TÉZISFÜZET

Mátrix-alapú projekttervezési módszer többszintű projektkörnyezethez

Szerző:
NOVÁK Gergely Lajos

Témavezető:
Prof. Dr. habil. KOSZTYÁN Zsolt Tibor

PANNON EGYETEM

Veszprém
2023

1 Bevezetés

A projektek egyre inkább meghatározzák társadalmunkat (Godenhjelm és tsai., 2015). A világgazdaság megközelítőleg 40%-a projekteken alapul, a projektmenedzsment pedig a termékek és szolgáltatások létrehozásának alapvető folyamatává vált (Turner és tsai., 2010). A dinamikusan változó környezet és a növekvő komplexitás miatt a vállalatok 84%-a úgynevezett multiprojekt környezetben, egyszerre több projektet hajt végre (Lova és tsai., 2000). A főleg egyedi-projektekre fókuszáló menedzsmentszemlélet lassú paradigmaváltása a multiprojekt környezet kihívásait a mai napig nem oldotta fel. Számos kutatás jutott arra a megállapításra, hogy a bizonytalanságokkal terhelt (Hazır és Ulusoy, 2020), valamint idő tekintetében is egyre intenzívebb projektek (Söderlund, 2005) sikerének növelése érdekében (Johnson, 2020) a hagyományos projektmenedzsment módszereket mindinkább a rugalmas megközelítések váltják fel (Ciric és tsai., 2019; Hidalgo, 2019; Özkan és Mishra, 2019; Wysocki, 2019), immár az információs technológia területein kívül is (Stare, 2014; Yasaman és tsai., 2022).

Miközben a projektek tervezésének és ütemezésének fontossága változatlan (Serrador, 2013), az újabb módszerek iránti igény számos kutatást ihletett, ugyanakkor a rugalmas megközelítések területén nagy hiány mutatkozik (Pellerin és Perrier, 2019). Ezen feltörekvő megközelítések olyan rugalmas projektterveket kívánnak meg, amelyekben lehetőség van a projektstruktúra átrendezésére és a tevékenységek prioritásának átértékelésére a vevői követelményeknek megfelelően; míg a legtöbb projekttervezési módszer rögzített logikai tervet (Franco-Duran és Garza, 2019), vagy csak bizonyos számú ütemezési alternatívát feltételez (Čapek és tsai., 2012; Creemers és tsai., 2015; Hauder és tsai., 2020; Kellenbrink és Helber, 2015; Servranckx és Vanhoucke, 2019; Tao és Dong, 2018). Szerkezetüket tekintve rugalmas és többszintű projektek ütemezéséhez is léteznek már mátrix-alapú módszerek (Kosztyán, 2015; Kosztyán és Szalkai, 2020), amelyek bizonyos tevékenységek végrehajtását és a rákövetkezések bekövetkezését változókként kezelik a tervezési fázisban.

Ugyanakkor nem érhető el még olyan projektadatbázis, amely a rugalmas (multi)projektek létrehozását, tervezését és ütemezését támogatná, sem pedig olyan komplexitásra, időre, valamint erőforrásokra vonatkozó indikátorhalmaz, amely képes lenne a rugalmas projekttervek tulajdonságait jellemezni. Annak ellenére, hogy a projektekkel kapcsolatos adatok alapvető részét képzik a kutatásoknak, a legtöbb projektadatbázis gyakran elérhetetlen, heterogén annak formátumát és tulajdonságait tekintve. Kiemelt fontosságú tehát a kutatók és gyakorló szakemberek számára ezen adatbázisok és projektindikátorok biztosítása, lehetővé téve a rugalmas projektek kutatását.

Ezen okokból kifolyólag jelen kutatásnak négyes célkitűzése volt:

- ✓ Kidolgozni egy olyan mátrix-alapú módszert, amely képes
  - [+] különálló és többszintű projektek,
  - [+] több végrehajtási mód,
  - [+] valamint rugalmas projektek kezelésére a hagyományos projektek mellett.
- ✓ Összegyűjteni a meglévő, heterogén projektadatbázisokat, beleértve a:
  - [+] szimulált (mesterséges),
  - [+] és valós projektadatbázisokat.
- ✓ A rugalmasság hatásainak vizsgálata, ideértve a projektstruktúra mellett a különböző projektigényekre gyakorolt hatásokat is.
- ✓ A (multi)projekttervek hatékony tervezését támogató keretrendszer kialakítása.

2 Kutatási kérdések

Tekintve a téma jelentőségét, valamint a korábban említett célkitűzéseket, jelen dolgozat a következő kutatási kérdésekre keresi a választ:

KK1: Hogyan hozható létre egy olyan egységes modell, amely képes a szakirodalomban fellelhető, heterogén projekt és multiprojekt adatbázisokat reprezentálni?

KK2: Hogyan modellezhető a projektek és multiprojektek terveinek rugalmassága?

KK3: Mi jellemzi a rugalmas projektek és multiprojektek terveinek topológiáját (struktúráját), valamint különböző igényeit?

KK4: Hogyan lehetséges olyan megengedett, optimumközeli megoldást találni a projektek és multiprojektek terveihez, amely figyelembe veszi azok rugalmasságát?

3 Szakirodalmi háttér és kutatási feltételezések

Flexibilis többszintű projektmenedzsment és mátrix-alapú ütemezés
Az agilis projektmenedzsment népszerűsége mára már túlmutat a szoftverfejlesztés keretein (Bergmann és Karwowski, 2018; Bianchi és tsai., 2018; Conforto és tsai., 2014; Owen és tsai., 2006) és alkalmazkodik a projekt későbbi szakaszaiban is adódó bizonytalansághoz, változásokhoz. Olyan priorizált követelményekre és tevékenységekre helyezi a hangsúlyt, amelyek időben a legtöbb üzleti értéket biztosítják,

miközben a hagyományos projektmenedzsment a változások előrejelzésére, minimalizálására törekszik (Ciric és tsai., 2019) és a formális tervezési módszerekre fókuszál. A többszintű projektkörnyezetben (multi)projektek, programok és portfóliók ütemezése válik szükségessé. A projektek változó méretekkel, fontossággal, szükséges képességekkel, készültségi fokkal és végrehajtási fázisokkal, általában megosztott és szűkös erőforrásokkal rendelkeznek (Fricke és Shenbar, 2000). A többszintű projektek menedzsmentje jelentős kihívást jelent, amely alapvetően különbözik a különálló- vagy másnéven egyedi-projektek menedzsmentjétől (MacAskill és Guthrie, 2017).

A hagyományos (hálózatos) projekttervezési eszközök (lásd pl. Eisner, 1962; Kelley Jr, 1961; Roy, 1962; Wiest, 1981) többé nem képesek a vállalatok stratégiai döntéseinek kielégítő támogatására (Kosztyán, 2012). A többszintű projekteket támogató, relatíve kevés algoritmus a hagyományos ütemezési módszertant követi, ahol a tevékenységek előre rögzített végrehajtási sorrenddel rendelkeznek (Pellerin és Perrier, 2019). A mátrix-alapú projekttervezés a hagyományos tervezés gyengeségeit küszöböli ki; lehetővé téve agilis és hibrid projektek tervezését is. Ezen mátrix-alapú módszerek többsége az úgynevezett design (vagy dependency) structure matrix (DSM) módszeren alapulnak (Kosztyán, 2015; Steward, 1981). A DMM (domain mapping matrix) a DSM bővített változata, amely több DSM összekapcsolására képes (Danilovic és Browning, 2007). Kosztyán (2015) fejlesztette ki a PDM-et (project domain matrix), amely egy vagy több végrehajtási móddal rendelkező projektterveket is támogat. A PDM továbbá lehetővé teszi kötelezően végrehajtandó vagy prioritással rendelkező, kiegészítő tevékenységek és a köztük levő rugalmas rákövetkezések alkalmazását. Kosztyán (2020) később továbbfejleszti ezt a mátrix-alapú modellt többszintű projektek, programok és portfóliók támogatásához. Ez a mátrix-alapú multiprojekt menedzsment modell az M^4.

Erőforrás-korlátos (multi)projekt-ütemezési probléma

A klasszikus erőforráskorlátos projektütemezési feladat (RCPSP, vagyis resource-constrained project scheduling problem) során tevékenységek egy halmazát kell ütemeznünk, figyelembe véve a rákövetkezési relációkat és erőforráskorláto(ka)t, egy adott célfüggvény optimalizálás érdekében, amely lehet például a projekt teljes időtartamának minimalizálása. A probléma egzakt és heurisztikus megoldási módszereit, valamint többféle kiterjesztését is vizsgálták. Hartmann és Briskorn (2021) tekinti át és osztályozza a problémát és annak legfontosabb változatait.

A probléma egy fontos kiegészítése az erőforráskorlátos multiprojekt ütemezési probléma (RCMPSP), amikor is több projekt ütemezése a cél, mégpedig az általuk használt közös erőforrásokra vonatkozó korlátok figyelembevételével. A különböző változatokat tartalmazó áttekintést lásd a Hartmann és Briskorn (2021), Issa és Tu (2020) és Van Eynde és Vanhoucke (2020) cikkeiben. Az ezekhez köthető különböző módszereket és jellemzőiket Sánchez és tsai. (2022) mutatja be.

Projektek rugalmassága

Rugalmasság alatt alapvetően az ütemezéssel kapcsolatos döntések mozgásterét értjük (a különböző definíciókat Bernardes és Hanna (2009) tekinti át). (Multi)projektek ütemezésekor többféle rugalmassággal is találkozhatunk, ilyen például az idővel kapcsolatos, vagy ütemezési rugalmasság, amely jellemzően a tartalékidőkkel való szabad gazdálkodásból (lásd Tavares (1999) és Vanhoucke, Coelho, Debels és tsai. (2008)) adódik, és a hagyományos projekttervek esetében is megfigyelhető.

