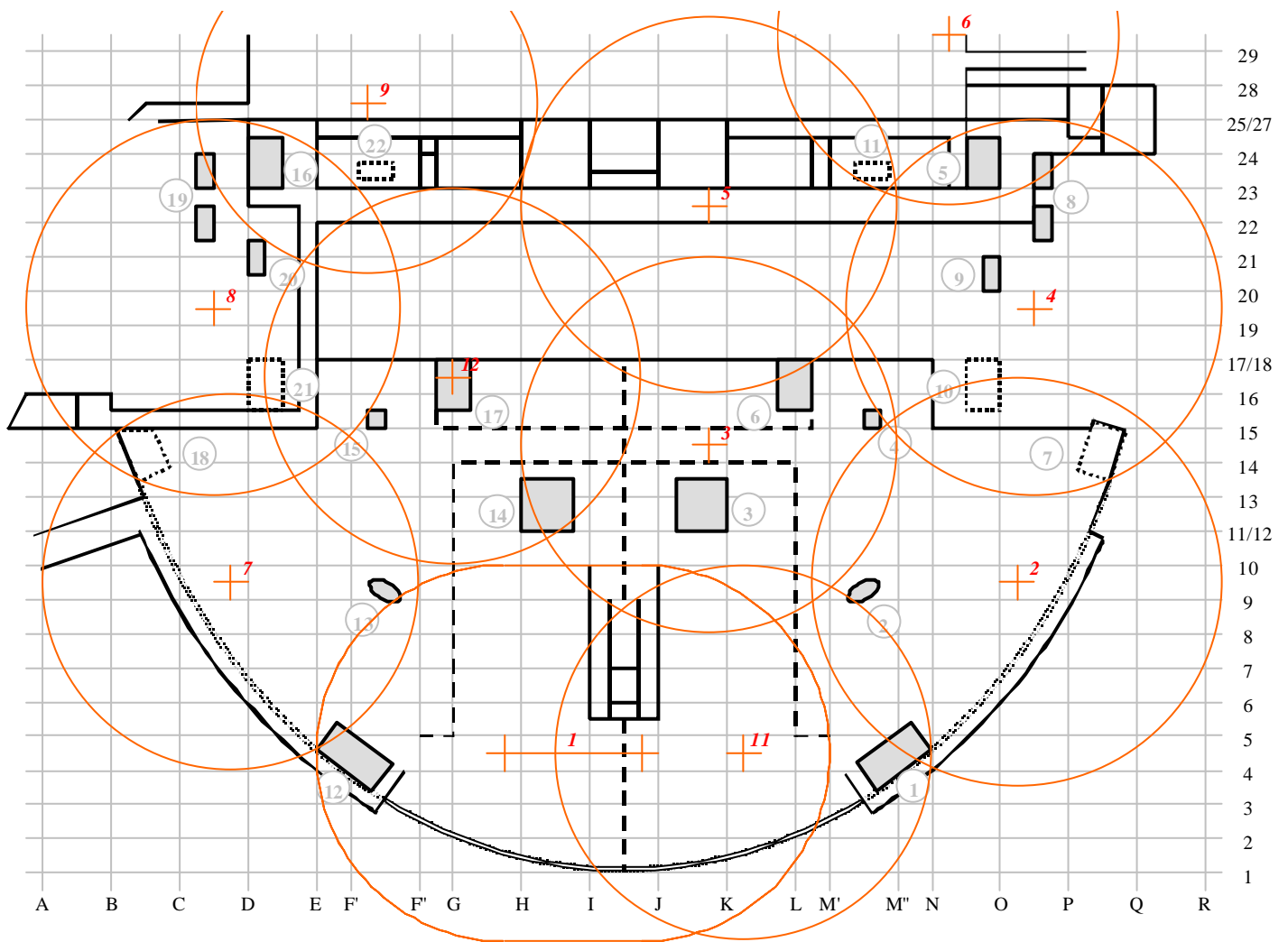
Probléma felvetés

A kivitelező STRABAG Építő Kft. 48. Direkciójának vezetői 2001. év májusában keresték meg a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építéskivitelezési Tanszékét, hogy az általuk kivitelezésre kerülő, Budapest, XV. kerületében a Szentmihályi úton, a már üzemelő Pólus Center mellett létesítendő „Asia Center – kulturális és kereskedelmi központ” szerkezetépítési munkálatai ütemtervének kidolgozásában közreműködésüket kérjék. A kérést alapvetően a rendelkezésre álló szűk időkeretek, és a kivitelező szakemberei által előre jelzett műszaki- időtervezési problémák indokolták. A felkérés időpontjában már a víztelenítési-, alapozási munkálatok folytak, melyek egyik részfeladatuként az épület teljes alapterületén egybefüggő ún. „fehér kád” – vízzáró vasbeton alaplemez- és kerítő pincefal – készül.

