

Pannon Egyetem  
Műszaki Informatikai Kar  
Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Üzleti folyamatok online nyomon követése  
és javítása folyamatbányászati és  
mesterséges intelligencia algoritmusok  
alkalmazásával

Doktori (PhD) értekezés tézisei

**Nagy Zsuzsanna**

Témavezető: Starkné dr. Werner Ágnes

**2025**

# 1. Bevezetés

A doktori kutatási munkám során üzleti folyamatokkal, főként gyártási és szállítási folyamatokkal kapcsolatos problémákkal foglalkoztam.

## 1.1. Gyártási folyamatok

Az üzleti folyamatok eseményadataiból származó információk elemzésére a folyamatbányászat nyújt lehetőséget, amelynek célja a folyamatok javítása [1]. A megfelelőség-ellenőrzés a folyamatbányászat egyik fő típusa, ahol az eseményadatok összehasonlításra kerülnek a folyamatmodellel, így az eltérések azonosíthatók és magyarázhatók [2]. Napjainkban a gyakorlatban elfogadott alaptechnika az igazítások kiszámítása [3]. Az igazítások által pontosan megjelölt különbségeket a szakértők értelmezhetik, így következtetéseket tudnak levonni és intézkedéseket tudnak tenni a jövőbeli folyamatvégrehajtások javítása érdekében.

Az igazítás-alapú megfelelőség-ellenőrzéshez többfajta megközelítés létezik. A több perspektívás megfelelőség-ellenőrzési (*Multi-perspective Conformance Checking*, röviden *MCC*) megoldások a vezérlésfolyam perspektíva mellett más perspektívákat (pl. idő, erőforrás vagy adat) is figyelembe vesznek (pl. kiegyensúlyozott *MCC* [4]). Az online megfelelőség-ellenőrzési (*Online Conformance Checking*, röviden *OCC*) megoldások képesek az elvárt viselkedésektől való eltéréseket még a folyamatpéldány futásának befejeződése előtt észlelni (pl. előtag-igazítás alapú *OCC* [5]). A gyártási folyamatok esetében kiemelten fontos, hogy az eltérések minden perspektívában és a lehető legkorábban detektálásra kerüljenek. Azonban ilyen több perspektívás online megfelelőség-ellenőrzési (*Multi-perspective Online Conformance Checking*, röviden *MOCC*) megoldás jelenleg nem áll rendelkezésre.

A folyamatadatok vizualizációja kulcsfontosságú az eltérések gyors azonosításához. A meglévő eseményadat vizualizációs megoldások azonban nem kezelik megfelelően az időbeli információkat, például az átfedő eseményeket. Emellett a megfelelőség-ellenőrző algoritmusok által kimutatott eltérések grafikus ábrázolása még mindig nyitott kihívás [6].

## 1.2. Szállítási folyamatok

A szállítási folyamatokat gyakran modellezik kapacitáskorlátos ív útvonaltervezési problémaként (*Capacitated Arc Routing Problem*, röviden *CARP*), amely egy kombinatorikus optimalizálási NP-nehéz probléma [7]. A *CARP* célja egy olyan úthálózat (gráf) kijelölt útszakaszainak (éleinek és/vagy íveinek) kiszolgálása, amely során adott kapacitású és mennyiségű homogén járművek végzik el a feladatokat. A cél optimális útvonaltervek (szolgáltatási tervek) meghatározása, amelyekben minden kijelölt útszakasz kiszolgálásra kerül, miközben a járművek teljes költsége minimális.