A második típus a tevékenységek, feladatok végrehajtási módjaiból adódó rugalmasság, ahol a tevékenységek különböző végrehajtási módokkal (például technológia) rendelkeznek és ennek megfelelően eltérő igényeket, szükségleteket (például idő, költség, erőforrás, minőség stb.) támasztanak. Čapek és tsai. (2012), Kellenbrink és Helber (2015) és Tao és Dong (2018) az eredeti RCP(M)SP problémát alternatív tevékenységláncokkal egészítette ki, létrehozva ezzel az RC(M)PSP-AC problémát, amit Hauder és tsai. (2020) időbeli rugalmassággal bővített (RCMPSP–ACTF).

A harmadik típusú rugalmasság a rákövetkezésekkel kapcsolatos. Néhány függőséget, rákövetkezést elhagyhatunk, amennyiben a projekt tevékenységének technológiája nem kívánja meg a tevékenységek szoros sorrendjét. A függőségi kapcsolat elhagyása feloldja a soros végrehajtás korlátját és engedi az érintett tevékenységek párhuzamos vagy tetszőleges, relatív sorrendben történő végrehajtását.

A negyedik típus a tartalombeli rugalmasság, ahol néhány alacsony prioritású tevékenységet elhagyhatunk vagy eltolhatunk időben, akár egy későbbi projektbe. Ez az utóbbi két rugalmasságtípus jellemzően, de nem kizárólagosan az agilis projektek esetén jelenik meg (Kosztyán, 2015) és a projekt logikai struktúrájára, szerkezetére van hatással. A rákövetkezésekben és tartalomban való rugalmasságot együttesen strukturális flexibilitásnak nevezzük, amelyet jelen kutatás keretein belül kiemelten vizsgálok.

Projektadatbázisok

A projektadatbázisok kulcsszerepet játszanak a különböző ütemezési és erőforrásallokációs algoritmusok és módszerek kutatásában (Brucker és tsai., 1999; Hartmann és Briskorn, 2010, 2021), hiszen lehetőséget teremtenek új módszerek kifejlesztéséhez és összehasonlításához (Franco-Duran és Garza, 2019). A projektekadatbázisok tartalmazhatnak különálló projekteket, amilyen a Patterson (Patterson, 1976), az SMCP és SMFF (Kolisch és tsai., 1995), a PSPLIB (Sprecher és Kolisch, 1996), az RG300 és RG30 (Debels és Vanhoucke, 2007; Vanhoucke, Coelho, Debels és tsai., 2008), a Boctor (Boctor, 1993), az MMLIB (Peteghem és Vanhoucke, 2014), valamint Batselier és Vanhoucke (2015) valós projektadatbázisa. Többprojektes, vagy projektek halmazát tartalmazó adatbázis pedig az MPSPLIB (Homberger, 2007), a BY (Browning és Yassine, 2010a), az RCMPSPLIB (Vázquez és tsai., 2015) és az MPLIB (Van Eynde és Vanhoucke, 2020).

Projektindikátorok

A projektekkel kapcsolatos indikátorokat, mutatókat használhatjuk meglévő projekttervek osztályozásához, különböző jellemzőiknek megfelelően, vagy bemeneti paraméterként mesterséges projekttervek generálásához is. A projektekre vonatkozó indikátorokat két fő csoportra bonthatjuk. Az első csoport a projektstruktúrát jellemzi, beleértve annak komplexitását, a második csoport pedig az olyan projektigényeket, mint az erőforrás, idő és költség írja le. A szakirodalomban sokféle projektindikátorral találkozhatunk. A projektadatbázisokról Vanhoucke, Coelho és Batselier (2016) ad általános, átfogó képet. Multiprojektek esetében Browning és Yassine (2010b) tekinti át a különböző indikátorokat, amelyeket később Van Eynde és Vanhoucke (2020) egészít ki, jól mutatva ezzel az indikátorok kutatása iránt fennálló érdeklődést és a téma relevanciáját.

3.1 Kutatási feltételezések

A kutatási kérdések újbóli áttekintésével és a feltárt szakirodalom tükrében lehetőség nyílt a kutatási feltételezések megfogalmazására. A négy kutatási feltevés így a következő:

KF1: Kialakítható egy olyan modell, amely egységesíti az irodalomban fellelhető, eltérő formátumú projekt és multiprojekt adatbázisokat, beleértve az idő, költség, megújuló, valamint nem megújuló erőforrások és minőség igényekre vonatkozó paramétereket. A már létező adatbázisok bevehetőek és kiterjeszthetőek rugalmas tevékenységekkel és rákövetkezésekkel, egyetlen mátrix-alapú adatbázisba.

KF2: A már meglévő, hagyományos projekt és multiprojekt tervekből generálhatóak olyan rugalmas, a modellbe illeszkedő lehetséges struktúraváltozatok, amelyek támogatják a tervezési folyamatok fejlesztését.

KF3: Már létező projektmutatók topológiára, idő- és erőforrásigényekre vonatkozó rugalmas változatai megadhatóak rugalmas projektek és multiprojektek esetére a rugalmasság hatásainak vizsgálatához.

KF4: Lehetséges rugalmas, többszintű projektek ütemezése és optimumközeli megoldások megtalálása. Létrehozható olyan szimulációs keretrendszer, amely képes a kiegészítő tevékenységek és a rugalmas rákövetkezések kezelésére.

4 Eredmények, a kutatás tézisei

KK1: *Hogyan hozható létre egy olyan egységes modell, amely képes a szakirodalomban fellelhető, heterogén projekt és multiprojekt adatbázisokat reprezentálni?*

A heterogén projektadatbázisok egységesítéséhez egy mátrix-alapú modellt javaslok, amely Kosztyán (2015, 2020) M^4 modelljére épül, és az UMP (unified matrix-based project-planning model), vagyis az *egységes mátrix-alapú projekttervezési módszer* nevet kapta. A modell két kötelező, logikai (LD) és időre vonatkozó (TD), valamint négy kiegészítő tartományt (szaggatott vonallal jelölve) tartalmaz, lásd 1. ábra.

		Logic domain [LD]									Time domain [TD]			Cost domain [CD]			Quality domain [QD]			Nonrenewable resource domain [ND]							Renewable resource domain [RD]						
UMP		Project_A			...			Project_Z																									
		P_{A1}	...	P_{An}	...			P_{Z1}	...	P_{Zn}	T_1	...	T_k	C_1	...	C_k	Q_1	...	Q_k	N_{11}	...	$N_{1\eta}$	...	N_{k1}	...	$N_{k\eta}$	R_{11}	...	$R_{1\rho}$	...	R_{k1}	...	$R_{k\rho}$
Project_A	P_{A1}	a_{11}	...	a_{1n}							t_{11}	...	t_{1k}	c_{11}	...	c_{1k}	q_{11}	...	q_{1k}	μ_{111}	...	$\mu_{11\eta}$	...	μ_{1k1}	...	$\mu_{1k\eta}$	r_{111}	...	$r_{11\rho}$	...	r_{1k1}	...	$r_{1k\rho}$
	⋮	⋮	⋱	⋮																													
	P_{An}	a_{n1}	...	a_{nn}																													
⋮	⋮				⋱						⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Project_Z	P_{Z1}							z_{11}	...	z_{1n}																							
	⋮							⋮	⋱	⋮																							
	P_{Zn}							z_{n1}	...	z_{nn}	t_{n1}	...	t_{nk}	c_{n1}	...	c_{nk}	q_{n1}	...	q_{nk}	μ_{n11}	...	$\mu_{n1\eta}$	...	μ_{nk1}	...	$\mu_{nk\eta}$	r_{n11}	...	$r_{n1\rho}$	...	r_{nk1}	...	$r_{nk\rho}$

1. ábra. Az egységes mátrix-alapú projekttervezési modell (UMP) felépítése

LD A logikai tartomány egy $n \times n$ méretű mátrix, ahol n a tevékenységek száma. Minden egyes cella egy lehetséges értéket tartalmaz a [0,1] intervallumból.

TD Az időtartomány egy $n \times k$ méretű mátrix pozitív természetes számokkal, ahol k a végrehajtási módok számát jelöli.

Az első kötelező tartomány a logikai, $\mathbf{LD} \in [0,1]^{n \times n}$. Az **LD**-n belüli diagonálisban szereplő cellák a tevékenységek prioritásértékeit tartalmazzák. Ha ennek értéke 0, a tevékenységet elhagyjuk, ha az átlóban szereplő érték 1, a tevékenység kötelezően végrehajtandó. Ha az érték 0 és 1 közé esik, a feladat kiegészítő jellegű, vagyis a döntésnek megfelelően végrehajtható, elhagyható vagy halasztható.

Az átlón kívüli értékek a tevékenységek közötti rákövetkezéseket, függőséget jelentik. Ha a diagonálison kívüli érték, vagyis $a_{ij} = l_{ij} = [\mathbf{LD}]_{ij}$ $(i \neq j)$ értéke 1, az i-edik tevékenység megelőzi a j-edik tevékenységet. Abban az esetben, ha $l_{ij} = 0$, nincs rákövetkezési kapcsolat az i-edik tevékenység és a j-edik tevékenység között. Amennyiben $0 < l_{ij} < 1$, rugalmas kapcsolat van az i-edik és j-edik tevékenység között, amely azt jelenti, hogy az i-edik tevékenység megelőzheti, vagy akár követheti is a j-edik tevékenységet az adott menedzseri (vagy algoritmikus) döntés értelmében. Minden rugalmas megközelítés, amilyen az agilis, hibrid vagy extrém, megköveteli a tevékenységek közti rugalmas rákövetkezéseket (Ciriello és tsai., 2022; Fernandez és Fernandez, 2008).