A méretek meghökkentők. A teljes építési feladat hozzávetőlegesen 60 %-át felölelő I. építési ütemnél: Az épület teljes alapterületen és két szinten alapincézett volta miatt egy ütemben készíttendő 80 cm vastagságú dilatálatlan vasbeton alaplemez egy hozzávetőlegesen 240 x 200 m-es koordináta rendszerben volt elhelyezhető. A szerkezetépítési munkálatokat 11 darab 45 m hatósugarú, 6.5 to hasznos teher emelésére képes toronydaru szolgálta ki, időszakosan autódarus

kiegészítéssel. A betonkeveréket az építési helyszínre telepített $70 \text{ m}^3/6$ ($\sim 1000 \text{ m}^3/\text{nap}$) teljesítő képességű betonüzem szolgáltatta. A részben monolit-, részben előregyártott szerkezet kivitelezésekor csak a monolit szerkezeti részek elkészítéséhez mintegy 90.000 m^3 helyszíni betont használtak fel. Az előregyártott szerkezeti elemeket napi ütemezésben és napi szállítással Hódmezővásárhelyről, Dunakesziről, Paksról, illetve Dunaújvárosból közúton szállították. Előirányzott kivitelezési idő: 18 hónap.

A teljes létesítménynél (I. és II építési ütem együtt) : alapterület 64.000 m^2 . Szintek száma: 2 teljes alapterületű piceszint, földszint és – egy közbülső gépészeti szinttel-, illetve zöldtetővel a 3. emelet fölött – 4 emelet. Szintmagasság az emeleteknél 5 m. Beépített terület 210.000 m^2 . Kivitelezési munkálatok előirányzott költsége – a bérleti kiépítéseket és egyéb, a beruházásra rakódó további költségeket nem számítva – hozzávetőlegesen 32 milliárd Ft.



1. ábra.; Asia Center I. építési ütem („Fiú” és „Leány” épületrészek) szerkezet építési munkák, daru telepítési terv (STRABAG Építő Kft. 48. Direkción)
A háttérbeli koordináta tengelyek 16×8 , illetve 8×8 m-es pillérkiosztásnak felelnek meg.

A feladat

A kivitelező és az Egyetem között létrejött együttműködés keretén belül megoldandó részfeladat: Elkészítendő a kivitelezési egységekre (tömbökre) bontott vízáró vasbeton alaplemez kivitelezésének ütemterve, figyelembe véve

- ☞ a nagyméretű vasbeton szerkezeti elem kivitelezés alatti zsugorodási hajlamát (vízzárósági követelmény, tömbösítés, méretek és alakzatok);
- ☞ a szerkezet kivitelezési technológiáját (munkafázisok és azok időigénye);
- ☞ a kivitelező rendelkezésére álló kapacitásokat (napi bedolgozható mennyiség);
- ☞ a kivitelezési tömbök megközelíthetőségét (anyag-behordás, építési forgalom);
- ☞ egyes kiemelt jelentőségű kivitelezési tömbök sorrend preferenciáját (daru-alapok, csúszó-zsalus szerkezetek);
- ☞ az egymás mellé kerülő kivitelezési tömbök „irányítatlan” relatív korkülönbségét (munka-hézagok vízzárósága, szigetelő segéd-szerkezetek);
- ☞ az elkészült kivitelezési tömbökre kerülő további (felmenő) szerkezeteket;
- ☞ a folyamatosan készülő („rákerülő”) további szerkezetek munkatér határoló- és mozgáskorlátozó jellegét (folyamatos munkába vétel, alvállalkozói munkaterület átadás);
- ☞ a szigorú időkorlátokat (technológiai veszteség-idők minimalása).

A nagyméretű szerkezet kivitelezési tömbökre bontását-, majd a sorrend-ütemterv birtokában az egyes tömbök zsaluzási-vasalási tervét (toldóvasak !) az UVATERV Rt. szakemberei készítették.