Mivel a *CARP* egy NP-nehéz probléma, a szakirodalomban az egzakt módszerek helyett elsősorban heurisztikus és metaheurisztikus megközelítéseket alkalmaznak az optimális vagy közel optimális megoldások elérésére. Azonban a meglévő *CARP*-megoldók vagy túl lassúak (pl. hibrid metaheurisztikus megközelítés (*Hybrid Metaheuristic Approach*, röviden *HMA*) [8]), vagy nem képesek megfelelő minőségű megoldásokat találni (pl. hangya kolónia optimalizációs algoritmus útvonal-újrapcsolással (*Ant Colony Optimization algorithm with Path Relinking*, röviden

ACOPR) [9]). A mesterséges méhcsalád (*Artificial Bee Colony*, röviden *ABC*) algoritmus egy rajintelligencia-alapú optimalizáló módszer, amelyet a mézelő méhek táplálékkereső viselkedése inspirált [10]. Számos CARP-hoz hasonló kombinatorikus optimalizálási problémára, például az utazó ügynök problémára (*Traveling Salesman Problem*, röviden *TSP*), sikeresen alkalmazták, és kimutatták, hogy teljesítménye felülmúlja sok evolúciós algoritmusét [11]. Azonban az ABC algoritmust eddig még nem alkalmazták a CARP megoldására. További probléma, hogy a CARP-hoz elérhető keresési mozgási műveletek vagy túlságosan kicsi, vagy túlságosan nagy változtatásokat végeznek, ami korlátozza a keresési tér alapos feltérképezését.

A normál CARP statikus problémát feltételez, ami nem valóságos. A szolgáltatási terv végrehajtása során dinamikus változások (váratlan események) léphetnek fel, amelyek módosíthatják a problémát, valamint az aktuális szolgáltatási terv megvalósíthatóságát és teljes költségét is [12]. Ilyen esemény lehet például egy új feladat megjelenése vagy egy szolgálatban lévő jármű meghibásodása. A dinamikus kapacitáskorlátos ív útvonaltervezési probléma (*Dynamic Capacitated Arc Routing Problem*, *DCARP*) az ilyen események kezelését célozza a szolgáltatás zökkenőmentes végrehajtása érdekében. Nemrégiben bemutattak egy keretrendszert, amely lehetővé teszi a statikus CARP megoldó algoritmusok alkalmazását a DCARP-ok megoldására [13]. Ez hatékonyabbnak bizonyult, mint a korábbi megoldások, amelyek kevés dinamikus eseményt képesek kezelni, ráadásul lassúak is. A keretrendszerhez kifejlesztettek egy hibrid lokális kereső (*Hybrid Local Search*, röviden *HyLS*) algoritmust, ami addig végez lokális keresést, ameddig jobb megoldásokat már nem talál [14]. Ez a megoldás segíti a dinamikus környezetben történő gyors alkalmazkodást, ugyanakkor az aktuális szolgáltatási terv teljes újratervezését teszi csak lehetővé, amely több jármű útvonaltervét is érintheti. További kihívást jelent, hogy az eddigi DCARP megközelítések azt feltételezik, hogy a járművek tökéletesen követik a kiadott szolgáltatási tervet, ami nem életszerű. Emiatt a (D)CARP megoldó algoritmusok teljesítményének valóságos tesztelése továbbra is problémás.

## 2. Célok és alkalmazott módszerek

A disszertációm első részében a **több perspektívás online megfelelőség-ellenőrzés** és a folyamatadat vizualizáció témakörével foglalkoztam. A kutatásom célja olyan megoldások létrehozása volt, amelyek támogatják a rövid átfutási idővel rendelkező, heterogén tevékenységekből álló, fix folyamatok (pl. gyártási folyamatok) online megfigyelését és javítását. Ezen megoldások alkalmazása lehetővé teszi az elvárt működéstől való eltérések és azok okainak minél hamarabb történő felderítését, ezáltal minimalizálva a hibás termékek számát, valamint a leállások gyakoriságát és időtartamát. Az ilyen problémák esetében a folyamatmodell és az eseményadatok (eseményfolyam formájában) adóttak.

A disszertációm második részében a **statikus és dinamikus kapacitáskorlátos ív útvonaltervezési problémák** témakörével foglalkoztam. A kutatásom célja olyan megoldások létrehozása volt, amelyek támogatják a homogén tevékenységekből álló, flexibilis szállítási folyamatok online megfigyelését és javítását. Ezen megoldások szükség esetén egy újragondolt, módosított szolgáltatási tervet hoznak létre, a teljes költség (szervizidő és/vagy a CO<sub>2</sub>-kibocsátás) minimalizálása érdekében. Az ilyen problémák esetében a matematikai modell (úthálózat, feladatok halmaza stb.) és az eseményadatok (eseményfolyam formájában) adóttak.