Az UMP másik kötelező tartománya az idővel kapcsolatos. Az ebben a tartományban található pozitív értékek a lehetséges tevékenységidőket (hossz) reprezentálják. Minden tevékenységhez k-féle hossz társítható; amely értékek meg is egyezhetnek.

A további, kiegészítő tartományok a következők:

CD A költségtartomány egy $n \times k$ méretű nemnegatív mátrix, amely a tevékenységek költségeit tartalmazza

QD A minőségtartomány egy $n \times k$ méretű nemnegatív mátrix, amely a tevékenységek minőségparamétereit tartalmazza [0,1] között

ND A nem megújuló erőforrás(ok) tartománya, egy $n \times k \cdot \eta$ méretű nemnegatív mátrix a nem megújuló erőforrás(ok) igényeivel, ahol η a nem megújuló erőforrások számát jelöli

RD A megújuló erőforrás(ok) tartománya, egy $n \times k \cdot \rho$ méretű nemnegatív mátrix a megújuló erőforrás(ok) igényeivel, ahol ρ a megújuló erőforrások számát jelöli

Az összegyűjtött projektadatbázisok heterogének mind formátumukat, mind tulajdonságaikat tekintve. A kutatás részeként egy úgynevezett elemző (parzer) eszköz MATLAB környezetben történő megalkotásával (Mathworks, 2021), valamint a javasolt UMP-t felhasználva lehetséges volt a különböző adatbázisok egységesítése, amelyet az 1. táblázat foglal össze. Így az ehhez tartozó **KF1** elfogadható.

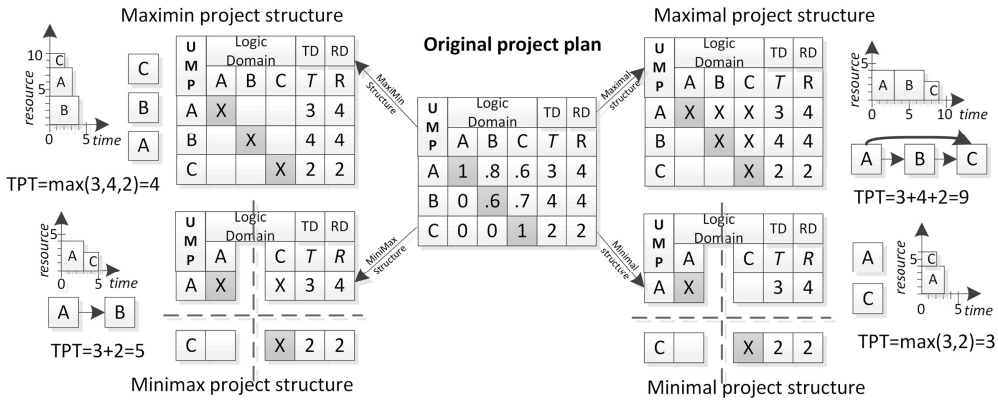
1. táblázat. A választott projekt-adatbázisok és jellemzőik (Forrás: saját szerkesztés)

Név	Projektterv	Végrehajtási mód	Projektek	Igények	Hivatkozás
Patterson	Generált	Egyféle	Különálló	Idő, megújuló erőforrások	Patterson, 1976
PSPLIB	Generált	Egyféle, többféle	Különálló	Idő, nem/megújuló erőforrások	Sprecher és Kolisch, 1996
RG30, RG300	Generált	Egyféle	Különálló	Idő, megújuló erőforrások	Vanhoucke, Coelho, Debels és tsai., 2008
SMCP, SMFF	Generált	Egyféle	Különálló	Idő, megújuló erőforrások	Kolisch és tsai., 1995
Boctor	Generált	Többféle	Különálló	Idő, megújuló erőforrások	Boctor, 1993
MMLIB	Generált	Többféle	Különálló	Idő, nem/megújuló erőforrások	Peteghem és Vanhoucke, 2014
Real-life	Gyűjtött	Egyféle	Különálló	Idő, költség, megújuló erőforrások	Batselier és Vanhoucke, 2015
MPSPLIB	Generált	Egyféle	Multi	Idő, megújuló erőforrások	Homberger, 2007
BY	Generált	Egyféle	Multi	Idő, költség, megújuló erőforrások	Browning és Yassine, 2010a
RCMPSPLIB	Generált	Egyféle	Multi	Idő, megújuló erőforrások	Vázquez és tsai., 2015
MPLIB1, MPLIB2	Generált	Egyféle	Multi	Idő, megújuló erőforrások	Van Eynde és Vanhoucke, 2020

KK2: *Hogyan modellezhető a projektek és multiprojektek terveinek rugalmassága?*

Mivel egyetlen adatbázis sem rendelkezik rugalmas projektstruktúrákkal, ezeket rögzített (fix) struktúrákból kellett létrehozni. A megadott flexibilitásparaméter ($fp \in [0,1]$) beállítása mellett a kötelezően végrehajtandó tevékenységeket és rögzített rákövetkezési relációkat a flexibilis struktúragenerátor (FSG) képes átalakítani. A fp által meghatározott arányban az eredetileg 1 értékkel rendelkező cellákat 1 és 0 közé eső értékre állítjuk. Ilyen módon a kiegészítő tevékenységek és a rákövetkezési relációk arányai megadhatóak. Amikor a kiegészítő tevékenységeket és a rugalmas kapcsolatokat elhagyjuk a projektekben (Kosztyán, 2015), azokat *minimális, minimal*, ha megtartjuk, akkor *maximális, maximal* projektstruktúráknak nevezzük, és $\mathcal{S}_{\text{min}}$ ($\mathcal{S}_{\text{max}}$) módokon jelöljük, ahogyan az a 2. ábrán bemutatott példán keresztül is látszik.

A legkorábbi kezdésre való ütemezés esetén a maximális (minimális) erőforrásigény akkor adódik, amikor minden kiegészítő tevékenységet megtartunk (kiveszünk) a projektből, míg minden rugalmas rákövetkezést kiveszünk (megtartunk) a projektstruktúrából. Ezért ezeket a struktúrákat *maximin (minimax) projektstruktúráknak* nevezünk és $\mathcal{S}_{\text{maximin}}$ ($\mathcal{S}_{\text{minimax}}$) módon jelölünk (lásd a 2. ábra bal oldalát).



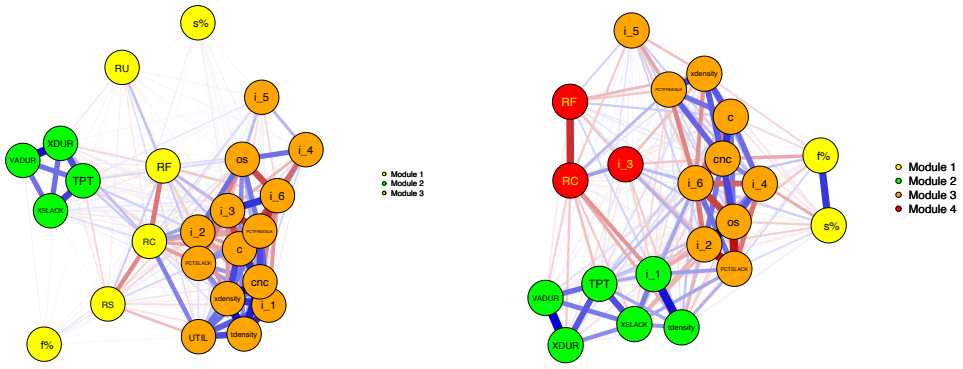
2. ábra. A rugalmas projektterv minimális, maximális, minimax és maximin struktúrái

Annak jelölésére, hogy a minimális, maximális, minimax és maximin struktúrák döntések eredményei, a kötelezően végrehajtandó feladatokat X, míg az elhagyott feladatokat és rákövetkezéseket üres cellák jelölik.

Miután a rugalmasságot beállítottuk, a minimális, maximális (esetünkben ez utóbbi az eredeti struktúrával egyezik meg), a minimax és maximin struktúrákat már hozzáadhatjuk az egyesített, mátrix-alapú projektadatbázishoz (compound matrix-based project database), vagyis a CMPD-hez, amellyel lehetőség nyílik a kiértékelésre, a tervezés felülvizsgálatára és fejlesztésére. Ennek eredményeképpen a **KF2** elfogadható.

KK3: *Mi jellemzi a rugalmas projektek és multiprojektek terveinek topológiáját (struktúráját), valamint különböző igényeit?*

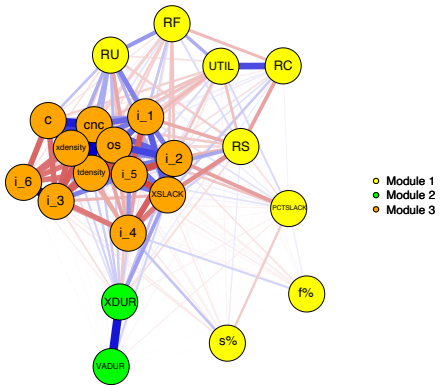
A Leiden féle modularitást (Traag és tsai., 2019) felhasználva, klaszterezett korrelációs gráfok segítségével kialakíthatóak voltak a különböző, projektekkel kapcsolatos indikátorcsoportok. A 3. ábra a különálló projektadatbázis indikátorainak klaszterezett korrelációs gráfját mutatja. A modulok közepén azon indikátorok találhatóak, amelyek más mutatókkal a leginkább korrelálnak. A széleken pedig olyanok, amelyek viszonylag kevés más indikátorral korrelálnak, kapcsolatuk a maradék mutatóval gyenge.