Az Egyetem szakembereire e részfeladat keretében a kivitelező által előirányzott sorrendiség ellenőrzése-, valamint – a következő építési fázis („Apa” épületrész) hasonlóan nagy méretű alaplemezének kivitelezéséhez sorrendi-, illetve – tervezési módszertani javaslat készítésének feladata hárult.

A modell

A kivitelezési tömbök egymáshoz viszonyított helyzetének leírására egy gráftechnikai modell bizonyult a legalkalmasabbnak. Segítségével a térbeli összefüggések és relatív időkorlátok jól definiálhatók. Az eddig megfogalmazott gráftechnikai („hálózati”) problémák- és kezelésekre kidolgozott algoritmusok – mint például a hálós időtervezési technikák, pl.: [1] – azonban nem bizonyultak alkalmazhatónak, mert alapvetően a gráf irányítottságát feltételezik. (Előre és egyértelműen meg kell adni, hogy két szomszédos elem közül melyik készüljön előbb ... holott esetünkben ez maga is a kérdés része.)

A sorrendtervezési feladatok viszont az Operáció Kutatás (alkalmazott matematika) régóta ismert „nehézfíú”. A gépesített termelési módszerek és robot-technika széleskörű elterjedésével számos telepített ipari környezetben számos változatokat- és alváltozatokat