## 3. Új tudományos eredmények

### 1. Tézis

Ebben a tézispontban a rövid átfutási idővel rendelkező folyamatok (pl. gyártási folyamatok) online megfigyelését és javítását támogató megoldások létrehozására koncentráltam. Ennek keretében a folyamatbányászat egyik fő típusával, a megfelelőség-ellenőrzéssel, valamint folyamatadat vizualizációval foglalkoztam.

A tézispontban felsorolt eredményeket alátámasztó publikációk: [P1–P9]

#### 1.1 Tézis

Kidolgoztam az első MOCC megoldást, ami egy előtag-igazítás alapú MOCC módszer. A javasolt módszer célja, hogy támogassa egy folyamat online nyomon követését különböző nézőpontokból. A megoldás egy (adat Petri-háló formájában megadott) több perspektívás folyamatmodell és egy eseményfolyam megfigyelt eseményei között számít optimális több perspektívás (előtag-)igazításokat. Ehhez az irodalomban fellelhető inkrementális A\* algoritmust fejlesztettem tovább, ami eredetileg csak a vezérlésfolyam perspektívát figyelembe véve keres optimális előtag-igazításokat.

Az igazítások számítási idejének csökkentése érdekében a módszert két funkcióval bővítettem. Az egyik a közvetlen szinkronizálás, amely a teljesen illeszkedő nyomvonalak esetén gyorsítja meg a keresési folyamatot. A másik az optimális változó hozzárendelési problémák megoldásainak gyorsítótárazása, amely a nem teljesen illeszkedő nyomvonalak esetén csökkenti a számítási időt. Az MOCC módszert egy eset gyorsítótárazási módszerrel is kiegészítettem, amely biztosítja, hogy a folyamatban lévő lefutásokhoz online, míg a befejezett lefutásokhoz offline igazítások kerüljenek kiszámításra.

A javasolt MOCC módszer hatékonyságát és megbízhatóságát két különböző típusú vizsgálat során értékeltem. Az első vizsgálatban az MOCC módszert egy OCC megoldással hasonlítottam össze egy valós folyamatra alkalmazva. Az eredmények azt mutatták, hogy az MOCC módszer több perspektívás szemlélete miatt több helytelen viselkedést képes azonosítani, mint az OCC megoldás, miközben elfogadható sebességgel működik. A második vizsgálatban az MOCC módszer és egy MCC megoldás által adott igazításokat hasonlítottam össze három valós folyamatra alkalmazva. Az eredmények azt mutatták, hogy az MOCC módszer a befejezett lefutásokhoz az MCC módszerrel azonos minőségű több perspektívás igazításokat nyújtott. Emellett, az MCC megoldással ellentétben, az MOCC módszer képes a még folyamatban lévő folyamatlefutások megfelelőség-ellenőrzésére is.

Ezek alapján megállapítottam, hogy az MOCC módszer online és több perspektívás megfelelőség-ellenőrzési megoldásként is megfelelő. Ebből adódóan ideális rövid átfutási idővel és előírásos folyamatmodellel rendelkező valós folyamatok nyomon követésére, de hosszabb átfutási idővel rendelkező folyamatokra is alkalmazható.

#### 1.2 Tézis

Kidolgoztam két új folyamatadat vizualizációs módszert, amelyek képesek az eredeti eseményadatokat és az eseményadatokból kiszámított MOCC kimeneteket (igazítási adatok) grafikus megjelenítésére. A módszerek célja, hogy intuitív és átfogó képet

nyújtsanak az összetett folyamatadatokról. Ezáltal lehetővé teszik a vizsgált folyamat nyomon követését, valamint az eltérések és azok kiváltó okainak gyors felderítését. A vizualizációk egy Gantt-diagram által inspirált, vegyes (fix és időtartamos) idővonal-alapú megjelenítést alkalmaznak, amely képes az átfedő objektumokat is megfelelően kezelni. Emellett lehetőséget biztosítanak arra, hogy a felhasználók kiválasszák, milyen perspektívából szeretnék vizsgálni az adatokat.