(a) A szimulált projektek esetében

(b) A valós projektek esetében (az $RS, UTIL$ nem számolható a korrelációs gráfhoz)

3. ábra. A egyes mutatók közti klaszterezett korrelációs gráfok [1]. Megj.: A korreláció erőssége arányos a csúcsok közti élek szorosságával. A kék (piros) él pozitív (negatív) korrelációt jelöl.

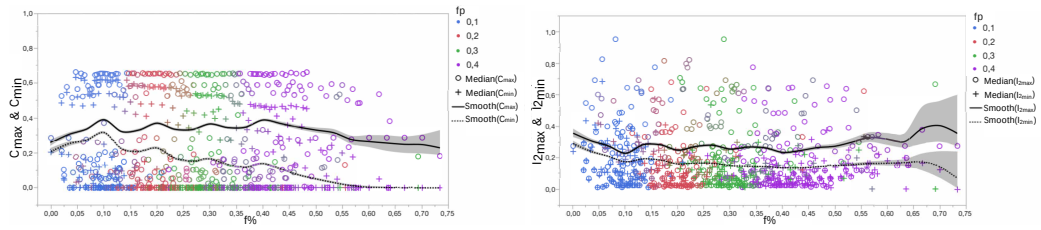


4. ábra. A multiprojekt adatbázis mutatóinak klaszterezett korrelációs gráfja. Megj.: a mutatók átlagos értékek.

A 3. ábra számos redundáns indikátort mutat, amelyek erősen korrelálnak, különösen a topologikus indikátorok (3-as modul). Ehhez képest a javasolt ($s\%, f\%$) rugalmasság indikátorok a periférián helyezkednek el (2-es modul), így ezeket nem szükséges összevonni. A szimulált adatbázisok moduljait jól meghatározzák a struktúrával, idővel és erőforrásokkal kapcsolatos indikátorok, ahol a komplexitás (C), erőforráskorlátosság (RC), és a projekthossz (TPT) központi szerepet játszik. Ezzel együtt a valós projektek adathalmaza már vegyesebb modulokat eredményezett. A szimulált és valós projektadatbázisok indikátorai közt szignifikánsabb különbségek látszanak, mint a különálló és multiprojekt adatbázisok mutatói közt. A multiprojekt adatbázisok indikátorai szintén 3 modult alkotnak.

A rugalmasság figyelembevételével nem csupán az egyes indikátorértékek intervallumai bővültek, de új értékpárok is létrejöttek a csatolt indikátorokhoz. A multiprojekt adatbázisok indikátorainak értelmezési tartományai szintén bővültek.

A projekttopológiát tekintve az 5. ábra a komplexitás (C) és a párhuzamosság (I_2) indikátorértékeit hasonlítja össze a minimális és maximális struktúrákkal a rugalmas rákövetkezések arányának függvényében ($f\%$) (ahogyan az a vízszintes tengelyen is jelölve van).

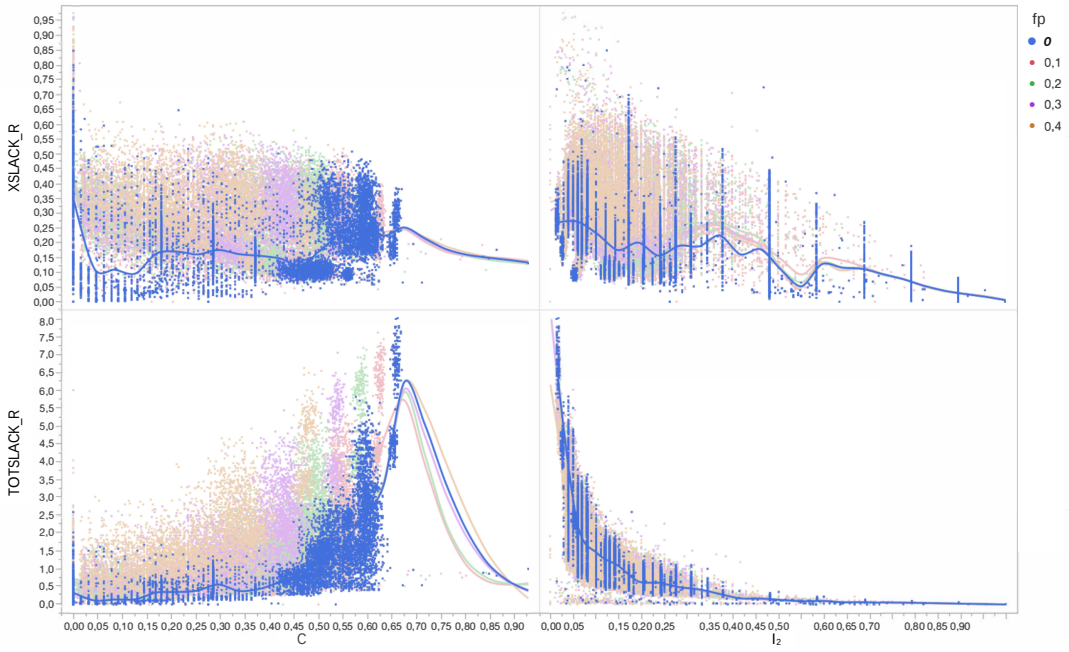


(a) Rugalmasság és komplexitás kapcsolata (b) Rugalmasság és párhuzamosság kapcsolata

5. ábra. Strukturális változások a komplexitást és párhuzamosságot illetően

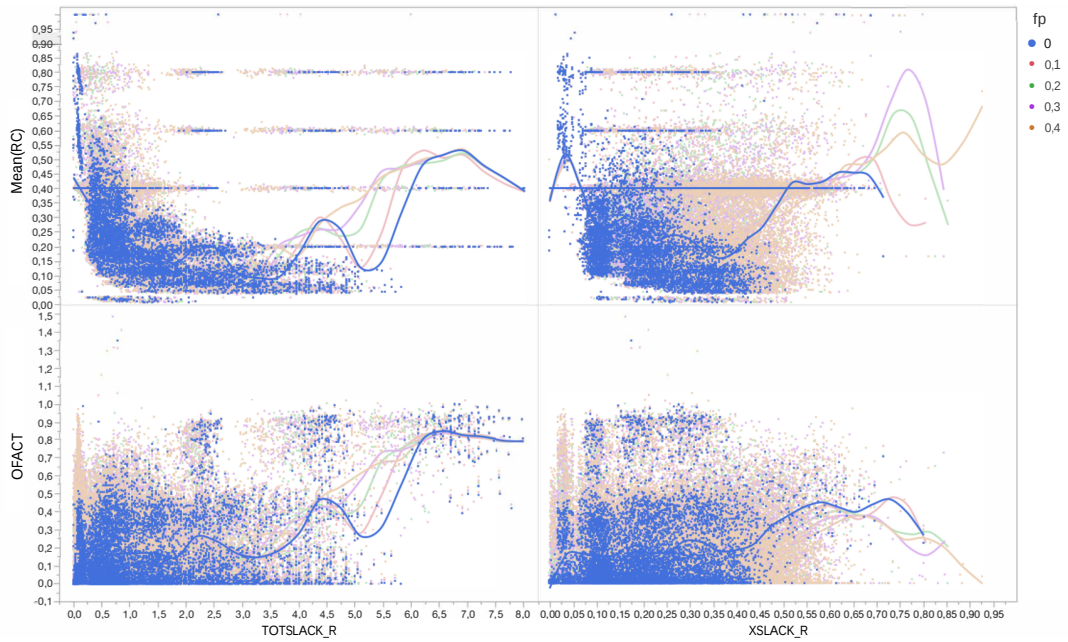
Az 5. ábra azt mutatja, hogy a rugalmasságra vonatkozó paraméter (fp) növelésével a rugalmas rákövetkezések aránya ($f\%$) is növekedett a minimális struktúrákra vonatkozóan, ezzel együtt a komplexitás (C) csökkent (lásd az 5(a) ábrát), hasonlóképpen a soros végrehajtások is csökkentek (lásd az 5(b) ábrát). Ezek az eredmények összhangban vannak a rugalmas projektmegközelítésekkel szemben támasztott, projektek komplexitásának csökkentésére vonatkozó követelményekkel (Williams, 2010).

A 6. ábra az időre vonatkozó, teljes tartalékidő-arány (TOTSLACK-R) és az átlagos tartalékidő-arány (XSLACK-R) indikátorpárokat mutatja a függőleges tengelyen, a strukturális indikátorokat pedig a vízszintes tengelyen.



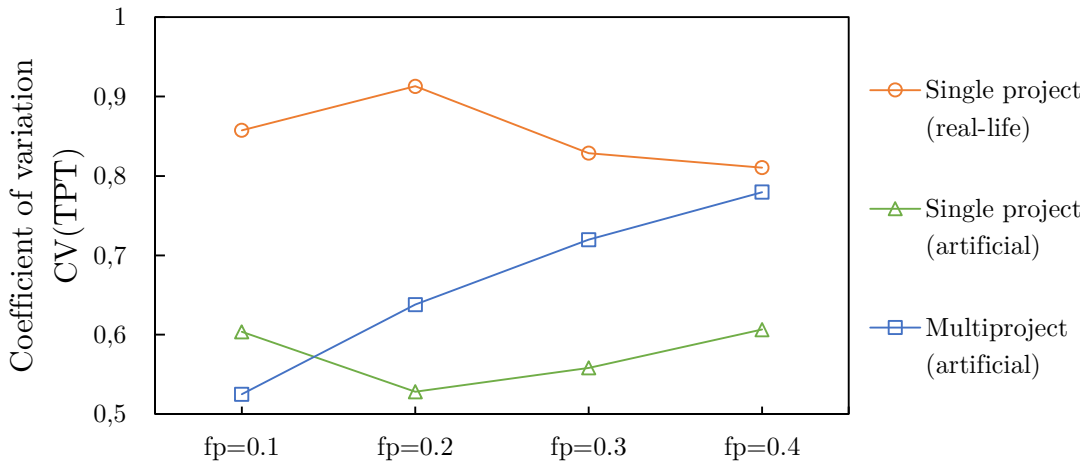
6. ábra. A rugalmasság hatása az időre és a komplexitásra vonatkozó indikátorok közötti kapcsolatra

A 7. ábra az időre és az erőforrásokra vonatkozó indikátorok közti kapcsolatot mutatja be, a legkorábbi kezdésre való ütemezés esetén. A rugalmas projektek minimális struktúráit figyelembevéve az erőforráskorlátosság és az erőforráskorlátoltsági-tényező indikátorainak növekedését mutatja. Ezek az idővel és erőforrással kapcsolatos indikátorkombinációk csakis a rugalmas projekttervek esetén voltak megfigyelhetőek.