foglalmaztak meg [2]. Egy-egy szerencsés kivételtől eltekintve azonban a megoldó algoritmusok (értsd: a feladat méretétől kevésbé függő sebességű eljárások) kidolgozása a kutatók számára továbbra is nyitott kutatási lehetőségeket jelent. A megfogalmazott feladatok nagy részénél „csak” valamilyen ún. leszámlálási módszer („Branch & Bound”, „implicit enumeráció”) alkalmazható, ami bár lehet egzakt, de a megoldás sebessége nagymértékben (esetenként exponenciálisan, illetve faktoriálisan) a feladat méretétől függ.

Hogy a kihívás nagyságát érzékeltessük:

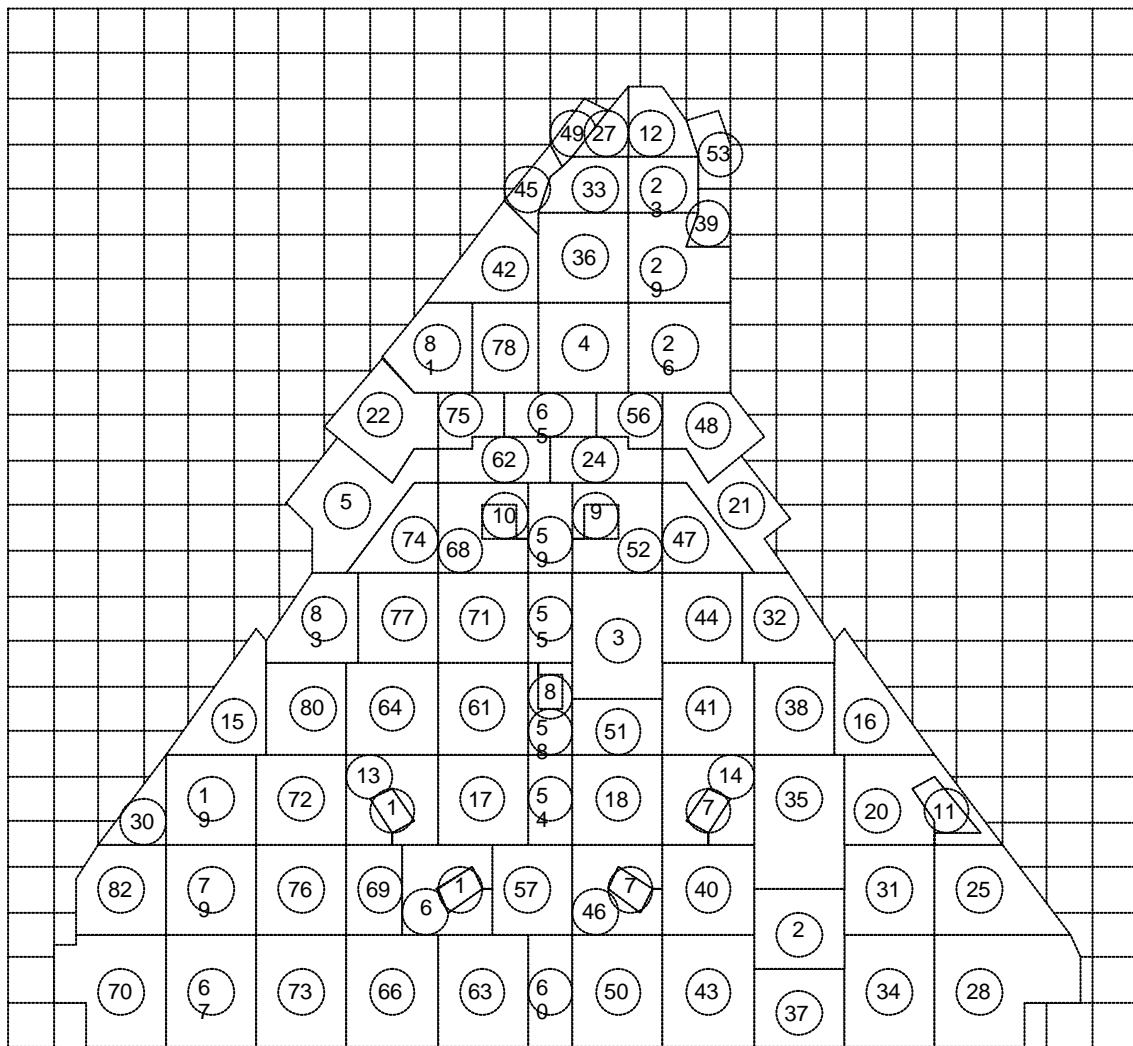
Három elem (pl. „A”, „B”, „C”) összes lehetséges sorrend-variánsának (ismétlés nélküli permutációjának) száma $3! = 6$ („ABC”, „ACB”, „BAC”, „BCA”, „CAB”, „CBA”); négy elemnél ez a szám már $4! = 24$; ötnél: 120; tíznél több mint 3.6 millió; húsznál pedig már több mint 2.43 trillió. Azaz: ha húsz elem összes ismétlés nélküli sorrend-variánsát fel szeretnénk sorolni (vagyis nem lenne olyan sorrend-variáns, amit eleve kizárnánk a vizsgálatból), és lenne olyan számítógépünk, mely egyetlen másodperc alatt egy millió sorrend-variánst (értsd: egy millió