A vizualizációs módszereket egy tesztkörnyezetben implementáltam és értékeltem. Hasznosságukat és teljesítményüket egy valós gyártási folyamaton vizsgáltam. Az eredmények azt mutatták, hogy a módszerek alkalmazásával könnyen kimutathatók az amúgy nehezen észlelhető anomáliák, valamint a problémák (pl. termék meghibásodás) lehetséges kiváltó okai is (pl. váratlan rövid gépleállás a folyamat végrehajtása közben).

## 2. Tézis

Ebben a tézispontban a szállítási folyamatok online megfigyelését és javítását támogató megoldások létrehozására koncentráltam. Ennek keretében a kapacitáskorlátos ív útvonaltervezési problémával (CARP) és annak dinamikus változatával (DCARP) foglalkoztam.

A tézispontban felsorolt eredményeket alátámasztó publikációk: [P10–P14]

### 2.1 Tézis

Létrehoztam egy közepes lépésméretű mozgási műveletet a CARP megoldásához, amelyet részútvonalterv műveletnek neveztem el. Ez a művelet a TSP mohó részútvonalra mutációs (*Greedy Sub Tour Mutation*, röviden *GSTM*) műveletén alapul, és célja, hogy hatékonyabbá tegye a CARP-hoz kifejlesztett evolúciós algoritmusok lokális keresési folyamatát. A művelet két különböző mohó keresési módszerből (mohó újrakapcsolási és részútvonalterv forgatási) és egy torzítást alkalmazó módszerből áll. A részútvonalterv művelet egyszerre csak egy útvonalterv feladatainak sorrendjét és kiszolgálási irányát módosítja, így nem veszélyezteti a szolgáltatási terv megvalósíthatóságát.

A részútvonalterv művelet hatékonyságát az irodalomban ismert kis lépésméretű mozgási műveletekhez (inverziós, betoldási, csere, és kétopcións műveletek) viszonyítva értékeltem. A vizsgálatot három különböző bonyolultsági szintű, EGL és EGL-Large teljesítménymérő tesztkészletből származó CARP példán (egl-e1-A, egl-s1-A, és egl-g1-A) végeztem, amelyek valós úthálózatokon és feladatokon alapuló példák. Az eredmények azt mutatták, hogy a részútvonalterv művelet nagyobb eséllyel ér el jobb megoldást, mint a többi vizsgált művelet. Ez különösen igaz olyan esetekben, amikor az aktuális megoldás jelentősebb módosítást igényel az optimális megoldás eléréséhez.

### 2.2 Tézis

Kifejlesztettem az első ABC algoritmust a CARP megoldására (CARP-ABC algoritmus). Az algoritmusból összesen két változatot készítettem: egy felfedezésre és egy feltárássra összpontosító változatot. A felfedezésre összpontosító változat célja, hogy minél változatosabb megoldásokat biztosítson, ezért azt statikus CARP megoldóként ajánlott használni. Ezzel szemben a feltárássra összpontosító változat célja,

hogy minél hamarabb találjon minél jobb megoldást, ezért azt DCARP megoldóként javasolt alkalmazni.

A felfedezésre összpontosító CARP-ABC algoritmus és az irodalomban fellelhető CARP megoldó algoritmusok (HMA és ACOPR) hatékonyságát egymáshoz viszonyítva mértem, öt különböző bonyolultsági szintű CARP példán (kshs1, egl-e1-A, egl-s1-A, egl-g1-A, és egl-g2-A), amelyek közül egy szintetikus és a többi valós életen alapuló példa. Az eredmények azt mutatták, hogy az algoritmus versenyképesnek tekinthető a jelenleg legpontosabb CARP megoldóval, a HMA-val szemben, amikor az algoritmusok maximum megengedett futási ideje körülbelül egy percre van korlátozva. A feltárássra összpontosító CARP-ABC algoritmus hatékonyságát az adat-vezérelt DCARP keretrendszer használatával teszteltem (lásd 2.3 Tézis).