7. ábra. A rugalmasság hatása az időre és erőforrásokra vonatkozó indikátorok közötti kapcsolatra

Az összes elérhető adatbáziscsoportban megvizsgáltam a hagyományos módszerekhez képest a rugalmas megközelítések teljes projekthosszra (TPT) gyakorolt hatását. Ehhez minden flexibilis (vagyis az $fp = \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4\}$) esethez a hagyományos módszerekhez (vagyis az $fp = 0$ esethez) viszonyított varianciákat számoltam. Ezt követően a variációs együtthatót (CV) felhasználva lehetséges volt a szórásnégyzetek mértékének megmutatása, a teljes minta (populáció) átlagához képesti összehasonlításban.



8. ábra. A variációs együtthatók értékei a teljes projekthosszok átlagaira és az egyes flexibilitás-paraméterekre vonatkozóan, a különböző adatbáziscsoportokban

Ahogyan azt a 8. ábra mutatja, a mesterséges multiprojektadatbázisok rendelkeznek a legalacsonyabb kezdeti variációval, hasonlóan a különálló projektadatbázisokéhoz. A valós különálló projektek viszonylag magas kezdő variációval rendelkeznek a mesterséges, különálló vagy multiprojektekhez képest is. A különálló, mesterséges vagy valós projektadatbázisokhoz tartozó görbék nem szolgálnak egyértelmű következtetéssel, míg a multiprojektek esetében az átlagos teljes projekt átfutási idők variációja folyamatosan növekedik, amely azt mutatja, hogy ezek a hosszok kevésbé jósolhatóak és ezáltal nehezebben is tervezhetőek más projektek által. A meglévő leíró statisztikákon felül regresszió segítségével is modelleztem a rugalmasság és a multiprojektek átlagos hossza közti kapcsolatot. A rugalmasság különböző hatásainak kiértékelésével a **KF3** elfogadható.

KK4: *Hogyan lehetséges olyan megengedett, optimumközeli megoldást találni a projektek és multiprojektek terveihez, amely figyelembe veszi azok rugalmasságát?*

Annak megmutatásához, hogy az FSG segítségével kapott rugalmas projekttervek megoldhatóak közel optimális eredménnyel a meglévő algoritmusok által is, az NP-nehéz (Lenstra és Rinnooy Kan, 1978) erőforráskorlátos multiprojekt ütemezési feladatot (Pritsker és tsai., 1969) kell megoldanunk.

A bemutatott esettanulmányban ehhez egy empirikus, vállalati multiprojekttervet választottam. Az erőforráskorlátos multiprojekt ütemezési probléma bonyolult természetéből eredően valamint a nagyszámú, erősen erőforráskorlátos tevékenységek miatt ebben a kutatásban metaheurisztikus módszerek alkalmazását javasoltam a szakirodalommal összhangban (Pellerin, Perrier és Berthaut, 2020), amely módszerrel optimumközeli megoldás érhető el. A jelen kutatás részeként fejlesztett szimulációs keretrendszer az OptQuest™ kereskedelmi optimalizálómotort használja.

A rugalmas multiprojekt-tervből fix struktúrák generálódtak. Az optimalizálást az átlagos multiprojekt átfutási idejének minimalizálásával (mint célfüggvény), és az

erőforráskorlátok figyelembevételével végeztem el. A maximális (eredeti) struktúra átlagos projekthossza 0.5%-kal növekedett, mire az eredetileg nem megengedhető megoldás erőforráskorlátja többé már nem sérült. Ez azt sugallja, hogy a vállalat projekttervezése viszonylag optimista volt. A maximin struktúra az átlagos projekthosszt tekintve 5.14%-kal, a minimax megközelítőleg 24.77%-kal, míg a minimális struktúrával 31.31% csökkenés volt elérhető, amit a 2. táblázat foglal össze. Lehetséges volt tehát optimumközeli megoldást találni az összes megadott struktúra esetében, aminek következtében a **KF4** elfogadható.

2. táblázat. A szoftverfejlesztési multiprojekt lehetséges struktúráinak ütemezési eredményei

Struktúra	Projektek	Tevékenységek	Rákövetkezések	Erőforráskorlátok α_1, α_2	$\overline{TPT}_{EST}$	$\overline{TPT}_{OPT}$	$TPT_{EST}^{portfolio}$	$TPT_{OPT}^{portfolio}$
Maximal	5	150	49	55; 45	213	214*	413	413*
Maximin	5	150	38	55; 45	157	203*	357	390*
Minimax	5	100	28	55; 45	147	161*	347	361*
Minimal	5	100	22	55; 45	115	147*	315	338*

*Megjegyzés: *megengedett erőforrás-allokáció*

5 A kutatás tézisei

A kutatási kérdéseket, feltételezéseket, valamint a hozzájuk kapcsolódó eredményeket figyelembe véve négy fő tézist fogalmaztam meg.

T1: [Modell] A javasolt, egységes mátrix-alapú projekttervezési modell (UMP) mind hagyományos, mind rugalmas projektek, multiprojektek és programok terveit képes reprezentálni. Kezeli az idő, költség, megújuló, valamint nem megújuló erőforrások és minőség igények paramétereit, egy, vagy több végrehajtási mód esetében is.

T2: [Struktúrák] A flexibilis struktúra generátor (FSG) képes megadott flexibilitási paraméter szerint minimális, minimax, maximin és maximális mátrix-alapú struktúrákat létrehozni, amelyek a modellbe illeszthetőek. A projektek tervezési fázisa fejleszthető ezen kimenetek és igényeik figyelembevételével.

T3: [Indikátorok] Kapcsolat van a modellezett rugalmasság és a topológia, idő, valamint az erőforrások indikátorai között.

T3.1: [Topológia] A rugalmasság arányának növelésével a strukturális indikátorok csökkenő komplexitást és csökkenő soros végrehajtási sorrendet (növekvő párhuzamos végrehajtási sorrendet) mutatnak a minimális struktúrák esetében.

T3.2: [Idő] A rugalmasság arányának növelésével az idővel kapcsolatos indikátorok csökkenő projekt átfutási időt és növekvő átlagos tartalékidő-arányt mutatnak.

T3.3: [Erőforrások] A rugalmasság arányának növelésével az erőforrásokhoz kapcsolódó indikátorok magasabb átlagos erőforráskihasználtságot és magasabb erőforráskorlátoltságot mutatnak a legkorábbi kezdésre való ütemezés esetében.

T3.4: [Tervezés] A rugalmasság negatív hatással van a multiprojektek tervezhetőségére azáltal, hogy az átlagos átfutási idők varianciáját a hagyományos megközelítéshez képest szignifikánsan növeli, így a multiprojektek hossza kevésbé kiszámíthatóvá válik.

T4: [Megoldás] A javasolt minimális, minimax, maximin és maximális struktúrákkal lehetőség nyílik többszintű projekttervek determinisztikus változatainak megadására a kiegészítő tevékenységek és rugalmas rákövetkezések figyelembevételével, majd ezek rugalmas vagy hagyományos módszerekkel, algoritmusokkal történő megoldására. Optimumközeli megoldás található a (multi)projekt átfutási idejének minimálásával vagy egyéb célfüggvényekkel, amennyiben az időre, erőforrásokra, költségre vonatkozó korlátok azt megengedik.

A **T1; T2; T3; T3.1; T3.2;** és **T3.3** tézisek eredményei a Kosztyán, Novák és tsai. (2022) publikációban is megjelentek.

6 Összefoglalás

Jelen disszertáció egy kvantitatív megközelítést használva mutatja be a rugalmasság különböző indikátorokra és projektadatbázisokra gyakorolt hatásait, egy esettanulmánnyal kiegészítve azt. A kutatás elején kitűzött célok sikeresen teljesültek.

A heterogén projektadatbázisok modellezésére egy egységes mátrix-alapú projekttervezési modellt (UMP) javasoltam. A meglévő projektadatbázisok szakirodalomból való kombinálásához egy egyesített mátrix-alapú projektadatbázist (CMPD) javasoltam, amely képes a rugalmasság kezelésére is. Ezen felül, flexibilis struktúra generátort (FSG) javasoltam a meglévő projektadatbázisok kiterjesztéséhez, megadott struktúrákkal és flexibilitási paraméter szerint. Az agilis tervezést alkalmazó vállalatok gyakran csupán múltbéli tapasztalatokra alapozva hoznak döntéseket a kiegészítő (priorizált) tevékenységek és a rugalmas rákövetkezéseket illetően. Az általam definiált struktúrák javíthatják a projektek tervezését, azok attribútumainak és igényeik figyelembevételén keresztül. Hagyományos algoritmusokkal is lehetőség nyílt tesztelni a rugalmas projektmenedzsment környezetet, strukturális és más igényekkel kapcsolatos indikátorértékek új kombinációin keresztül. A modellt, a feltételezéseket és az eredményeket egy empirikus esettanulmány segítségével validáltam egy autóipari vállalat szoftverfejlesztési multiprojektjén.