ütemterv változatot) meg tudna vizsgálni, akkor ennek a számítógépnek valamennyi sorrend-variáns áttekintéséhez több mint hetvenhétezer (!) évre lenne szüksége. Márpedig ennyi időnk nincs, és a sorolandó elemek (tömbök) száma is messze meghaladja a húszat.

Némi vigaszt jelenthet, hogy a gyakorlati alkalmazások többségénél bizonyos sorrend-variánsokat eleve kizárhatunk a vizsgálandó körből. De módszertanilag ugyanezt kijelenteni nem lehet.

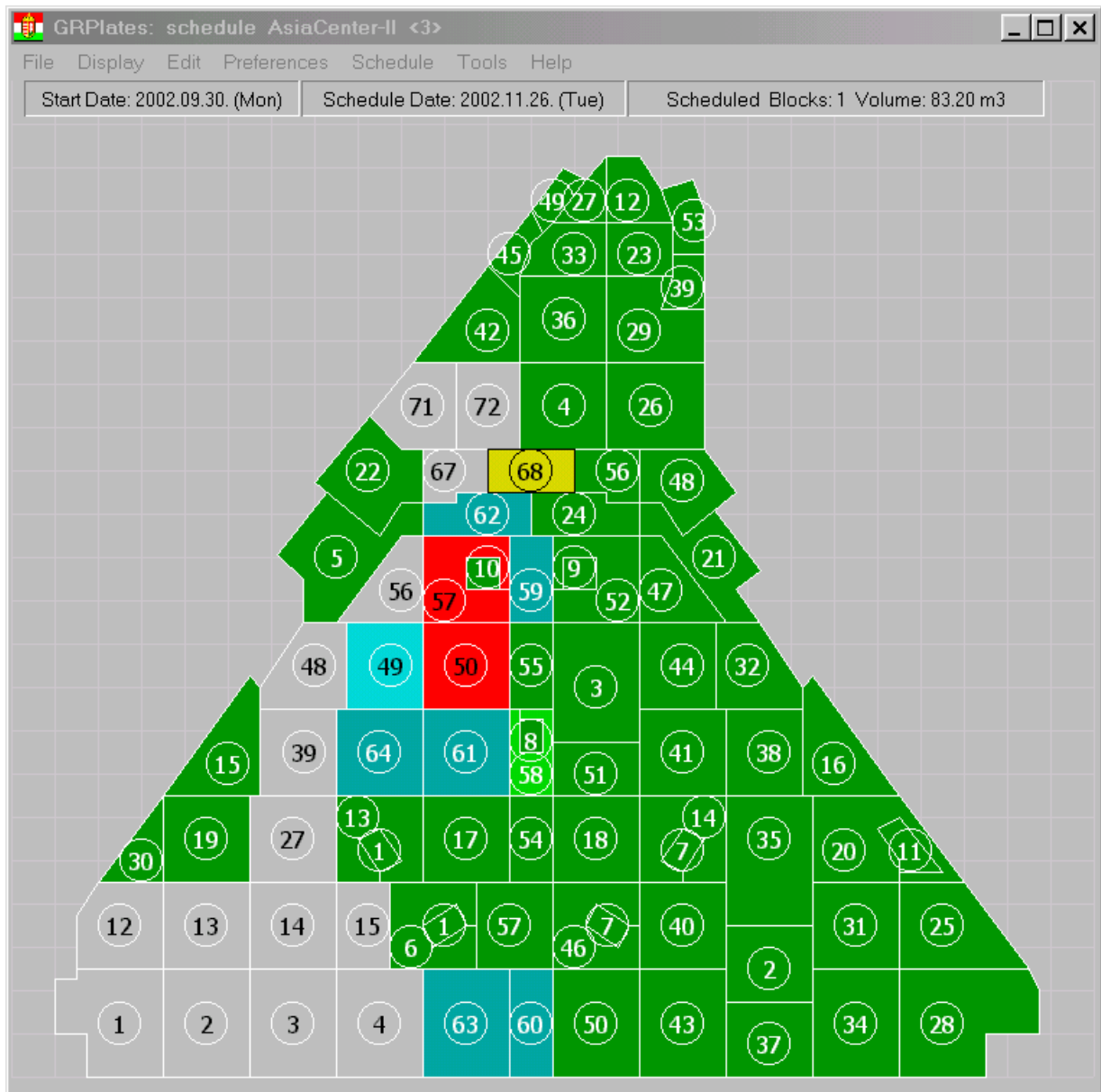
A NATO Advanced Study and Research Institute 1981-es a jelentésében [2] szerzők egy csoportja (Graham, Lenstra, Lawler, Rinnooy Kan, 1979-) által javasolt feladat-azonosítási rendszerhez illeszkedően a problémát leginkább az $F|G,abs(C)|C^{max}$ leírókóddal lehetne azonosítani. Vagyis: meghatározandó „n” elem sorrendje és ütemterve (F) oly módon, hogy az utolsónak elkészülő elem (C^{max}) is minél hamarabb kész legyen, miközben bizonyos elemek időzítése között a minimálisan előírt időkülönbség „csak” abszolút értékével ($abs(C)$) adott. Ez utóbbi feltételrendszert a $G[A,N,]$ irányítatlan súlyozott gráf írja le.

A „játék”



2. ábra., Asia Center II. építési ütem („Apa” épületrész) vízzáró vasbeton alaplemez tömbösítése és sorrend-ütemterve (munkaközi változat). A háttérbeli rács 8 x 8 méteres osztásnak felel meg.

Tekintettel a probléma szabatos matematikai megfogalmazásának- és kutatásának várhatóan nagy időigényére, az eredeti felkérés alapján igényelt ütemterv kialakítására-, illetve a megoldási erőfeszítések segítésére, továbbá részben a várt majdani kutatási eredmények gyors tesztelésére, első lépésben egy a gyakorlatban „azonnal” bevethető teszt program készült el.