### 2.3 Tézis

Létrehoztam egy minimális újratervező (RR1) algoritmust DCARP példák megoldásához. Az RR1 algoritmus célja, hogy a megvalósíthatatlanná vált szolgáltatási tervet megvalósíthatóvá tegye, minimális számú útvonalterv módosítás mellett, a lehető leggyorsabban.

Az RR1 algoritmus és a többi DCARP megoldó gyakorlati alkalmazhatóságának segítéséhez és teljesítményének valósághű szimulációs környezetben történő értékeléséhez kifejlesztettem egy adat-vezérelt DCARP keretrendszert. A keretrendszer az összes lehetséges dinamikus eseményt képes kezelni. Minden egyes esemény megfigyelését követően frissíti a probléma példányt és a szolgáltatási tervet és szükség esetén meghívja az újratervező modulját, ami az előre definiált DCARP megoldó algoritmus(oka)t alkalmazza. A szimulációk elvégzéséhez a keretrendszerből két változatot készítettem. Az első változat csak egy esemény létrehozó modult alkalmaz (esemény generátort használó DCARP keretrendszer), a második a valósághűbb szimuláció érdekében egy forgalomszimulációs szoftvert is használ (forgalom szimulációt használó DCARP keretrendszer). A feltárássra összpontosító CARP-ABC algoritmus, az RR1 algoritmus és az irodalomban fellelhető (D)CARP megoldó algoritmusok (HMA és HyLS algoritmusok) hatékonyságát mindkét keretrendszer használatával mértem, egymáshoz viszonyítva, egy perces futási idő korlátozással.

Az eseménygenerátort használó DCARP keretrendszerrel végzett hatékonyságvizsgálatok során az algoritmusok (RR1, feltárássra összpontosító CARP-ABC és HMA) teljesítményét egy közepes méretű, valós problémán alapuló CARP példából (egl-e1-A) generált kritikus események („feladat megjelenés”, „kereslet növekedés” és „jármű meghibásodás”) bekövetkezésére vizsgáltam. Az eredmények alapján a megoldás minősége szempontjából a feltárássra összpontosító CARP-ABC algoritmus bizonyult a leghatékonyabbnak, míg a futási idő tekintetében az RR1 algoritmus teljesített a legjobban.

A forgalom szimulációt használó DCARP keretrendszerrel végzett hatékonyságvizsgálatok során 12 különböző forgatókönyvet elemeztem, amelyek valós úthálózatokon és feladatokon alapulnak. Háromféle vizsgálatot végeztem a járműforgalmi szimuláció által generált forgalmi események és a különböző számú feladat megjelenésének kombinációival. Az eredmények azt mutatták, hogy a feltárássra összpontosító CARP-ABC algoritmus átlagosan hatékonyabb volt, különösen az RR1 algoritmussal kombinálva, míg a HyLS és HMA algoritmusok teljesítménye gyengébbnek bizonyult.

## 4. Publikációk

Az ismerttetett eredményeim folyóiratokban, nemzetközi konferenciákon és konferenciakiadványokban lettek bemutatva. Ezeket az alábbiakban sorolom fel.

### Több perspektívás online megfelelőség-ellenőrzés

- [P1] **Zs. Nagy**, Á. Werner-Stark és T. Dulai, „An industrial application using process mining to reduce the number of faulty products”, *New Trends in Databases and Information Systems: ADBIS 2018 Short Papers and Workshops, AI\* QA, BIGPMED, CSACDB, M2U, BigDataMAPS, ISTREND, DC, Budapest, Hungary, September 2–5, 2018, Proceedings*, Springer, Cham, 2018, 352–363. old.
- [P2] **Zs. Nagy**, Á. Werner-Stark és T. Dulai, „Analysis of industrial logs to reduce the number of faulty products of manufacturing”, *OGIK 2018: 15. Országos Gazdaság-informatikai Konferencia - Az előadások összefoglalói, Sopron, Magyarország, 2018. november 9–10.*, L. Bacsárdi, G. Bencsik és Z. Pödör, szerk., Sopron, Magyarország: Alexander Alapítvány a Jövő Értelmiségéért, 2018, 26–27. old.
- [P3] **Zs. Nagy**, Á. Werner-Stark és T. Dulai, „Analysis of industrial logs to reduce the number of faulty products of manufacturing”, *OGIK'2018 Országos Gazdaság-informatikai Konferencia - Válogatott közlemények, Sopron, Magyarország, 2018. november 9–10.*, L. Bacsárdi, G. Bencsik és Z. Pödör, szerk., Sopron, Magyarország: Alexander Alapítvány a Jövő Értelmiségéért, 2019, 53–57. old.
- [P4] **Zs. Nagy**, Á. Werner-Stark és T. Dulai, „Using process mining in real-time to reduce the number of faulty products”, *Advances in Databases and Information Systems: 23rd European Conference, ADBIS 2019, Bled, Slovenia, September 8–11, 2019, Proceedings*, 89–104. old.
- [P5] **Zs. Nagy** és Á. Werner-Stark, „A Multi-perspective Online Conformance Checking Technique”, *2020 6th International Conference on Information Management (ICIM), London, UK, March 27–29, 2020, Proceedings*, IEEE, New York, NY, USA, 2020, 172–176. old.
- [P6] **Zs. Nagy** és Á. Werner-Stark, „An alignment-based multi-perspective online conformance checking technique”, *Abstract book for the 16th MIKLÓS IVÁNYI INTERNATIONAL PHD & DLA SYMPOSIUM, Pécs, Hungary, October 26–27, 2020*, P. Iványi, szerk., Pécs, Magyarország: Pollack Press, 2020, 126. old.
- [P7] **Zs. Nagy** és Á. Werner-Stark, „An Alignment-based Multi-Perspective Online Conformance Checking Technique”, *Acta Polytechnica Hungarica*, 19. évf., 4. sz., 105–127. old., 2022. [IF: 1,7]
- [P8] **Zs. Nagy** és Á. Werner-Stark, „Real-time Visualization of the Outputs of Multi-perspective Online Conformance Checking Analysis”, *Abstract book for the 18th MIKLÓS IVÁNYI INTERNATIONAL PHD & DLA SYMPOSIUM, Pécs, Hungary, November 3–4, 2022*, P. Iványi, szerk., Pécs, Magyarország: Pollack Press, 2022, 80. old.
- [P9] **Zs. Nagy** és Á. Werner-Stark, „Visualization Methods to Support Real-time Process Monitoring”, *Proceedings of the 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2023 (ITTAP 2023), Ternopil, Ukraine, Opole, Poland, November 22–24, 2023*, CEUR Workshop Proceedings sor., 3628. köt., CEUR-WS.org, Aachen, Németország, 2023, 1–14. old.

## Statikus és dinamikus kapacitáskorlátos ív útvonaltervezési probléma

- [P10] **Zs. Nagy**, Á. Werner-Stark és T. Dulai, „Solving the Capacitated Arc Routing Problem by a Special Evolutionary Optimization Algorithm”, *OGIK'2021 Országos Gazdaságinformatikai Konferencia, Veszprém, Magyarország, 2021. november 12–13.*, Veszprém, Magyarország: Platina Nyomda és Kiadó Kft., 2021, 41–42. old.
- [P11] **Zs. Nagy**, Á. Werner-Stark és T. Dulai, „A Data-driven Solution for the Dynamic Capacitated Arc Routing Problem”, *Proceedings of IAC in Budapest 2021, Budapest, Hungary, November 26–27, 2021*, H. Kratochvílová és R. Kratochvíl, szerk., Prága, Csehország: Czech Institute of Academic Education z.s., 2021, 64–83. old.
- [P12] **Zs. Nagy**, Á. Werner-Stark és T. Dulai, „An Artificial Bee Colony Algorithm for Static and Dynamic Capacitated Arc Routing Problems”, *Mathematics*, 10. évf., 13. sz., 2205. cikk, 2022. [**IF: 2,4**]
- [P13] **Zs. Nagy**, Á. Werner-Stark és T. Dulai, „Solving Data-driven Dynamic Capacitated Arc Routing Problems”, *Middle-European Conference on Applied Theoretical Computer Science (MATCOS-22), Koper, Slovenia, October 13–14, 2022, Booklet*, 2022, 16. old.
- [P14] **Zs. Nagy**, Á. Werner-Stark és T. Dulai, „Comparison of Optimization Algorithms for the Dynamic Capacitated Arc Routing Problem”, *Abstracts of the International Conference on Optimization and Algorithms (OPAL 2023) Semi Online 25, Veszprém, Hungary, June 5–9, 2023*, 2023, 19. old.

## MTMT profil

<https://m2.mtmt.hu/api/author/10068634>

## Hivatkozások

- [1] W. Van Der Aalst, *Process mining: data science in action*. Springer Berlin, Heidelberg, 2016, 2. köt.
- [2] J. Carmona, B. van Dongen, A. Solti és M. Weidlich, *Conformance checking*. Springer, Cham, 2018, 1. köt.
- [3] S. J. van Zelst, A. Bolt és B. F. van Dongen, „Tuning Alignment Computation: An Experimental Evaluation”, *Proceedings of the International Workshop on Algorithms & Theories for the Analysis of Event Data 2017 (ATAED 2017), Zaragoza, Spain, June 26–27, 2017*, 1847. köt., CEUR-WS.org, Aachen, Németország, 2017, 6–20. old.
- [4] F. Mannhardt, M. De Leoni, H. A. Reijers és W. M. Van Der Aalst, „Balanced multi-perspective checking of process conformance”, *Computing*, 98. évf., 407–437. old., 2016.
- [5] D. Schuster és S. J. van Zelst, „Online process monitoring using incremental state-space expansion: an exact algorithm”, *Business Process Management: 18th International Conference, BPM 2020, Seville, Spain, September 13–18, 2020*, Springer, Cham, 2020, 147–164. old.
- [6] J. Carmona, B. van Dongen és M. Weidlich, „Conformance checking: foundations, milestones and challenges”, *Process Mining Handbook*, Springer, Cham, 2022, 155–190. old.

- [7] B. L. Golden és R. T. Wong, „Capacitated arc routing problems”, *Networks*, 11. évf., 3. sz., 305–315. old., 1981.
- [8] Y. Chen, J.-K. Hao és F. Glover, „A hybrid metaheuristic approach for the capacitated arc routing problem”, *European Journal of Operational Research*, 253. évf., 1. sz., 25–39. old., 2016.
- [9] C.-J. TING és H.-S. TSAI, „Ant colony optimization with path relinking for the capacitated arc routing problem”, *Asian Transport Studies*, 5. évf., 2. sz., 362–377. old., 2018.
- [10] D. Karaboga, „An idea based on honey bee swarm for numerical optimization”, Computer Engineering Department, Engineering Faculty, Erciyes University, Kayseri, Turkey, techn. jel. tr06, 2005. okt.
- [11] D. Karaboga és B. Gorkemli, „Solving traveling salesman problem by using combinatorial artificial bee colony algorithms”, *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 28. évf., 1. sz., 2019.
- [12] Á. Corberán, R. Eglese, G. Hasle, I. Plana és J. M. Sanchis, „Arc routing problems: A review of the past, present, and future”, *Networks*, 77. évf., 1. sz., 88–115. old., 2021.
- [13] H. Tong, L. L. Minku, S. Menzel, B. Sendhoff és X. Yao, „A Novel Generalized Metaheuristic Framework for Dynamic Capacitated Arc Routing Problems”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 26. évf., 6. sz., 1486–1500. old., 2022.
- [14] E. Babae Tirkolae, I. Mahdavi, M. M. Seyyed Esfahani és G.-W. Weber, „A hybrid augmented ant colony optimization for the multi-trip capacitated arc routing problem under fuzzy demands for urban solid waste management”, *Waste management & research*, 38. évf., 2. sz., 156–172. old., 2020.