A javasolt UMP különálló és multiprojekteket, egy, vagy több végrehajtási módot, megújuló- és nem megújuló erőforrásokat, költség- és minőségparamétereket, valamint hagyományos és rugalmas projektterveket is támogat. Az egységesített

adatbázis (CMPD) mind mesterséges (szimulált), mind pedig valós projektek adatait tartalmazza. A létrehozott parzer egy vagy több végrehajtási módot is képes kezelni. A javasolt CMPD tágabb értéktartományokat biztosít a projektütemező és erőforrásallokáló algoritmusok teszteléséhez, a hozzáadott rugalmasság következtében. A parzerek, generátorok és mutatók elérhetőek a GitHub-on. A kutatást a 3. táblázat foglalja össze.

6.1 Hozzájárulás a szakirodalomhoz

Jelenleg egyetlen adatbázis sem segíti a strukturálisan rugalmas projektek tervezését és ütemezését, valamint a rugalmas projekttervek jellemzésére alkalmas mutatók sem léteznek. Ez a kutatás ezeket a hiányosságokat hivatott pótolni. A szakirodalomhoz való hozzájárulás az alábbiakban foglalható össze.

1. Egy egységes, mátrix-alapú projekttervezési modellt (UMP) javasoltam heterogén, különálló és multiprojekt adatbázisok egyesítéséhez, egy mátrix-alapú, egyesített projektadatbázisba (CMPD).

2. A javasolt CMPD-t kiegészítettem rugalmas rákövetkezések és a végrehajtáshoz köthető prioritások modellezésének lehetőségével.

3. Minimális, minimax, maximin és maximális struktúrákat generáltam a minimális és maximális igények meghatározásához a javasolt rugalmas struktúragenerátorral (FSG).

4. A struktúrához, az időhöz és az erőforrásokhoz kapcsolódó mutatókat módosítottam, hogy figyelembe vegyék a projektek rugalmas jellegét.

10 projektadatbázist, köztük 22 adathalmazt kombináltam egy egyesített, mátrix-alapú projektkönyvtárba olyan forrásokból, mint a Patterson, SMCP és SMFF, PSPLIB, RG300 és RG30, Boctor, MMLIB, MMLIB+, valamint egy valós projektadatbázis. További 5 multiprojekt adatbázist, mint a BY, RCMPSPLIB, MPSPLIB, MPLIB1, MPLIB2 és 10 adathalmazt egyesítettem.

Jelen kutatás az egyes adatbázisok bővítésének egy lehetséges megoldását mutatja be rugalmas jellegű projektek esetében. A disszertáció az egyes projektek komplexitás, idő- és erőforrás-mutatóinak rugalmas változatait is megadja, amelyek multiprojektre is alkalmazhatók. Betekintést nyújt a különböző adatbázisok jellemzőibe a módosított mutatók segítségével, ezenkívül megvizsgálja több végrehajtási mód különálló projektre gyakorolt hatását és a projektek rugalmasságának hatásait.

6.2 Gyakorlati vonatkozások

A javasolt mátrix-alapú modell költségeket, nem/megújuló erőforrásigényeket és minőségi paramétereket is támogat, valamint többféle végrehajtási módot és többszintű projekteket is kezel.

Nem csupán egyesíti a heterogén adatbázisokat, hanem lehetővé teszi a felhasználó számára a hagyományos és rugalmas projektütemezési algoritmusok tesztelését is. Tesztelés terén az egyes adatbázisok indikátortartományainak bővítésével új

lehetőségek nyílnak. A módszer hidat képez a hagyományos és rugalmas megközelítések között az előre definiált struktúrák segítségével.

A javasolt szimulációs keretrendszer kvantitatív alapként szolgál a többszintű projekttervezéshez, újratervezéshez és az ezekhez kapcsolódó döntésekhez. Lehetőség nyílik a választott rugalmas projektváltozatok hatásainak vizsgálatára, a megvalósíthatóság, tartalmi, idő, erőforrás stb. igények figyelembevételével, több projektre vonatkozóan is. A metaheurisztikus optimalizálás segítségével képes közeloptimális megoldást találni (amennyiben azt a korlátok engedik) adott célfüggvény szerint, többszintű projektek esetén is. A tervezési folyamat tovább javítható a rugalmas projekttervek érzékenységvizsgálatával. A szimulációs szoftver intuitív grafikus felülettel rendelkezik többféle, projektre vonatkozó beállítással és vizualizációs lehetőséggel. Ilyen például az egyes projektek egyedi, vagy összevont erőforrásterhelési profilja, átfutási idők diagramja stb.

A kutatás részeként kifejlesztett parzerrel korábban hiányzó, vagy a szakirodalomban nem megfelelően dokumentált formátumokat is sikerült visszafejteni, egyben dokumentálni. Az újonnan bevezetett és módosított mutatókkal lehetőség nyílik különböző projektvariánsok összehasonlítására a definiált struktúrák segítségével. A strukturális, komplexitás, idő, erőforrás (költség) mutatók támogatják a többszintű projekttervek jellemzését, összehasonlítását. Lehetséges korábbi tapasztalatok, például sikeres projektek értékeivel való összehasonlítás, vagy más iparágakból származó projektek értékeinek kiértékelése (akár a valós projektadatbázis segítségével).

A nyílt adatbázis megoldást nyújt az adatok korábban nehézkes hozzáférhetőségére és értelmezésére, csökkenti a további kutatások gyakori belépési korlátait (idő, erőfeszítés, speciális tudás igénye). A kompozit adatbázis és annak eredményei garantáltan reprodukálhatóak (Kosztyán és Novák, 2022a,b), továbbá a karbantartás és az ellenőrzésre szánt idő minimalizálható az egységes formátum és a kifejlesztett egységtesztek segítségével. Ez segít a későbbiekben a tudományos és szakmai közösség által várhatóan hozzáadott részek ellenőrzésében is. A kutatás reményeim szerint felgyorsítja majd a kutatók és a gyakorlati szakemberek közötti együttműködést is.

Jelen kutatás számos új lehetőséget is magában hordoz. Ilyen például új mutatók kifejlesztése vagy a már meglévő mutatók szakirodalomból történő bővítése. Hasonlóképpen, új adatbázisok és formátumok is beépíthetőek lehetnek, ideértve a rugalmas változatokat is. Lehetséges újabb mesterséges projekttervek generálása a való életből vett mutatóértékek mentén, vagy korábbi projekttapasztalatok alapján. A mutatók alkalmasak akár célfüggvényként való használatra is, különböző optimalizálási feladatok során. A tevékenységek és függőségek rugalmasságának modellezéséhez további valószínűségi eloszlások vizsgálata is lehetséges volna. A projektprogramok vizsgálata a portfólión belül szintén ígéretes kutatási irány lehet.

Hivatkozások

Batselier, Jordy és Vanhoucke, Mario (2015). „Construction and evaluation framework for a real-life project database". *International Journal of Project Management* 33.3, 697–710. old.

Bergmann, Thomas és Karwowski, Waldemar (2018). „Agile project management and project success: A literature review". *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. Springer, 405–414. old.

Bernardes, Ednilson Santos és Hanna, Mark D (2009). „A theoretical review of flexibility, agility and responsiveness in the operations management literature: Toward a conceptual definition of customer responsiveness". *International Journal of Operations & Production Management*.

Bianchi, Mattia, Marzi, Giacomo, Dabic, Marina és tsai. (2018). „Call for Papers/Special Issue: Agile beyond software-In search of flexibility in a wide range of innovation projects and industries".

Boctor, Fayez Fouad (1993). „Heuristics for scheduling projects with resource restrictions and several resource-duration modes". *The international journal of production research* 31.11, 2547–2558. old. DOI: `10.1080/00207549308956882`.

Browning, Tyson R és Yassine, Ali A (2010a). „A random generator of resource-constrained multi-project network problems". *Journal of Scheduling* 13.2, 143–161. old. DOI: `10.1007/s10951-009-0131-y`.

Browning, Tyson R és Yassine, Ali A (2010b). „Resource-constrained multi-project scheduling: Priority rule performance revisited". *International Journal of Production Economics* 126.2, 212–228. old.

Brucker, Peter, Drexl, Andreas, Möhring, Rolf, Neumann, Klaus és Pesch, Erwin (1999). „Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods". *European journal of operational research* 112.1, 3–41. old. DOI: `10.1016/S0377-2217(98)00204-5`.

Čapek, R., Šůcha, P. és Hanzálek, Z. (2012). „Production scheduling with alternative process plans". *European Journal of Operational Research* 217.2, 300–311. old. ISSN: 0377-2217. DOI: `https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.09.018`.

Ciric, Danijela, Lalic, Bojan, Gracanin, Danijela, Tasic, Nemanja, Delic, Milan és Medic, Nenad (2019). „Agile vs. Traditional approach in project management: Strategies, challenges and reasons to introduce agile". *Procedia Manufacturing* 39, 1407–1414. old.

Ciriello, Raffaele Fabio, Glud, Jeppe Aagaard és Hansen-Schwartz, Kevin Helge (2022). „Becoming agile together: Customer influence on agile adoption within commissioned software teams". *Information & Management* 59.4, 103645. old. DOI: `10.1016/j.im.2022.103645`.

Conforto, Edivandro C, Salum, Fabian és Amaral, Daniel C (2014). „Can agile project management be adopted by industries other than software development?": *Project Management Journal* 45.3, 21–34. old.

Creemers, Stefan, Reyck, Bert De és Leus, Roel (2015). „Project planning with alternative technologies in uncertain environments". *European Journal of Operational Research* 242.2, 465–476. old. ISSN: 0377-2217. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.11.014.

Danilovic, Mike és Browning, Tyson R (2007). „Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices". *International journal of project management* 25.3, 300–314. old.

Debels, Dieter és Vanhoucke, Mario (2007). „A decomposition-based genetic algorithm for the resource-constrained project-scheduling problem". *Operations Research* 55.3, 457–469. old. DOI: 10.1287/opre.1060.0358.

Eisner, Howard (1962). „A generalized network approach to the planning and scheduling of a research project". *Operations Research* 10.1, 115–125. old.

Fernandez, Daniel J és Fernandez, John D (2008). „Agile project management—agilism versus traditional approaches". *Journal of Computer Information Systems* 49.2, 10–17. old. DOI: 10.1080/08874417.2009.11646044.

Franco-Duran, Diana M és Garza, Jesús M de la (2019). „Review of Resource-Constrained Scheduling Algorithms". *Journal of Construction Engineering and Management* 145.11, 3119006. old. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001698.

Fricke, Scott E és Shenbar, AJ (2000). „Managing multiple engineering projects in a manufacturing support environment". *IEEE Transactions on engineering management* 47.2, 258–268. old.

Godenhjelm, Sebastian, Lundin, Rolf A és Sjöblom, Stefan (2015). „Projectification in the public sector–the case of the European Union". *International Journal of Managing Projects in Business*.

Hartmann, Sönke és Briskorn, Dirk (2010). „A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem". *European Journal of operational research* 207.1, 1–14. old.

Hartmann, Sönke és Briskorn, Dirk (2021). „An Updated Survey of Variants and Extensions of the Resource-Constrained Project Scheduling Problem". *European Journal of Operational Research*.

Hauder, Viktoria A., Beham, Andreas, Raggl, Sebastian, Parragh, Sophie N. és Affenzeller, Michael (2020). „Resource-constrained multi-project scheduling with activity and time flexibility". *Computers & Industrial Engineering* 150, 106857. old. ISSN: 0360-8352. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106857.

Hazır, Öncü és Ulusoy, Gündüz (2020). „A classification and review of approaches and methods for modeling uncertainty in projects". *International Journal of Production Economics* 223, 107522. old.

Hidalgo, Enric Senabre (2019). „Adapting the scrum framework for agile project management in science: case study of a distributed research initiative". *Heliyon* 5.3, e01447.

Homberger, Jörg (2007). „A multi-agent system for the decentralized resource-constrained multi-project scheduling problem". *International Transactions in Operational Research* 14.6, 565–589. old.

Issa, S és Tu, Y (2020). „A survey in the resource-constrained project and multi-project scheduling problems". *Journal of Project Management* 5.2, 117–138. old.

Johnson, Jim (2020). „Chaos 2020: Beyond Infinity". *Standish Group*.

Kellenbrink, Carolin és Helber, Stefan (2015). „Scheduling resource-constrained projects with a flexible project structure". *European Journal of Operational Research* 246.2, 379–391. old. ISSN: 0377-2217. DOI: `https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.003`.

Kelley Jr, James E (1961). „Critical-path planning and scheduling: Mathematical basis". *Operations research* 9.3, 296–320. old.

Kolisch, Rainer, Sprecher, Arno és Drexl, Andreas (1995). „Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problems". *Management Science* 41.10, 1693–1703. old. DOI: `10.1287/mnsc.41.10.1693`.

Kosztyán, Zsolt T (2012). „Challenges of the project planning methods in the 21st century". *Problems of Management in the 21st Century* 5, 46–60. old.

Kosztyán, Zsolt T (2015). „Exact algorithm for matrix-based project planning problems". *Expert Systems with Applications* 42.9, 4460–4473. old.

Kosztyán, Zsolt T (2020). „An Exact Algorithm for the Flexible Multilevel Project Scheduling Problem". *Expert Systems with Applications*, 113485. old.

Kosztyán, Zsolt T és Szalkai, István (2020). „Multimode resource-constrained project scheduling in flexible projects". *Journal of Global Optimization* 76.1, 211–241. old.

Kosztyán, Zsolt Tibor, Novák, Gergely, Jakab, Róbert, Hegedűs, Csaba és tsai. (2022). „A matrix-based flexible multi-level project planning library and indicators". *DS 121: Proceedings of the 24th International DSM Conference (DSM 2022), Eindhoven, The Netherlands, October, 11-13, 2022*, 48–57. old.

Kosztyán, Zsolt Tibor és Novák, Gergely Lajos (2022. nov.a). *Project dataset parsers to matrix-based formats*. `https://www.codeocean.com/`. v1. verzió. DOI: `10.24433/CO.0837444.v1`.

Kosztyán, Zsolt Tibor és Novák, Gergely Lajos (2022. nov.b). *Project indicators and flexibility generator for matrix-based datasets*. `https://www.codeocean.com/`. v1. verzió. DOI: `10.24433/CO.5304543.v1`.

Lenstra, Jan Karel és Rinnooy Kan, AHG (1978). „Complexity of scheduling under precedence constraints". *Operations Research* 26.1, 22–35. old.

Lova, Antonio, Maroto, Concepción és Tormos, Pilar (2000). „A multicriteria heuristic method to improve resource allocation in multiproject scheduling". *European journal of operational research* 127.2, 408–424. old.

MacAskill, Kristen és Guthrie, Peter (2017). „Organisational complexity in infrastructure reconstruction–A case study of recovering land drainage functions in Christchurch". *International Journal of Project Management* 35.5, 864–874. old.

Mathworks, MATLAB (2021). „MATLAB 2021a". *The MathWorks: Natick, MA, USA*.

Owen, Robert, Koskela, Lauri, Henrich, Guilherme és Codinhoto, Ricardo (2006). „Is agile project management applicable to construction?": IGLC.

Özkan, Deniz és Mishra, Alok (2019). „Agile Project Management Tools: A Brief Comprative View". *Cybernetics and Information Technologies* 19.4, 17–25. old. DOI: 10.2478/cait-2019-0033.

Patterson, James H (1976). „Project scheduling: The effects of problem structure on heuristic performance". *Naval Research Logistics Quarterly* 23.1, 95–123. old. DOI: 10.1002/nav.3800230110.

Pellerin, Robert és Perrier, Nathalie (2019). „A review of methods, techniques and tools for project planning and control". *International Journal of Production Research* 57.7, 2160–2178. old.

Pellerin, Robert, Perrier, Nathalie és Berthaut, François (2020). „A survey of hybrid metaheuristics for the resource-constrained project scheduling problem". *European Journal of Operational Research* 280.2, 395–416. old.

Peteghem, Vincent Van és Vanhoucke, Mario (2014). „An experimental investigation of metaheuristics for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem on new dataset instances". *European Journal of Operational Research* 235.1, 62–72. old. ISSN: 0377-2217. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.10.012.

Pritsker, A Alan B, Waiters, Lawrence J és Wolfe, Philip M (1969). „Multiproject scheduling with limited resources: A zero-one programming approach". *Management science* 16.1, 93–108. old.

Roy, B (1962). „Cheminement et connexité dans les graphes". *Applications aux problémes d'ordonnancement. METRA: Série Spéciale*.1.

Sánchez, Mariam Gómez, Lalla-Ruiz, Eduardo, Gil, Alejandro Fernández, Castro, Carlos és Voß, Stefan (2022). „Resource-Constrained Multi-Project Scheduling Problem: A Survey". *European Journal of Operational Research*.

Serrador, Pedro (2013). „The impact of planning on project success-a literature review". *The Journal of Modern Project Management* 1.2.

Servranckx, Tom és Vanhoucke, Mario (2019). „Strategies for project scheduling with alternative subgraphs under uncertainty: similar and dissimilar sets of schedules". *European Journal of Operational Research* 279.1, 38–53. old. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.05.023.

Söderlund, Jonas (2005). „Developing project competence: empirical regularities in competitive project operations". *International journal of innovation Management* 9.04, 451–480. old.

Sprecher, A és Kolisch, R (1996). „PSPLIB—a project scheduling problem library". *European Journal of Operational Research* 96, 205–216. old. DOI: 10.1016/S0377-2217(96)00170-1.

Stare, Aljaž (2014). „Agile Project Management in Product Development Projects". *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 119, 295–304. old. ISSN: 1877-0428. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.03.034.

Steward, D (1981). „The design structure matrix: A method for managing the deisgn of complex systems". *IEEE Transactions on Engineering Management* 28.1981, pp.

Tao, Sha és Dong, Zhijie Sasha (2018). „Multi-mode resource-constrained project scheduling problem with alternative project structures". *Computers & Industrial Engineering* 125, 333–347. old. ISSN: 0360-8352. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.08.027.

Tavares, L Valadares (1999). *Advanced models for project management*. 16. köt. Springer Science & Business Media. DOI: 10.1007/978-1-4419-8626-9. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8626-9.

Traag, V. A., Waltman, L. és Eck, N. J. van (2019. márc. 26.). „From Louvain to Leiden: guaranteeing well-connected communities". *Scientific Reports* 9.1, 5233. old. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-019-41695-z.

Turner, Rodney J, Huemann, Martina, Anbari, Frank T és Bredillet, Christophe N (2010). *Perspectives on projects*. Routledge.

Van Eynde, Rob és Vanhoucke, Mario (2020). „Resource-constrained multi-project scheduling: benchmark datasets and decoupled scheduling". *Journal of Scheduling* 23.3, 301–325. old.

Vanhoucke, Mario, Coelho, José és Batselier, Jordy (2016). „An overview of project data for integrated project management and control". *Journal of Modern Project Management* 3.3, 6–21. old.

Vanhoucke, Mario, Coelho, José, Debels, Dieter, Maenhout, Broos és Tavares, Luís V (2008). „An evaluation of the adequacy of project network generators with systematically sampled networks". *European Journal of Operational Research* 187.2, 511–524. old. DOI: doi.org/10.1016/j.ejor.2007.03.032.

Vázquez, E Pérez, Calvo, M Posada és Ordóñez, P Martín (2015). „Learning process on priority rules to solve the RCMPSP". *Journal of Intelligent Manufacturing* 26.1, 123–138. old. DOI: 10.1007/s10845-013-0767-5.

Wiest, Jerome D (1981). „Precedence diagramming method: Some unusual characteristics and their implications for project managers". *Journal of Operations management* 1.3, 121–130. old.

Williams, Laurie (2010). „Agile Software Development Methodologies and Practices". *Advances in Computers*. Szerk. Marvin V. Zelkowitz. 80. köt. Advances in Computers. Elsevier, 1–44. old. DOI: https://doi.org/10.1016/S0065-2458(10)80001-4. URL: https://doi.org/10.1016/S0065-2458(10)80001-4.

Wysocki, Robert K (2019). *Effective Project Management: Traditional, Agile, Extreme, Hybrid*.

Yasaman, Arefazar, Nazari, Ahad, Hafezi, Mohammad Reza és Maghool, Sayyed Amir Hossain (2022). „Prioritizing agile project management strategies as a change management tool in construction projects". *International Journal of Construction Management* 22.4, 678–689. old. DOI: 10.1080/15623599.2019.1644757.

7 A szerző kapcsolódó publikációi

Nemzetközi cikkek

Kosztyán, Z. T., **Novák, G.**, Jakab, R., Szalkai, I., & Hegedűs, C. (2022). A matrix-based flexible project-planning library and indicators. In: *Expert Systems With Applications*. DOI: doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119472

Kosztyán, Z. T., Jakab, R., **Novák, G.**, & Hegedűs, C. (2020). Survive IT! Survival analysis of IT project planning approaches. In: *Operations Research Perspectives*, 7, 100170. DOI: doi.org/10.1016/j.orp.2020.100170

Jakab, R., **Novák, G.** (2018). Project management approaches in application management services. In: *Chapters from the Academic Aspect of Project Management-Research and Teaching Methodologies Volume II., pp. 152-171. (ISBN: 9786150042190).*

Bírálat alatt

Novák, G., Kisgyörgy-Pál, M. (2022). Multi-level project planning and simulation using a matrix-based model and nonlinear tardiness compensation profiles. Under review in: *Annals of Operations Research*.

Konferenciaközlemények

Kosztyán, Z. T., **Novák, G.**, Jakab, R., & Hegedűs, C. (2022). A Matrix-based Flexible Multi-level Project Planning Library and Indicators. In: *Proceedings of the 24th International DSM Conference (DSM 2022)*, Eindhoven, The Netherlands, October, 11-13, 2022 (pp. 48-57). DOI: doi.org/10.35199/dsm2022.06

Novák, G. (2022). Evaluating the effects of flexibility on project planning databases and indicators. In: *PMUni 2022 Workshop Conference Papers*, pp. 191-206. International Conference on Project Management, Budapest, Hungary. (ISBN: 978-615-6226-04-4).

Novák, G. (2022). Evaluating the effects of flexibility on project planning databases and indicators. Poster. OGIK-ISBIS 2022 Conference Proceedings, pp. 53., Budapest Business School, Salgótarján, Hungary.

Novák, G., & Jakab, R. (2021). Multi-level project planning and simulation using different delay cost profiles. Abstract. 15th International Conference on Economics and Business, Hungarian University of Transylvania, Miercurea Ciuc, Romania.

Novák, G., & Jakab, R. (2019). Multi-level Project Planning and Simulation using Earliness/Tardiness Compensation Profiles. Abstract. OGIK-ISBIS 2019 Conference Proceedings, pp. 44-45., Milton Friedman University, Budapest, Hungary.

Kisgyörgy-Pál M., & **Novák, G.** (2019). Többszintű projekttervezés és szimuláció mátrix-alapú modell alkalmazásával a késedelmi költség hatásainak bemutatására. Abstract. Ipar napjai konferencia 2019, Conference Proceedings, pp. 53-54., University of Debrecen, Debrecen, Hungary.

Jakab, R., & **Novák, G.** (2019). Application Lifecycle Management: evolution and revolution. Abstract. OGIK-ISBIS 2019 Conference Proceedings, pp. 51-52., Milton Friedman University, Budapest, Hungary.

Novák, G., & Jakab, R. (2018). A parser for standard datasets in project scheduling and simulation. Abstract. In: Bacsárdi, L., Bencsik, G., Pödör Z. OGIK-ISBIS 2018 Conference Proceedings, University of Sopron, pp. 20-21., Sopron, Hungary ISBN: (9786158109802)

Jakab, R., **Novák, G.** & (2018). Simulation and modeling of flexible projects and Application Management. Abstract. In: Bacsárdi, L., Bencsik, G., Pödör Z. OGIK-ISBIS 2018 Conference Proceedings, University of Sopron, pp. 47-48., Sopron, Hungary ISBN: (9786158109802)

3. táblázat. A kutatás összegzése

Elem	Ismertetés
KK1:	*Hogyan hozható létre egy olyan egységes modell, amely képes a szakirodalomban fellelhető, heterogén projekt és multiprojekt adatbázisokat reprezentálni?*
KF1:	Kialakítható egy olyan modell, amely egységesíti az irodalomban fellelhető, eltérő formátumú projekt és multiprojekt adatbázisokat, beleértve az idő, költség, megújuló, valamint nem megújuló erőforrások és minőség igényekre vonatkozó paramétereket. A már létező adatbázisok bevehetőek és kiterjeszthetőek rugalmas tevékenységekkel és rákövetkezésekkel, egyetlen mátrix-alapú adatbázisba.
T1:	[Modell] A javasolt, egységes mátrix-alapú projekttervezési modell (UMP) mind hagyományos, mind rugalmas projektek, multiprojektek és programok terveit képes reprezentálni. Kezeli az idő, költség, megújuló, valamint nem megújuló erőforrások és minőség igények paramétereit, egy, vagy több végrehajtási mód esetében is.
KK2:	*Hogyan modellezhető a projektek és multiprojektek terveinek rugalmassága?*
KF2:	A már meglévő, hagyományos projekt és multiprojekt tervekből generálhatóak olyan rugalmas, a modellbe illeszkedő lehetséges struktúraváltozatok, amelyek támogatják a tervezési folyamatok fejlesztését.
T2:	[Struktúrák] A flexibilis struktúra generátor (FSG) képes megadott flexibilitási paraméter szerint minimális, minimax, maximin és maximális mátrix-alapú struktúrákat létrehozni, amelyek a modellbe illeszthetőek. A projektek tervezési fázisa fejleszthető ezen kimenetek és igényeik figyelembevételével.
KK3:	*Mi jellemzi a rugalmas projektek és multiprojektek terveinek topológiáját (struktúráját), valamint különböző igényeit?*
KF3:	Már létező projektmutatók topológiára, idő- és erőforrásigényekre vonatkozó rugalmas változatai megadhatóak rugalmas projektek és multiprojektek esetére a rugalmasság hatásainak vizsgálatához.
T3:	[Indikátorok] Kapcsolat van a modellezett rugalmasság és a topológia, idő, valamint az erőforrások indikátorai között.
T3.1:	[Topológia] A rugalmasság arányának növelésével a strukturális indikátorok csökkenő komplexitást és csökkenő soros végrehajtási sorrendet (növekvő párhuzamos végrehajtási sorrendet) mutatnak a minimális struktúrák esetében.
T3.2:	[Idő] A rugalmasság arányának növelésével az idővel kapcsolatos indikátorok csökkenő projekt átfutási időt és növekvő átlagos tartalékidő-arányt mutatnak.
T3.3:	[Erőforrások] A rugalmasság arányának növelésével az erőforrásokhoz kapcsolódó indikátorok magasabb átlagos erőforráskihasználtságot és magasabb erőforráskorlátoltságot mutatnak a legkorábbi kezdésre való ütemezés esetében.
T3.4:	[Tervezés] A rugalmasság negatív hatással van a multiprojektek tervezhetőségére azáltal, hogy az átlagos átfutási idők varianciáját a hagyományos megközelítéshez képest szignifikánsan növeli, így a multiprojektek hossza kevésbé kiszámíthatóvá válik.
KK4:	*Hogyan lehetséges olyan megengedett, optimumközeli megoldást találni a projektek és multiprojektek terveihez, amely figyelembe veszi azok rugalmasságát?*
KF4:	Lehetséges rugalmas, többszintű projektek ütemezése és optimumközeli megoldások megtalálása. Létrehozható olyan szimulációs keretrendszer, amely képes a kiegészítő tevékenységek és a rugalmas rákövetkezések kezelésére.
T4:	[Megoldás] A javasolt minimális, minimax, maximin és maximális struktúrákkal lehetőség nyílik többszintű projekttervek determinisztikus változatainak megadására a kiegészítő tevékenységek és rugalmas rákövetkezések figyelembevételével, majd ezek rugalmas vagy hagyományos módszerekkel, algoritmusokkal történő megoldására. Optimumközeli megoldás található a (multi)projekt átfutási idejének minimálásával vagy egyéb célfüggvényekkel, amennyiben az időre, erőforrásokra, költségre vonatkozó korlátok azt megengedik.