3. ábra.: Sorrend-ütemterv színekkel (minimális korkülönbség 3 nap):

- fehér szám : tömb ütemezett relatív idopozíciója
- fekete szám : tömb egyedi azonosító száma
- szürke : ütemezésre váró (még nem ütemezett) tömb
- sötétzöld : már elkészült tömb
- világos zöld : aktuális ütemnapon (58) készítendő tömb
- sárga : leg hamarabb az aktuálisat követő ütemnapra ütemezhető tömb
- piros : aktuális - és azt követő ütemnapra nem ütemezhető tömb
- világos türkiz : aktuális ütemnapra még ütemezhető tömb
- sötét türkiz : aktuális ütemnapnál (58) későbbi időpontra ütemezett tömb

A vizuális kiértékelés- és humán döntéshozatal támogatására, és az ütemezési feladat megoldásának elősegítésére hozzávetőleg két hét alatt került kidolgozásra a GRPlates elnevezésű, grafikus felületű

szoftver (Delphi nyelven, Windows környezetben), mely a tervezés alatt álló, tömbökre bontott alaplemez grafikus sémarajzán teszi lehetővé a leginkább elfogadható ütemterv kialakítását.

A felhasználó első feladata az épület szerkezeti terveinek ismeretében (süllyesztékek, pillérek, falak, méretkorlátok, stb. figyelembevételével) az elsődleges tömbösítés kialakítása. Ehhez a program grafikus szerkesztő képernyője nyújt segítséget. Az alapvetően rajzoló munkát a szokásos szerkesztési lehetőségek (másolás, forgatás, átmozgatás, pontonkénti szerkesztés, stb.) segítik. A tömbösítési tervek elkészültével az alaplemez egymással érintkező poligonokból (mint tömbökből) felépített sémarajza áll a következő munkafázishoz a tervező rendelkezésére. A beépített felismerő algoritmusok segítségével, a felhasználó által megrajzolt sémarajz-, valamint kiindulási adatként megadott minimális „korkülönbség” (C) alapján a program maga építi fel az ütemezés relatív feltételeit leíró gráfot (G[A,N,]), melyet opcionálisan a sémarajzon is megjelenít.

A program ettől kezdve az ütemezést szolgáló képernyőn, mintegy azonnali display-ként, interaktív módon teszi lehetővé a szakértő tervező „mi lenne, ha ...” típusú problémamegoldó munkáját. Egy-egy tömb ütemének kijelölését – vagyis a klikkeléssel megjelölt tömb aktuális ütemhez rendelését – követően az ütem továbbléptetése, vagy tartása a felhasználó utasításainak megfelelően automatikusan történik. Az ütemezési munka közben a program színek útján folyamatosan jelzi az aktuális-, illetve azt követő ütemnapra szabadon ütemezhető-, vagy éppen tiltott; ütemezett, vagy éppen még ütemezésre váró tömböket. A sorrend-tervező feladata ily módon leginkább egy kifestő játékhoz hasonlítható. A beépített területszámító algoritmusok segítségével, valamint a felhasználó által megadott fajlagos mennyiség alapján ugyancsak folyamatosan kijelzésre kerül a napi bedolgozásra kijelölt „betonmennyiség” – a felhasználó által megadott dimenzióban; továbbá a már ütemezett („kivitelezett”) tömbök ütemnapjai – relatív-, avagy naptári idopozíció szerint.

Az ütemezés során – vissza-visszatérve a grafikus tervező képernyőre – mód van a még nem ütemezett tömbök kialakításának felülvizsgálatára, új tömbök megadására, tömbök további felosztására- illetve összevonására, azonos ütemre szignálására (lásd: több vállalkozó egyidejű munkája), vagy éppen az ütemezés részleges-, avagy teljes visszavonására. A beállításoknak megfelelően mód van az előírt ütemezési szabályok részleges áthágására, ún. erőltetett ütemezés kialakítására is, ami a kevésbé kritikus helyeken lévő, vagy kis felületen – például csak a sarkuknál – érintkező szomszédos tömbök ütemezésekor lehet hasznos. Ütemezés közben-, avagy végeztével megfelelő színekkel felruházott gráf formájában az időkorlát feltételek teljesülése a sémarajzon megjeleníthető. (Hasonlóan az idő-ütemterv hálók kritikus útjaihoz).

A tervezés tényleges eredményét a tömbkiosztás és az ütemezés együttesen képezi. Az elkészült ütemterv további feldolgozásra és dokumentálásra vektorgrafikus (*.wmf) állomány formájában háttértárba menthető-, illetve exportálható. Az ütemterv birtokában az egyes tömbök vasalási tervei véglegesíthetők. Az ütemterv segítségével a kivitelezés előrehaladása – képernyő előtt – animáció szerűen lejátszható.

Tekintettel munkaközi (nem piacképes), illetve kutatási segédeszköz jellegére, az adott projektre vonatkozó kiterjedtebb együttműködés keretében, leíró dokumentációjával együtt a szoftver térítésmentesen – de a felhasználásra vonatkozó korlátozásokkal, eredendően tesztelési céllal – átadásra került a kivitelező STRABAG Kft. szakemberei részére.

Komolyan

A „játék” éles bevetésére viszonylag rövid időn belül, a II. építési ütem („Apa” épületrész) munkálatainak előkészítésekor került sor. Az alaplemez kiviteli terveit készítő UVATERV Rt. szakemberei keresték meg a „fejlesztőt” a szoftver alkalmazásának engedélyezéséhez.

A szoftver alkalmazására a fejlesztő- és a tervező szakemberek között létrejött célzott kutatási együttműködés keretében került sor. Ennek értelmében a fejlesztő vállalta a tervező által kialakított tömbösítés sémarajzának feldolgozását és a szoftver használatának betanítását- valamint magának a szoftvernek és dokumentációjának adott tervezési feladatra korlátozott átadását. Az ütemtervek eleinte közös együttműködéssel, a későbbi – időközben ismertté vált egyéb körülmények következtében- és viszonylag, nagy számban szükségessé vált – módosítások és változtatások pedig már a tervező által önállóan kerültek kidolgozásra.

Az együttműködés értelmében a későbbiek folyamán a tervező szakemberei szakmai-felhasználói tapasztalataikat az ütemezési feladattal kapcsolatos további kutatómunka elősegítése érdekében összefoglalják, illetve a szoftverbe épített algoritmusokat illetően fejlesztési javaslatokat terjesztenek elő. Ugyancsak a kutatási együttműködés jegyében a fejlesztő a tervező által kialakított tömbösítési terveket saját publikációiban demonstrációs céllal (lásd pl. jelen írás) használhatja fel.

A sors fintora, hogy a II. építési fázis munkálatait – marketing, illetve értékesítési-finanszírozási megfontolásokra hivatkozva – a megrendelő az I. építési ütemben elkészült rész eloirányzott mértékű értékesítéséig időlegesen leállította. ...

A probléma kutatása továbbra is nyitott. Az ütemezési feladat matematikai behatárolásakor számos változat, ha tetszik, önálló feladat fogalmazható meg. Például:

- ☞ Adott tömbösítési kialakítás, napi kapacitás és minimális korkülönbség mellett mennyi idő alatt készíthető el egy adott alaplemez ?
- ☞ Adott tömbösítési kialakítás, napi kapacitás és határidő mellett milyen legnagyobb minimális korkülönbséggel ütemezhető egy adott alaplemez kivitelezése ?
- ☞ Adott minimális korkülönbség és határidő mellett milyen tömbösítési megoldással és napi kapacitással oldható meg egy adott alaplemez kivitelezése ?

A fentiekhez hasonlóan megfogalmazott feladatok megoldásánál további nehézséget jelenthet az előzetesen adott sorrend-preferenciák (elsődlegesen sorolandó tömbök, „kényszer-színezések” – lásd: Kartográfia) egyidejű figyelembevétele is. ...

A döntéshozók

Asia Center építési projekt, I. kivitelezési ütem („Fiú” és „Lány” épületrészek), kivitelezés; illetve: II. kivitelezési ütem („Apa” épületrész) kivitelezés előkészítés:

Matusek Géza, területi igazgató, STRABAG Építő Kft. 48. Direkció, projektvezető;
 Lázár József, főépítésvezető, STRABAG Építő Kft. 48. Direkció, projektvezető helyettes;
 Varga Róbert MBA, főép.vez., STRABAG Építő Kft. 48. Direkció, szerkezetépítési főép.vez.;
 Pethő Csaba, irodavezető helyettes, UVATERV Rt., vb. alaplemez kiviteli tervek;
 Tatai Erika, UVATERV Rt., vb. alaplemez kiviteli tervek;
 Dr. Vattai Zoltán A., BME Építéskivitelezési Tszk., szoftverfejlesztés és szak-konzultáció.

Hivatkozott irodalom

- [1] Joseph J. Moder, Cecil R. Phillips, Edward W. Davis, *Project Management with CPM, PERT and Precedence Diagramming*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1983
- [2] *Deterministic and stochastic scheduling, Proceedings of the NATO Advanced Study and Research Institute on Theoretical approaches to scheduling problems held in Durham, England, 1981*, ed. by M. A. H. Dempster, J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan