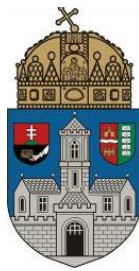


Óbudai Egyetem

Doktori (PhD) értekezés



Városi buszközlekedés üzemi tervezésének szintézis alapú megoldása

Nagy Albert

Témavezető: Dr. habil Tick József

Alkalmazott Informatikai és Alkalmazott Matematikai Doktori Iskola

Budapest, 2021. november 02.

A nyilvános védés Bizottsága:

- 1. Elnök: Prof. Dr. Nagy Péter professor emeritus, az MTA doktora, ÓE**
- 2. Titkár: Dr. Vámosy Zoltán intézetigazgató, ÓE**

Opponensek:

- 3. Dr. Bertók Botond, külső munkatárs (PE, Műszaki Informatikai Kar)**
- 4. Prof. Dr. Galántai Aurél professor emeritus, az MTA doktora, ÓE**

További tagok:

- 5. Prof. Dr. Csendes Tibor, az MTA doktora, külső munkatárs (SZTE)**
- 6. Prof. Dr. Sima Dezső professor emeritus, az MTA doktora, ÓE**
- 7. Dr. Mándoki Péter külső munkatárs (BME, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar)**

Tartalékok:

Tartalék elnök: Prof. Dr. habil. Horváth László professor emeritus, ÓE

Tartalék titkár: Dr. habil. Szénási Sándor intézetigazgató-helyettes, ÓE (Szoftvertervezés és -fejlesztés Intézet)

Tartalék bíráló: Prof. Dr. Abaffy József professor emeritus, az MTA doktora, ÓE

Tartalék tag: Prof. Dr. Benczúr András professor emeritus, az MTA doktora, külső munkatárs (ELTE)

Nyilvános védés időpontja

2021. december

Tartalomjegyzék

Kivonat.....	5
Abstract	6
Abstrakt	7
Köszönetnyilvánítás	8
1 Bevezetés.....	9
1.1 A dolgozat célkitűzése és kutatási kérdései.....	11
1.2 Vizsgálati módszerek.....	11
1.3 A dolgozat felépítése	13
2 Szakirodalmi áttekintés	14
2.1 A járműütemezés	14
2.2 A járművezető ütemezés.....	18
2.3 A jármű- és személyzet ütemezés.....	20
2.4 A P-gráf módszertan irodalmi áttekintése	21
3 A menetrendkészítés folyamata.....	24
3.1 A buszközlekedés mérhető paraméterei és hatékonysági mutatói.....	28
3.2 A menetrend megvalósítás folyamata jelenleg	30
3.3 Konkrét gyakorlati menetrend megvalósítási példa	34
3.4 Konklúzió	36
4 A vizsgálat Big data alapú megközelítése	38
4.1 A vizsgált BKV rendszerek	40
4.2 A vizsgálatba bevont forrás rendszerek, eszközök és kapcsolódásaik	41
4.3 Az adattárház kialakítása a BKV rendszerében.....	44
4.4 A vizsgált adatok a BKV rendszerében.....	46
4.5 Az elemzés menete	47
4.6 A menetrendi eltérések elemzése	47
4.7 A munkaidő és a forgalmi menetek közötti tartózkodási idő elemzése.....	60
4.8 Konklúzió	62
4.9 1. tézis.....	62
5 Egy klasszikus algoritmikus módszer adaptációja a menetrend megvalósítási feladatokra.....	64
5.1 A bemenő paraméterek.....	64
5.2 A vizsgálati módszertan.....	65
5.3 Az eljárás főbb lépései.....	68
5.4 A matematikai modell formális leírása.....	69
5.5 Számítási eredmények	71
5.6 Konklúzió	75
5.7 2. tézis.....	75

6	P-gráf módszertan adaptációja a menetrend megvalósítási feladatokra	77
6.1	A P-gráf módszertan alapjai	77
6.2	A városi buszközlekedés modelljének objektumai.....	83
6.3	Optimális menetrend megvalósítás ütemes menetrendek esetén.....	87
6.4	3. tézis.....	93
6.5	Optimális menetrend megvalósítás tetszőleges indítási idejű menetrendek esetén	93
6.6	4. tézis.....	99
7	Összefoglalás.....	100
8	Továbbfejlesztési lehetőségek.....	101
9	Új tudományos eredmények.....	102
	Publikációk.....	104
	Irodalomjegyzék.....	106
	1. sz. melléklet.....	112
	2. sz. melléklet.....	113

Kivonat

A fenntartható városi mobilitás magában foglalja a közösségi buszközlekedés hatékony és gazdaságos működtetését. A rendelkezésre álló erőforrások által biztosított közlekedési szolgáltatások színvonala függ a menetrendek optimális megvalósításától. A kapcsolódó közlekedésmenedzsment folyamatok informatikai támogatása ma még csak részlegesen történik. A piacon elérhető szoftverek mérsékelten, vagy egyáltalán nem támogatják a helyi viszonyoknak megfelelő gyakorlatot. Az illesztés számos átszervezéssel, illetve lemondással járna, ami a szolgáltatók számára ma nem nyújt alternatívát. Az optimalizációs lehetőségek feltárásával a fejlett információtechnológiai eszközök új szemléletű kialakítása újfajta döntéstámogató eszközkészletet adhat a szolgáltatók kezébe.

A kutatási témám megválasztásánál számomra fontos szempont volt a kutatási eredmények gyakorlati és üzleti hasznosíthatósága. Az optimalizálási eszközrendszerek nem valósíthatók meg hatékonyabban a rendelkezésre álló óriási adatvagyon elemzése nélkül annak terjedelme és komplexitása miatt. A kutatás elején egy keretrendszer segítségével, Big data alapú megközelítéssel megvizsgáltam a forrásrendszerekből származó adatokat. Az optimalizálás újragondolása teljesen új és szakmailag igényelt távlatokat nyithat meg a menetrend megvalósítás területén.

A kutatásom során egy szakirodalomban megtalálható klasszikus matematikai modell adaptálásának lehetőségeit vizsgáltam, nevezetesen egy kombinált jármű- és személyzet ütemezés optimalizáló módszert, kiegészítve olyan feltételekkel, amelyek jobban megfelelnek a valós elvárásoknak. Az eredményeket két meghatározott példán keresztül összevettem a jelenleg alkalmazott gyakorlattal. A mintára alapozott számítások kimutatták a módszer alkalmazhatóságát az erőforrás gazdálkodás hatékonyságának növelésére. Rámutattam arra is, hogy a vizsgált hagyományos matematikai modell által generált magas változószám miatt egy Budapest nagyságrendű városra történő gyakorlati alkalmazása számítási kapacitás problémákat vet fel.

Ezért a további kutatási munka során felderítettem a folyamathálózat szintézis területén kidolgozott és bevált módszerek alkalmazhatóságát, és adaptáltam a városi buszközlekedési feladatosztályra. A kutatásom szempontjából prioritást kapott a tetszőleges indítási idejű menetrendnek megfelelő konkrét buszközlekedési ütemezések meghatározása is. A javasolt szintézis megközelítés alkalmazásával az erőforrások felhasználása hatékonyabb, mivel az optimalizálás újszerű megközelítésének köszönhetően nem igényel óriási kapacitás szükségletet a számítási infrastruktúrán. Az általános buszközlekedési feladatot a szakirodalomban megismert módszerekhez képest lényegesen kisebb méretű modellel oldottam meg.

A bemutatott modellezési módszerek és eljárások, melyek a közösségi buszközlekedés valós problémáinak megoldását támogatják, a gyakorlatban évi több tízmillió forintos megtakarítást tesznek lehetővé.

Abstract

Sustainable urban mobility includes the efficient and economical operation of public bus transport. The quality of the transport services provided by the available resources depends on the optimal implementation of the timetables. The IT support for related traffic management processes is only partially available to this day. The software available on the market has little or no support for local practices. The adjustment would involve a number of restructurings or waivers that are no alternative for service providers today. By exploring opportunities for improvement, a new approach to developing advanced information technology tools can put a new set of decision support tools in the hands of service providers.

An important aspect for me in choosing my research topic was the practical and business applicability of the research results. Because of the size and complexity of the immense amount of data, optimization tools cannot be implemented efficiently. At the beginning of my research I examined data from source systems using a framework based on Big data. Rethinking optimization can open up completely new and professionally required perspectives in the area of schedule implementation.

In the course of my research, I examined the possibilities of adapting a classical mathematical model established in the literature, namely a combined optimization method for the planning of vehicles and crews, supplemented by conditions that better correspond to actual expectations. I compared the results with the practice currently in use using two specific examples. Sample-based calculations have shown the applicability of the method to increase the efficiency of resource management. I also pointed out that practical application to a city on the order of Budapest poses computational problems due to the large number of variables generated by the traditional mathematical model under study.

Therefore, as part of further research, I examined the applicability of the methods developed and proven in the field of process network synthesis and adapted them to the task class city bus traffic. From my research perspective, setting specific bus schedules according to the schedule with any start time has also been prioritized. With the proposed synthesis approach, the use of resources is more efficient, since thanks to a novel optimization approach, no large capacity requirements for the computer infrastructure are required. I have solved the general problem of bus transport with a much smaller model than with the methods known in the literature.

The presented modeling methods and procedures, which support the solution of real problems of public bus transport, enable savings of tens of millions of forints per year.

Abstrakt

Nachhaltige urbane Mobilität beinhaltet den effizienten und wirtschaftlichen Betrieb des öffentlichen Busverkehrs. Die Qualität der durch die verfügbaren Ressourcen erbrachten Transportdienste hängt von der optimalen Umsetzung der Fahrpläne ab. Die IT-Unterstützung für verwandte Verkehrsmanagementprozesse ist bis heute nur teilweise verfügbar. Die auf dem Markt verfügbare Software unterstützt lokale Praktiken kaum oder gar nicht. Die Anpassung würde eine Reihe von Umstrukturierungen oder Verzichtserklärungen beinhalten, die für Dienstleister heute keine Alternative darstellen. Durch die Untersuchung von Optimierungsmöglichkeiten kann ein neuer Ansatz für die Entwicklung fortschrittlicher Informationstechnologie-Tools eine neue Reihe von Tools zur Entscheidungsunterstützung in die Hände von Dienstleistern legen.

Ein wichtiger Aspekt für mich bei der Auswahl meines Forschungsthemas war die praktische und geschäftliche Verwendbarkeit der Forschungsergebnisse. Wegen der Größe und Komplexität der immensen Datenmenge können Optimierung-Tools nicht entsprechend effizient implementiert werden. Zu Beginn der Forschung untersuchte ich Daten aus Quellsystemen mithilfe eines auf des Big-Data basierten Frameworks. Das Überdenken der Optimierung kann völlig neue und professionell erforderliche Perspektiven im Bereich der Zeitplanumsetzung eröffnen.

Im Verlauf meiner Forschung untersuchte ich die Möglichkeiten zur Anpassung eines in der Literatur etablierten klassischen mathematischen Modells, nämlich einer kombinierten Optimierungsmethode für die Planung von Fahrzeugen und Besatzungen, ergänzt durch Bedingungen, die den tatsächlichen Erwartungen besser entsprechen. Ich habe die Ergebnisse anhand von zwei konkreten Beispielen mit der derzeit verwendeten Praxis verglichen. Stichprobenbasierte Berechnungen haben die Anwendbarkeit der Methode zur Steigerung der Effizienz des Ressourcenmanagements gezeigt. Ich wies auch darauf hin, dass die praktische Anwendung auf eine Stadt der Größenordnung von Budapest aufgrund der hohen Anzahl von Variablen, die durch das untersuchte traditionelle mathematische Modell erzeugt werden, Probleme mit der Rechenkapazität aufwirft.

Daher habe ich im Rahmen weiterer Forschungen die Anwendbarkeit der im Bereich der Prozessnetzwerksynthese entwickelten und bewährten Methoden untersucht und an die Aufgabenklasse Stadtbusverkehr angepasst. Aus Sicht meiner Forschung wurde auch der Festlegung spezifischer Busverkehrspläne gemäß dem Zeitplan mit einer beliebigen Startzeit Vorrang eingeräumt. Mit dem vorgeschlagenen Syntheseansatz ist der Ressourceneinsatz effizienter, da dank eines neuartigen Optimierungsansatzes kein großer Kapazitätsbedarf für die Computerinfrastruktur erforderlich ist. Ich habe das allgemeine Problem des Bustransports mit einem deutlich kleineren Modell gelöst als mit den in der Literatur bekannten Methoden.

Die vorgestellten Modellierungsmethoden und -verfahren, die die Lösung realer Probleme des öffentlichen Busverkehrs unterstützen, ermöglichen Einsparungen von mehreren zehn Millionen Forint pro Jahr.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm az Óbudai Egyetem Alkalmazott Informatikai és Alkalmazott Matematikai Doktori Iskolának, hogy helyet adott a témámnak, és köszönöm a Tagjainak, akik támogattak a doktori munkámban.

Ezúton mondok külön köszönetet témavezetőmnek, Dr. Tick Józsefnek, aki elvállalta a témavezetésemet, irányította a munkámat, és értékes tanácsokkal látott el az évek alatt.

Dr. Kovács Zoltánnak és Dr. Ercsey Zsoltnak a kutatásom során nyújtott szakmai és emberi támogatásukért, és a dolgozat szakmai lektorálásáért hálás köszönetemet fejezem ki.

Továbbá szeretnék köszönetet mondani valamennyi érintett kollégámnak, különös tekintettel Tóth Krisztinának, Mádyiné Várszegi Mónikának, Dr. Berényi Edének és Bojer Lászlónak, akik munkám elvégzéséhez hozzájárultak.

Köszönöm Dr. Békési Józsefnek és Sepp Norbertnek a szakmai konzultációkat.

Végül köszönöm családomnak a megértést, a biztatást, az áldozatvállalást, hogy támogattak, és nélkülözni tudtak abban az időszakban, amikor a dolgozat megírásával foglalkoztam.

1 Bevezetés

A közösségi közlekedés az utazási igényeket kollektív módon, a közlekedési eszköz közös használata mellett, menetrend alapján szolgálja ki [1]. Feladata a termelést, az elosztást és a fogyasztást közvetlenül és közvetve szolgáló helyváltoztatási igények kielégítése, vagyis a munkavállalásnak, a közintézmények felkeresésének lehetővé tétele, a tanulást, az üdülést és egyéb személyes célokat szolgáló utazások lebonyolítása. A közösségi közlekedés jelentősége vitathatatlan. Hozzájárul a városok virágzásához, valamint a polgárok magas színvonalú mindennapi életéhez. A jól szervezett városi közösségi közlekedési rendszerek kitágítják a városlakók lehetőségeit, lehetővé teszik a munkahelyek gyorsabb hozzáférését, ezzel tágítják az elérhető munkahelyek körét is, biztosítják a szabadidős tevékenységek könnyebb megközelítését stb. Az utazási szokásokat is befolyásoló új technológiák megjelenése, a jármű-megosztási és -automatizálási folyamatok várhatóan csökkenteni fogják a személy-gépjárművek városon belüli használatát és tárolását egyaránt. A közösségi közlekedés térnyerése megkérdőjelezhetetlen. Bár a közösségi közlekedés ma már túlmutat a klasszikus értelemben vett tömegközlekedési eszközök, az autóbuszok, metrók, hajók, villamosok és vonatok használatán, ezek a hagyományos közlekedési eszközök még ma is a közösségi közlekedés gerincét jelentik. A közösségi közlekedés, mint szervezési forma folyamatosan fejlődik, ahogy a befogadó városok növekednek, folyamatosan nő az utasok száma, és ezzel párhuzamosan fejlődik a technológia is.

Európa lakosságának a 72%-a 2007-re már városi övezetben élt [2], ami 2020-ra megközelítette a 75%-ot [3]. Az EU bruttó hazai termékének mintegy 85%-át a városokban állítják elő, és a városoknak – gazdaságuk támogatásához és lakóik jóllétének biztosításához – hatékony közlekedési rendszerekre van szüksége. Ezért az EU a közösségi közlekedéspolitikai keretében is vizsgálni kezdte annak lehetőségét, hogy közösségi szinten hogyan mozdíthatók elő a fenntartható városi közlekedés alternatívái.

Az Európai Unió Zöld Könyve [4] szerint a hatékony utasszállító rendszerek alapvető fontosságúak a gazdaságok és a lakosság életszínvonalának szempontjából. Lényeges, hogy a közlekedési rendszerek felépítése megfeleljen az utazók igényeinek, eléggé rugalmasak legyenek, és követni tudják az igények változásait. Európában a felszíni közösségi közlekedési rendszerek nagy része az üzemeltetés tekintetében magas fokú állami szubvencionálásra alapul, nem képes előteremteni a rendszerek felújításához szükséges anyagi forrásokat anélkül, hogy külső finanszírozásra ne szorulna. Az elmúlt évtizedben az Európai Bizottság több szakpolitikai dokumentumot bocsátott ki a városi közlekedésről, melyek hazai tekintetben is relevánsak. Ilyen például a Bizottság 490/2009. közleménye a városi mobilitás cselekvési tervéről, illetve az Európai Parlament és a Tanács 2010/40/EU irányelve a közlekedési hálózat leíró információinak, a forgalmat befolyásoló események meghatározott formátumú, valós idejű publikációjának igényére, valamint az adatok optimális felhasználására.

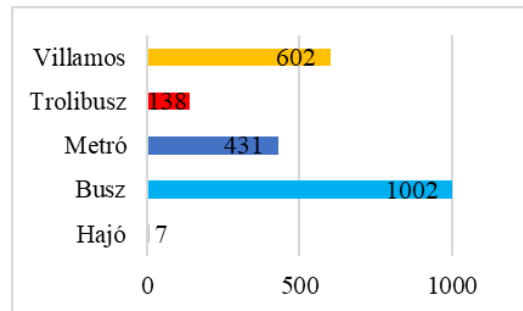
A közlekedési vállalatok költségeinek döntő része járműveik üzemeltetéséből származik, ideértve a járműpark fenntartását, az üzemanyag felhasználást, a karbantartási költségeket és a járművezetők fizetését. Ezért a gazdaságossági törekvések ezen költségek optimalizálására vonatkoznak, így kritikus feladatnak tekinthetők. A probléma még összetettebb, ha a járművek és a járművezetők beosztását is vizsgálni kell, figyelembe véve mindenféle korlátokat, útvonalakat, járművek adottságait, menetrendeket, munkaügyi szabályokat stb. Ezen feladatok megoldása igen nehéz azok mérete és bonyolultsága miatt.

A közösségi közlekedés működtetéséért felelős állami vagy önkormányzati tulajdonú szervezetek elkerülhetetlenül szembesülnek azzal, hogy működésük a fenntartó támogatásához kötött, ezzel párhuzamosan a működtetési elvárások a költséghatékonyságra irányulnak. A közlekedésmenedzsment feladatok középpontjában a tervezés, működtetés és ellenőrzés áll, amelyeket az elmúlt évtizedekben kifejlődött új technológiák is jelentősen támogatnak.

A budapesti közlekedésszervezési modellben a Budapesti Közlekedési Központ Zrt. (a továbbiakban: BKK), megrendelői pozícióban az integrált mobilitásmenedzser szerepét tölti be, amely a Fővárosi Önkormányzattal kötött, feladatellátásról és közszolgáltatásról szóló keretmegállapodás alapján rendel

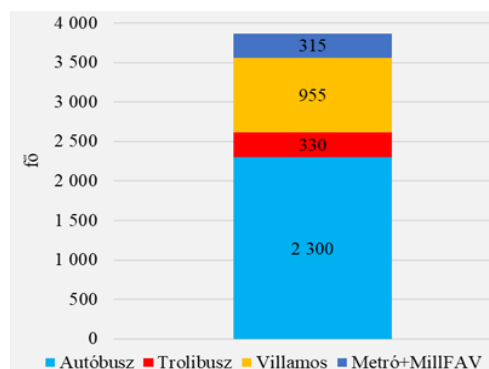
meg a szolgáltatásokat. A Budapesti Közlekedési Zrt. (a továbbiakban: BKV), mint integrált közösségi közlekedési szolgáltató az 1370/2007/EK rendelet alapján a feladatát a BKK-val megkötött közszolgáltatási szerződés alapján végzi. Ennek értelmében felelős a metró, villamos, trolibusz, autóbusz, hajó, nosztalgia üzemek működtetéséért és karbantartásáért. A BKV stratégiai célja, hogy vonzó szolgáltatóként a budapesti mobilitási rendszer meghatározó tagja legyen.

A közszolgáltatás teljesítése szempontjából fontos, hogy az üzemeltető a leghatékonyabban használja fel a forrásait. A BKV járműveinek átlagos járműállományi darabszáma az 1. ábrán látható.



1. ábra. A BKV járműveinek átlagos darabszáma
Forrás: BKV

A BKV teljes munkaidős átlagos állományi létszáma 2019-ben 9541 fő volt, amiből a járművezetői állomány mintegy 3900 fő (2. ábra). Ebből hozzávetőlegesen 2300 buszvezető teljesített szolgálatot, ami közel 60%-a az állománynak. A közlekedés üzemeltetők ugyanakkor jelentős munkaerőhiánnyal is szembesülnek.



2. ábra. A járművezetői állomány összetétele (2019)
Forrás: BKV

A fenti ábrák alapján az látszik, hogy mind a buszok száma, mind azok járművezetőinek száma kiemelkedő, így a BKV városi közlekedési feladatai közül az egyre növekvő és fenntartható mobilitási igény miatt a buszközlekedés hatékony szervezése egyre fontosabbá válik. A közösségi közlekedés, ezen belül is az autóbusz közlekedés folyamatainak folyamatos javítása – melyben a járművek és járművezetők beosztása kritikus az erőforrások hatékony felhasználása érdekében – hozzájárul a fenntartható, élhető, vonzó és egészséges városi környezet kialakításához, ezáltal is javítja a versenyképességet. Kiemelkedő súlyára tekintettel a továbbiakban a disszertációmban a vizsgálatokat leszűkítem a buszközlekedésen alapuló városi közösségi közlekedési rendszerekre.

A BKV 2019-es ráfordításai 160 Mrd Ft körül alakultak. Ezen belül az anyagjellegű ráfordítások 60 Mrd Ft, míg a személyi jellegű ráfordítások 71 Mrd Ft-ot tettek ki. Ekkora méretnél a rendszerben rejlő tartalékok feltárásával, modellszerű vizsgálatával akár évi százmillió forintos nagyságrend is megtakarítható lenne. A döntések meghozatala komplex ismereteket igényel, ezért egy döntéstámogató modell alkalmazásával egyszerűbb lehet a hatékonyságnövelés ezen a területen.

1.1 A dolgozat célkitűzése és kutatási kérdései

A fentebb megfogalmazott városi közlekedést érintő kérdésekből, problémákból egyenesen következik a megoldások keresésének szükségessége, melyekből levezethető egy új kutatási irány.

Az értekezésem általános célja a közlekedésmenedzsment azon eszközrendszerének elemzése és fejlesztése, amely a rendelkezésre álló erőforrások hatékonyabb, gazdaságosabb használatát, valamint az általuk biztosított szolgáltatások színvonalának emelését támogatják. Egyrészt alapvetően fontos a városi buszközlekedést érintő főbb kihívások és abban rejlő optimalizációs lehetőségek azonosítása, másrészt a gyakorlatban felmerülő problémák megoldását segítő olyan vizsgálatok és módszerek kidolgozása, amelyek hasznos eszközül szolgálhatnak a döntéstámogatásban és a gyakorlati üzemeltetésben.

A kutatás célkitűzései a következőkben foglalhatók össze:

- Egy olyan újfajta eszközkészlet kidolgozása, amely által a közlekedési szolgáltatók számára gazdasági előny biztosítható.
- A BKV-nál rendelkezésre álló adatvagyon elemzéseiből levont következtetésekből a közösségi buszközlekedés üzemi menetrend-megvalósítás területén célzott optimalizációs lehetőségek feltárása, mellyel az üzemeltetés hatékonysága növelésével a költségek csökkenthetők.
- A célom a közösségi buszközlekedésre egy olyan menetrendütemezési modell előállítás, amely alkalmas a különböző erőforrások hatékonyabb felhasználására, a rendelkezésre álló erőforrások mennyiségi és minőségi figyelembevételére, a munkaügyi- és egyéb korlátozási feltételek kezelésére.
- A célom a valós folyamatokat az eddigieknél jobban modellezni képes rendszer kidolgozása, amely hosszútávon a gyakorlati használatba is bevezethető.

Egy ilyen modellben a főbb kérdések az alábbiakban fogalmazhatók meg:

- Miként lehet javítani a szolgáltatás minőségét minimális költséggel?
- Miként lehet gyorsítani a tervezési folyamatot, hogy a váratlan helyzetekre reagálni lehessen?
- Miként lehet az erőforrásokat hatékonyabban tervezni,
 - azaz kevesebb járművel és járművezetővel megoldani a menetrend teljesítését,
 - mindezt oly módon, hogy a járművezetők beosztása lehetőleg egyenletes legyen,
 - és minél kevesebb nem kívánt várakozási időt biztosítson úgy, hogy közben a munkavállalói elégedettség megmaradjon?

1.2 Vizsgálati módszerek

A BKV tevékenységéhez kapcsolódóan már közel két évtizedre visszamenőleg rendelkezésre álló információ elérte azt a méretet és komplexitást, amely megnehezíti a jelenlegi módszerekkel történő vállalati innovációt. A meglévő forrásokból levont következtetések sok esetben nem, vagy csak kis hatékonysággal támogatják az üzleti területek vezetőinek a munkáját.

A BKV informatikai vezetőjeként számos projektet kezdeményeztem és valósítottam meg, amelyek a közlekedés hatékonyságának növelését célozták. A munkám során kiemelten fontosnak tartom a kapacitás-tervezést, az erőforrás felhasználás optimalizálását, a szükséges strukturális fejlesztési lehetőségek feltárását és a minőség fejlesztését.

A dolgozatomban az európai szinten is figyelemre méltó BKV adatbázisra támaszkodva a korábban megkezdett, az üzemeltetés közben keletkező adatok vizsgálatával olyan döntésmegalapozó/döntés-támogató funkciókat, módszertant dolgoztam ki, amely a felső- és operatív vezetés számára is értéket jelenthet. A vizsgálatom középpontjába a városi buszközlekedési operatív tervezési optimalizálási feladatai kerültek, mert a közösségi közlekedési szolgáltató vállalatoknak főként az operatív tervezés terén van befolyásuk. Ezen belül olyan rövid távú tervezési folyamatokat jártam körül, amelyeknek a célja a hatékonyság javítása és az üzemeltetési költségek minimalizálása. Ezért több olyan optimalizálási probléma is bemutatásra kerül, ami a közösségi buszközlekedés társasági járműveihez és járművezetőihez kapcsolódik. A témaköröket nem csak elméleti oldalról, hanem a valós alkalmazhatóság szempontjából is vizsgáltam, és a gazdasági hatások számbavételén túl elsősorban a gyakorlati megoldásokra fókuszáltam.

Dolgozatom módszertana alapvetően deduktív, de kiegészül induktív kutatási elemekkel is, hiszen a forrásokat, dokumentumokat és eddigi tapasztalatokat elemezve, illetve összefüggéseket keresve törekedtem újszerű törvényszerűségek megfogalmazására.

Az üzemi tervezési folyamatok támogatása az erőforrások optimális felhasználásának érdekében minden közösségi közlekedési szolgáltató célja és feladata. Ennek szellemében a gyakorlati kutatásomat három logikai részre bontottam:

- Elsőként a kutatásom során a valóságban megtapasztalható összefüggéseket tártam fel a közvetlen adatgyűjtés és adatelemzés módszerével. Big data alapú megközelítéssel feltérképeztem a menetrendi eltéréseket, a járműtípusokat, és a munkaidő kihasználtságot, melyek hatásainak felderítése során a vizsgálatba vont tényezők közötti kapcsolat azonosításához korreláció-, regresszió-, és trendelemzést használtam. Feltételezésem szerint a rendszerben rejlő tartalékok feltárásával a menetrend megvalósítás gyorsabban, több változat elemzésével, algoritmikusan elvégezhető, és a humán erőforrások kihasználtságát javító célzott optimalizációs eljárások kidolgozhatók és bevezethetők. Vizsgálatomban meghatároztam az optimalizálás célját és feltártam azokat a tényezőket, amelyeket figyelembe kell venni egy döntéstámogató modell megalkotásánál.
- A kutatásom második részében az ütemezési feladatok eddigieknél hatékonyabb megoldását határoztam meg. A feladat klasszikus szakirodalmi modell alapján történő megoldására egy kombinált jármű- és személyzet-ütemezés optimalizáló modellt használtam, amelyet a kutatási céloknak megfelelően adaptáltam. A probléma matematikai modellezése lineáris programozással történt, melyekhez többek között halmaz-felosztási módszerek is alkalmazásra kerültek. A BKV-ból származó példákon keresztül összehasonlító elemzést végeztem a jelenlegi kézzel készített, és az algoritmikusan automatizált módon elkészített menetrendek eseteit feldolgozva. Két valós viszonylaton keresztül megvizsgáltam a főbb menetrendi paramétereket; mint az átlagos és összes szolgálat hosszát, összes tartózkodási időt, beleértve a menetrendkészítés idejét is.
- Az eredmények részben adtak választ a kérdéseimre, ezért a harmadik részben az erőforrások hatékonyabb felhasználása érdekében a folyamathálózat-szintézis területén kidolgozott és bevált módszerek felé fordultam. A metodológia alapját jelentő strukturális megközelítésből fakadó előnyök megfelelő kihasználása által közvetlenül várható gyakorlati eredmények optimálisabb megoldáshoz vezetnek a matematikai modell változószámainak jelentős számú csökkentésének köszönhetően. A klasszikus PNS módszertant adaptáltam a városi buszközlekedési feladatosztályra. Felírásra került a strukturálisan lehetséges megoldásokra alkalmazott matematikai programozási modell. Az ütemes menetrend típusokra megadtam egy általánosan érvényes P-gráfot. A tetszőleges indítási idejű menetrendek modellezésére megadtam a maximális struktúrához tartozó matematikai

programozási modellt. Az általam bevezetett módszer alkalmazásával egy Budapest méretű város menetrendjének megvalósítása kezelhető időn belül megoldható.

1.3 A dolgozat felépítése

Az **első** fejezetben áttekintettem az irányelveket, szabályozásokat, rendeleteket, amelyek jelenleg a legfontosabb keretek a városi közösségi buszközlekedés területén a város- és ágazati vezetők számára. A tervezés, működtetés és ellenőrzés szempontjából feltártam a városi közlekedés feladatait. Meghatároztam a dolgozat célkitűzéseit, kutatási kérdéseit és vizsgálati módszereit.

A **második** fejezetben elvégeztem a járműütemezési problémák és a P-gráf módszertan szakirodalmi áttekintését, mivel a feladatok megoldása nagyban függ attól, hogy rendelkezésre áll-e megfelelő eszköztrendszer az optimális megoldás szisztematikus és hatékony megtalálásához.

A **harmadik** fejezetben a menetrendtervezés részletes tárgyalását végeztem el, melynek során kifejtettem a menetrendkészítés folyamatát, annak részeként a vezénylési feladatokat, a járművezető ütemezési, beosztási és hozzárendelési problémát is áttekintettem. Azonosítottam a hatékonyság mérésére szolgáló mutatószámokat. Konkrét példákon keresztül bemutattam a jelenlegi menetrend megvalósítási gyakorlatot.

A **negyedik** fejezetben Big data alapú megközelítéssel megvizsgáltam az adathalmazok rejtett és komplex összefüggéseit, és az ebből kinyerhető információt. Felderítettem, hogy automatizációval és algoritmos módszerek alkalmazásával a kutatás középpontjában lévő városi buszközlekedés paraméterei és hatékonysági mutatói mérhetők és javíthatók.

Az **ötödik** fejezetben egy klasszikus algoritmikus módszer adaptációját használtam a menetrend megvalósítási feladatokra. Az alkalmazott megoldás alapja egy, a szakirodalomban publikált kombinált jármű- és személyzet-ütemezés optimalizáló modell. Gyakorlati példákon keresztül a kidolgozott módszer számítási eredményeit összevettem a harmadik fejezetben tárgyalt, kézzel készített menetrendekkel, és levontam a következtetéseket.

A **hatodik** fejezetben a klasszikus folyamathálózat szintézis módszertant adaptáltam a városi buszközlekedési feladatosztályra. Tanulmányoztam az ütemes menetrend típusok és a tetszőleges járatindítású menetrend típusok P-gráf módszertanra alapozott magvalósítását. Kidolgoztam az adekvát matematikai programozási modellt.

A **hetedik** fejezetben összefoglaltam az elvégzett munkát. Megállapítottam, hogy az optimalizálás újszerű megközelítésének gyakorlati alkalmazásával hatékonyabb erőforrás-gazdálkodás érhető el.

A **nyolcadik** fejezetben a menetrend megvalósítási feladat P-gráf alapú modellezésének eddigi elméleti eredményei alapján felvázoltam a továbbfejlesztési lehetőségeket.

2 Szakirodalmi áttekintés

Az alábbiakban a szakirodalom tanulmányozása alapján összefoglalom a jármű- és járművezetőkkel kapcsolatos ütemezési problémákat, valamint a megoldási módszereket.

2.1 A járműütemezés

A járműütemezés (angol szakszóval Vehicle Routing Problems, röviden VRP, vagy Vehicle Scheduling Problems, röviden VSP) az egyike a legfontosabb és széles körben vizsgált kombinatorikus optimalizálási problémáknak. Több, mint fél évszázad telt el Dantzig és Ramser [5] eredeti problémafelvetése óta, melyben egy valós, gyakorlati problémát írtak le; a benzin-töltőállomásokra való kiszállítást. Ők voltak az elsők, akik a problémát matematikai programozási feladatként formalizálták, továbbá a probléma algoritmikus megközelítését javasolták. Csak pár évet kellett várni, hogy Clarke és Wright [6] 1964-ben publikáljon egy heurisztikus, mohó, ám igen hatékony algoritmust, amellyel sikerült a Dantzig és Ramser által elért eredményeket tovább javítani. Az algoritmus az adott pillanatban a legkedvezőbbnek tűnő lehetőséget választja, jellemzője, hogy gyors és egyszerű. Ezen két publikáció jelentősége abban a többszáz modellben és algoritmusban mérhető le, amelyeket a megjelenésüket követő években dolgoztak, illetve dolgoznak ki mind a mai napig a különböző ütemezési feladatok optimális, vagy közelítőleg optimális eredményeinek meghatározására.

A járműütemezési feladatok megoldására az azóta eltelt időben is számtalan algoritmust dolgoztak ki, melyek túlnyomó többsége heurisztikákat használ, ami önmagában mutatja a feladat nehézségét. A VRP a klasszikus utazóügynök probléma (Traveling Salesman Problem, TSP) [7] általánosítása, ezért NP-nehéz feladatnak számít. Gyakorlati szempontból nehezebb egy VRP-t megoldani, mint egy hasonló méretű TSP-t. A különböző VRP feladatok különböző algoritmusokat igényelnek, mivel az az algoritmus, ami jól működik az egyik típus esetén, elég gyengén teljesíthet más típusok esetén.

Az útvonalaknak számos működési feltételt teljesíteniük kell. A VRP problémátípusokat, a feladatok rendszerezését több szakirodalom is tárgyalja. Elsősorban P. Toth és D. Vigo könyvében [8] összefoglalva megtalálható, továbbá Bárány Máté József dolgozatában [9], és Frits Márton doktori értekezésében [10] is részletesen foglalkozik a definíciókkal és a formális leírásokkal.

Problémátípusok:

- CVRP (Capacitated Vehicle Routing Problem): A járműflotta azonos C kapacitású egyforma járművek halmaza. Minden egyes útvonalon az útvonalhoz rendelt jármű útvonala során a teljesítendő igények összege nem lehet nagyobb, mint a járművek C kapacitása. Dantzig és Ramser mutatták be a problémát 1959-ben [5].
- Idő ablak feltételes - VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Window): Minden ügyfélhez adott egy időintervallum (időablak), melyen belül megérkezhet a szállítmány (és megkezdhető a lepakolás). Ha a szállító az időablak előtt érkezik meg az ügyfélhez, akkor meg kell várnia annak kezdetét az ügyfél kiszolgálásával. Egyes megközelítéseknél az időablakon kívüli kiszolgálás (elsősorban késés) is megengedett, de a célfüggvénybe épülő büntetés megfizetése árán. Az ügyfélnek ennél a problémátípusnál általában kiszolgálási ideje is van (lepakoláshoz szükséges idő).
- CVRP with Backhauls - CVRP "visszaszállításokkal": Ilyenkor az útvonalakon a felpakolás és a lepakolás az ügyfeleknél egyaránt engedélyezett. Két halmazba oszthatók az ügyfelek: az első halmazból a raktárból kérnek szállítmányt, a második halmazból az áru felvételét és annak a raktárba szállítását kérik. Alapesetben a jármű útvonalát úgy kell meghatározni, hogy először a kiszállításokat végezze el, és csak akkor kezdhet neki a begyűjtésnek, ha mindegyik kiszállítással végzett. Ennek megfelelően az kiszállított áru össz mennyisége és a visszaszállított áru össz mennyisége külön-külön lehet legfeljebb annyi, mint a járművek C kapacitása.

- CVRP with Pick-up and Delivery: Adott megrendelések egy halmaza, ahol egy árut egy adott ponton kell felvenni és egy másik pontra szállítani, az útvonalak során az ügyfeleknél engedélyezett a fel-ill. lepakolás. A járművek útja a központi telephelyről indul és oda érkezik vissza, olyan kell legyen, hogy egy adott megrendelés felvevő pontját a kiszállítási pontja előtt kell meglátogasson; illetve bármely járművön az út bármely pillanatában a töltés nem haladhatja meg a C kapacitást.
- Távolság vagy idő feltétel minden útra, Distance-Constrained VRP (DCVRP): Bármely jármű által megtett úthossz nem lehet nagyobb egy megadott értéknél. Ennek változata, amikor az útvonal megtételéhez szükséges idő nem léphet túl egy megadott korlátot - a járművezető munkaidejére vonatkozó szabályozást lehet ezzel a feladattal beépíteni. Az útvonal megtételéhez szükséges időt kétféleképpen értelmezhetjük: lehet csupán a vezetési idő, illetve lehet a vezetési idő a jármű felrakodásával és a megrendelőknél történő lepakolásokkal együtt.
- Period VRP: Több naptól álló periódusra kell tervezni; először elosztani az ügyfeleket a különböző napokra, majd minden napra meghatározni az útvonalakat.
- Multi-depot Vehicle Routing problem (MDVRP) / Multi-depot Vehicle Scheduling problem (MDVSP): Ebben az esetben nem egyetlen központi telephely/raktár van, hanem több.
- CVRP inhomogén járműflottával: A flottában levő járművek kapacitása különböző, emellett egyéb paraméterekben is eltérhetnek, mint az átlagos gyorsaság vagy az ügyfelek kiszolgálásának ideje (kirakodás, stb.).

Sztochasztikus VRP: Előfordulhat, hogy induláskor a jármű nem tudja az egyes megrendelések méretét, az csak a helyszínen derül ki. Ekkor lennie kell egy stratégiának arra az esetre is, ha a járműből elfogy az áru, mielőtt az összes megrendelést teljesítette volna; például a legrövidebb úton visszatérni a raktárba további áruért. Egyéb sztochasztikus variánsok: Változó lehet az igény mérete mellett az időpontja, a helyszíne olyan esetekben, amikor az ügyfelek igényeiről, az úthálózatban egyes költségekről, utazási időkről csak részleges tudás áll rendelkezésre.

- Dinamikus vagy valós-idejű VRP: A probléma online változata. Az egyik típus figyeli az utak megtervezése után beérkező új megrendeléseket. Ekkor kibővíthető, megváltoztatható a járművek eredeti útja az új kérések kiszolgálásával. Másik típusban valós idejű információk lehetnek a jármű tartózkodási helyéről és az útviszonyokról (például baleset miatti torlódás). Ekkor újra lehet tervezni az útvonalat a költségek csökkentésére és a vevők időablakainak elérésére. Ezekben a modellekben is lehetséges a megrendelések visszautasítása.
- Egyéb variánsok, feltételek, korlátozások:
 - o Ha a járműflotta összkapacitása nem tudja kiszolgálni az igényeket, akkor a célfüggvény lehet a teljesített kérések maximalizálása.
 - o Ha több napos utat tervezünk egy járműnek, akkor biztosítani kell éjszakára a parkolás lehetőségét számára.
 - o Osztható igények esetén lehetőség van az ügyfelek több jármű általi kiszolgálására.

A közösségi közlekedéshez kapcsolódó fogalmakat és a forgalom lebonyolításával kapcsolatos általános ismereteket a Közforgalmú Közlekedés I. és II. foglalkozás össze a Széchenyi István Egyetem közlekedésmérnök szak jegyzete alapján [1].

Egy jármű ütemezése a járatoknak egy olyan lánc, amelyben minden egymást követő két menetrendi járat egymással kompatibilis, tehát a jármű az egyik járat végrehajtása után képes időben odaérkezni a másik járat indulási helyére, annak indulási idejéig. Általában egy jármű ütemezése a gyakorlatban egy jármű egy napi munkájának előírását jelenti, amit műszaknak, jármű-műszakoknak is nevezünk. A jármű egy érvényes ütemezése egy kiállási járatval kezdődik, és egy beállási járatval végződik. Ha az első járat érkezési állomása nem egyezik meg a második járat indulási állomásával, akkor figyelembe kell vennünk az állomások közötti rezsijáratok idejét. Előfordulhat, hogy a szabályok között olyan előírások is vannak, amelyek két járat között kötelezően betartandó technológiai időt is előírnak. Ebben az esetben a kompatibilitás vizsgálatánál értelemszerűen ezt is figyelembe kell venni. Feltesszük, hogy a kiállási és beállási járatok mindig kompatibilisek egymással.

Az intervallumok járatigényének változása miatt az egyes vonalakon új intervallum kezdetén előfordulhat, hogy a járműszükséglet csökken, míg más vonalakon ugyanaz növekszik. A járművek jobb kihasználása érhető el akkor, ha ilyen esetekben az egyik vonalon felszabaduló jármű a másik vonalon folytatja munkáját. A csúcsidőszakon kívül a fordulódőt úgy állapítják meg általában, hogy a végállomási tartózkodási idő csökkentése révén a járművek egy-egy fordulóra kivethetők legyenek, pl. étkezési szünet céljából. Amennyiben a városban több járműtelep is van, meg kell tervezni, hogy melyik telep melyik vonalat szolgálja ki. A kiszolgálás rendjét úgy kell megszabni, hogy a kiállási teljesítmények lehetőleg minimálisak legyenek.

A járművek és járművezetők útvonaltervezésével és menetrendjével kapcsolatos problémák átfogó áttekintését L. Bodin [11] cikke tartalmazza. A cikk az útválasztási és ütemezési problémák osztályozásával, kategorizálásával, az algoritmikus technikák és a megoldási módszertanok áttekintésével foglalkozik. A leggyakrabban használt modell a járműütemezési feladat megoldására a többdepós járműütemezési probléma. Ez a viszonylag általános modell azt az esetet tükrözi, hogy a valós életben, a különböző menetrendi járatokra (azok járműveire) különböző speciális igények vonatkozhatnak; a különböző járműtípus, valamint a járművek tartózkodási helye alapján a járműveket különböző telephelyekhez rendelhetjük, stb.

A problémák megoldása azonban elsősorban elméleti. Hatékony algoritmusok csak egyes speciális feladatoknál léteznek, általános esetben, illetve más specialitások figyelembevételével már csak nehézkesen alkalmazhatóak. Egy általános érvényű algoritmikus megoldás megfelelő kidolgozását jelentősen nehezíti az a számtalan körülmény, amely együttesen bonyolult, így informatikai szempontból bonyolultan leképezhető feltételrendszert támaszt. A többféle üzemeltetett járműtípus technikai jellemzői, a több szolgáltató által üzemeltetett viszonylatok, valamint a mindenkori hatályos munka törvénykönyvéről szóló 2012. évi I. törvényből (a továbbiakban: Munka Törvénykönyve) és a kollektív szerződésből következő foglalkoztatási szabályok sok paraméter megadását igénylik a feladatmegoldás során. Ezért kijelenthető, hogy a [11]-ben javasolt modellezési megközelítések nem képesek a gyakorlatban megoldani valós hazai problémákat.

Az idő-tér hálózati modellt gyakran használják a változók számának csökkentésére a megoldás során. Ezt a modellt tárgyalja N. Kliwer [12], amely a kapcsolat-alapú hálózati modell helyett idő-tér alapú hálózati folyamat modellt alkalmaz. Ez a megközelítés a megfelelő matematikai programozási modellek méretcsökkentéséhez vezet a kapcsolat-alapú hálózati áramlási modellekhez képest. A felírt modell mérete jelentősen csökkenthető a bejövő és a kimenő élek összesítésével. A módszerek kombinációjának képesnek kell lennie a gyakorlati szempontból érdekes problémák nagy számának megoldására elfogadható futási idő alatt. A kombinatorikus optimalizációt alkalmazó egész értékű lineáris programozási megközelítés A. Löbel [13] cikkében látható. A manapság legelterjedtebb modellekben a járműütemezési problémát többtermékes egész értékű hálózati folyamproblémaként fogalmazzák meg.

Ebben a modellben az optimális ütemezés kiszámolható egész értékű lineáris programozás megoldásaként. A módszerek a korlátozás- és szétválasztás eljárást is gyakran alkalmazzák. Az oszlopgenerációs technikák mindkét megközelítéshez nélkülözhetetlenek tűnnek. Az oszlopgenerálást úgy fejlesztették ki, hogy lehetővé tegye a nagyméretű lineáris programozási feladatok megoldását nagyszámú, akár többmillió egész értékű változóval. Az új oszlopok kiválasztásának egyfajta szabályai a Lagrange-féle relaxáláson alapulnak, ezért Lagrange-árazásoknak nevezik őket. Más modellek is léteznek ennek a problémának a megoldására. A probléma például úgy is megfogalmazható, mint egy hálózat-particionálási probléma oldalsó korlátokkal, amelynek folyamatos relaxációja oszlopgenerálással megoldható [14]. Ebben az esetben kapcsolat jön létre a hozzárendelés relaxációja, a legrövidebb út relaxáció, az additív technika, a Lagrange-dekompozíció és az oszlopgenerálás által kapott határok között. A hálózat-particionálás folyamatos relaxációja sokkal szigorúbb alsó határt biztosít, mint az additív kötött eljárás. A [14]-ben megállapításra került az is, hogy az additív technika nem képes szigorúbb határokat biztosítani, mint a Lagrange-féle relaxáció. Csakúgy, mint a [15]-ben, a változó rögzítés, vágási élek, valamint a vegyes elágazás és kötött algoritmus, valamint a legjobb, legmélyebb stratégia bevezetése jelentős javulást eredményez egy oszlopgeneráló algoritmus teljesítményében az ütemezési probléma megoldása érdekében. Dávid és Krész heurisztikus módszert javasoltak [16]. A szakirodalomban tárgyalt és használt modellek hátránya egy konkrét gyakorlati helyzetben az, hogy csak az ütemezett és a rezsire vonatkozó buszokra, az ezekhez szükséges kapacitásokra vonatkozó szabályokat veszi figyelembe. Valódi alkalmazási környezetből származó konkrét feltételeket azonban nem lehet beilleszteni. A közösségi közlekedés üzemeltetési feladatainak megtervezésekor ilyen tipikus járműspecifikus feltételek az üzemanyag-fogyasztási szabályok, a különböző karbantartási követelmények (heti, havi stb.), valamint a tárolási szabályok. A tárolási szabályok mind a nappali, mind az éjszakai tárolásra vonatkozhatnak: hol parkoljon, mekkora kapacitással rendelkeznek a parkolóhelyek stb. A szakirodalom a járműütemezési probléma több különböző változatát tárgyalja, általában a járműtípusok és a telephelyek száma alapján. A legegyszerűbb változat az egytelephelyes ütemezési probléma megoldása (Single Depot Vehicle Scheduling Problem - SDVSP), ahol a járművek egy járműtípusba tartoznak, és ugyanazon a fizikai helyen találhatóak. Az SDVSP első megoldását Saha tette közzé [17]. A járműütemezési probléma megoldására a leggyakrabban használt modell az úgynevezett többtelephelyes ütemezési probléma (Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem - MDVSP). Ez az eset gyakorlati szempontból általánosabb, mint az egyetlen telephelyes modelleké, mivel a valóságban a különböző menetrend szerinti járatoknak (járműveiknek) eltérő speciális igényeik lehetnek. A járművek a különböző járműtípusok és a járművek elhelyezkedése alapján különböző telephelyekre vannak felosztva. Az MDVSP alapfeladata abból áll, hogy adjuk meg minimális számú jármű ütemezését úgy, hogy minden egyes menetrendi járat hozzá legyen rendelve pontosan egy jármű ütemezéséhez, és minden menetrendi járat a megfelelő, előírt depók valamelyikéből legyen végrehajtva. Bodin et al. [11] és Bertossi et al. [18] cikkükben bemutatták, hogy az MDVSP probléma NP-nehéz. Ezen túlmenően figyelembe kell venni a járműspecifikus tevékenységek feladatait is, amihez általános keretrendszerre van szükség a jármű integrált ütemezéséhez és hozzárendeléséhez. A [19] egy olyan particionáláson alapuló matematikai modellt mutat be, amelybe a legtöbb járműspecifikus tevékenység integrálható a megadott korlátozó feltételek alapján. A matematikai megoldást oszlopgenerálási megközelítéssel oldják meg. A megoldási idő csökkenthető az oszlopgenerálási folyamat párhuzamosításával.

Ha a szállítótársaság alternatív üzemanyaggal működő járműveket is használ flottájában, ezek ütemezésénél figyelembe kell venni az üzemanyag-feltöltésenkénti kilométerszámot, amely adott esetben jóval kevesebb lehet, mint a hagyományos üzemanyagú járművek futásteljesítménye. Az alternatív üzemanyaggal működő járművek bevonása a buszközlekedési feladatok ellátási rendszerébe egyre népszerűbb, ebben az esetben döntő jelentősége van annak is, hogy az adott szolgáltatónál levő meglévő infrastruktúra hogyan tudja ezeket a járműveket kiszolgálni.

A járműütemezés problémája abban áll, hogy járműveket rendelnek egy adott járatú sorozat kiszolgálására kezdési és befejezési idővel. [20] bemutatja az alternatív üzemanyagú többtelephelyű

járművek ütemezésének problémáját, a szokásos többtelephelyű járműütemezési probléma módosítását, ha van egy adott üzemanyag-töltő állomáskészlet, és a járművek üzemanyag-kapacitását. A probléma bináris változókat tartalmazó vegyes egész értékű programozási feladatként, pontos oszloggeneráló algoritmussal és heurisztikus megoldással van megfogalmazva. [21] javaslatot tesz az elektromos buszok modelljére, akkumulátorcserével vagy gyors töltéssel egy akkumulátorállomáson, valamint jármű-menetrend szerinti modellt állít fel a sűrített földgáz-, dízel- vagy hibrid buszok maximális útvonal-távolságának korlátozásával. Mindkét modell NP-nehéz. Fontos téma az akkumulátortöltő állomások helyproblémájának tanulmányozása is. [22] áttekintést nyújt az akkumulátoros elektromos buszok fejlesztéséről. A szerzők minőségi elemzést végeznek az egyes hatósugar-módszerek erősségeiről és gyengeségeiről, valamint a különböző forrásokból hajtott buszok költségeiről és kibocsátásairól. Az alternatív energiaforrásokat használó buszokat tanulmányoznak a [23]-ban a kibocsátás csökkentésére beleértve néhány mérgező légszennyező anyagot és szén-dioxidot is. A különféle alternatív energiával üzemelő buszok életciklus-összehasonlítását a [24] tárgyalja a költség-haszon elemzés bemenő paramétereként.

A közelmúltban néhány más cikk a járműütemezés gyakorlati kérdéseit is tárgyalta. Dávid és Krész tanulmányozták a parkolási és a karbantartási kényszerek kezelésének lehetőségeit [25], valamint az ütemezés esetleges átütemezésének lehetőségeit [26]. A parkolási és karbantartási tevékenységek [27] kezelésére is javasoltak megoldást.

2.2 A járművezető ütemezés

A munkaerő költsége egy nagyon fontos, kiemelt összetevője az egész üzemi menetrend ütemezés feladatnak, így a dolgozók munkájának beosztása az előzőekben taglalt jármű ütemezési feladatok mellett szintén központi kérdés. Ennek megfelelően a Crew Scheduling Problem (CSP), más néven Driver Scheduling Problem vagy Duty Scheduling Problem a szakirodalomban tárgyalt fontos probléma.

A feladat ebben az esetben az, hogy úgy kell műszakokat rendezni és beosztani az adott időperiódusra (általában egy nap) vonatkozóan, hogy minden feladat hozzá legyen rendelve egy műszakhoz és a műszakok minden, a járművezetők számára előírt szabálynak megfeleljenek. Költségek szempontjából pedig a hozzárendelést úgy kell megadni, hogy eközben lehetőleg minimalizálásra kerüljön a kialakított műszakok költségeinek összege.

A létszámigény számításánál az alábbi tényezőket kell figyelembe venni [1]:

- a menetrendek, illetve járműforduló tervek alapján szükséges, szolgálatban töltött hasznos idő (ez az idő megegyezik a járművek üzemidejével, amikor a jármű üzemben van, a járművezetőnek is ott kell lenni),
- a szolgálat megkezdése előtt, illetve a szolgálat befejezése után szükséges munkaműveletek elvégzésének ideje (pl. a jármű átvizsgálása, takarítása, elszámolások elkészítése, tankolás, stb.) – ezt a két időfajtát együtt a tartózkodási időnek nevezzük,
- a közvetlen munkavégzésen kívül munkaidőként elszámolt időfelhasználások (pl. oktatáson töltött idő),
- betegség, szabadság miatt kieső idő,
- egyéb, igazolt távollét miatt a munkavégzésből kieső idő.

A forgalmi feladatokhoz kapcsolódó idők az adott időszakra menetrend alapján határozhatók meg, a többi szükséges időadat átlagos értéke a múltra vonatkozóan a munkaügyi statisztikából ismert.

A feladat tekintetében sok olyan feltétel van, amelyet a vonatkozó jogszabályok és az adott közlekedési vállalat dolgozóira vonatkozó szabályok, előírások határoznak meg. Ilyenek lehetnek a napi munkaidő-beosztásra vonatkozó szabályok, a maximális munkaidő és a napi pihenőidőkre vonatkozó előírások, a

kellő számú és idejű szünet biztosítása egy adott vezetési idő után, két munkabeosztás között kötelezően előírt pihenőidő stb. A menetrendi járatokon és a rezsimenetekon kívül sokféle technikai és adminisztrációs feladat is létezik, amelyeknek pontosan meghatározott ideje van. Ilyenek lehetnek az utasok ki- és beszállási ideje a járatok végállomásain, járművek átvétele, leállítása, parkolás, műszakkezdés és -befejezés, különböző technológiai idők stb.

A vezetési idő és a munkaidő különböző fogalmak, így ezekre eltérő szabályok vonatkozhatnak, miként arra is, hogy melyik technikai tevékenység ideje melyikbe számít bele. Ehhez hozzájárul még az is, hogy különböző vállalatoknál további korlátozó fogalmak és szabályok is előfordulhatnak.

A különböző tevékenységekhez tartozó munkavállalói költségeknek megfelelően az egyes feladatokhoz értelemszerűen költségeket tudunk rendelni. Így az egyes műszakok költségeinek kiszámításához a különböző tevékenységek költségeit össze kell adni.

A járművezető-ütemezés a hagyományos megközelítés alapján a járműütemezés után következik. Ez általában hatékonyan végrehajtható, ha a kialakított járműütemezés gyakran érint váltási helyeket. Erre azonban nincs mindig garancia, továbbá előfordulhat, hogy a kialakított járműütemezés túl „sűrű”, így nincs elég idő a járművezető-váltásra, vagy pihenésre. Ebben az esetben akár ronthatunk az előző fázis eredményén, veszíthetünk a hatékonyságból, sőt még az is előfordulhat, hogy a járművezető-ütemezés megoldhatatlanná válik az adott járműütemezés mellett. A járműütemezés és a járművezető-ütemezés egyszerre történő elvégzése emiatt logikusnak tűnik, és ez napjaink egyik fontos kutatási területe.

Az irodalomban számos CSP megoldási módszer és alkalmazás található. Az egyik legismertebb az úgynevezett Generate and Select technológia. A módszer a következőképpen foglalható össze: első lépésben generáljon nagyszámú szabályos műszakot, majd a kiválasztási lépésben keresse meg azoknak egy olyan részhalmazát, amely költség szempontjából optimális és fedezi az járatokat. Az első fázis jelentős számítási időt igényel. A számítás mértéke nagymértékben függ a járatok számától és a szabályok összetettségétől. Ezen kívül a szabályok számítási bonyolultsága nagymértékben befolyásolja ennek a fázisnak a bonyolultságát, és így az egész problémát. A probléma meghatározható halmazlefedési vagy beállított particionálási feladatként is. A particionálási modell a fedési probléma korlátozott változatának is tekinthető, ahol átfedés nem lehetséges. Ez pontosan megfelel a valós életben előálló problémának, de ebben az esetben nem garantálható a megvalósítható megoldás megléte. Ennek a problémának a megoldására sokféle módszer létezik. Egy genetikai algoritmust magában foglaló hibrid megközelítést mutat be a [28]. A jó váltások kis választékát eredményezi a mohó megközelítés heurisztikus megvalósításához, amelyet a genetikai algoritmus használ az ütemtervezéshez. [29] szimulálja az önbeállítási folyamatot az illesztőprogram ütemezéséhez. Ez magában foglalja a fuzzy értékelés ötletét egy önbeállítási folyamatban, ötvözve az iteratív fejlesztés és a konstruktív zavarok jellemzőit, hogy hatékonyan feltárja a megoldási teret és jó ütemezéseket kapjon. A [30] rugalmas rendszert tervez az illesztőprogramok egész értékű programozási feladatok megoldásához, heurisztikus megoldási technikákat pedig a [31], [32], [33] nyújt.

Szükség van arra is, hogy mérni lehessen a szolgáltatások egységnyi megváltozására jutó költségek mennyiségét. Ez természetesen érvényes a javulásra és a romlásra egyaránt. A több-célfüggvényes módszer nemcsak azért lehet hasznos, mert a gyakorlat szempontjából összehasonlítható megoldásokat szolgáltat, hanem azért is, mert ezzel elkerülhető a szekvenciális megoldásokból adódó esetleges optimum veszteség is. Ibarra [34] egy ϵ -constraint módszert javasol a megoldás során, amelyben megadja a pontos kompromisszum (trade-off) függvényt a menetrend és ennek teljesítéséhez szükséges járműpark között. Így a megoldás során egyidejűleg kezeli a két feladatot, elkerüli a szekvenciális megoldásokból adódó problémákat, és a teljes feladatra vonatkozó egzakt Pareto-optimumot szolgáltat.

2.3 A jármű- és személyzet ütemezés

A hagyományos megközelítés szerint a járművezető ütemezését a jármű ütemezésének fázisa után hajtják végre, erre utal a szekvenciális módszer elnevezés is. Ha azonban a jármű menetrendje túl sűrű, például nincs elegendő idő a járművezetők cseréjére, akkor a probléma megoldhatatlan lesz a járművezető ütemezésének szakaszában. Emiatt ésszerű lehet a jármű és a járművezető ütemezésének egyidejű optimalizálása.

Ezt a problémát jármű- és személyzet ütemezési problémának (VCSP) hívják. 1999-ben Haase és Friberg közzétették az algoritmikus módszerüket, amely pontos megoldást adott az egytelephelyes esetre [35]. Modelljükben egy integrált megfogalmazást adtak meg úgy, hogy mindkét részfeladatot meghatározott partíciós problémaként definiálták. A járműütemezési rész a Ribeiro és Soumis [14] által adott modellen alapszik, míg a járművezetői ütemezés rész Desrochers és Soumis ötleteit használja [36]. Többtelephelyes esetben először Gaffi et al. [37] heurisztikus módszerrel tárgyalta az integrált problémát.

2005-ben Huisman et al. [38] az egytelephelyes eset korábbi modelljeit és algoritmusait sikeresen kiterjesztették a többtelephelyes verzióra. Ez volt a multi-depot probléma első általános matematikai megfogalmazása, amely összehasonlítja az integrált megközelítést a hagyományos szekvenciális módszerekkel. Két különböző modellt és algoritmust mutat be az integrált jármű és személyzet ütemezéséhez, többtelephelyes verzióra. Az algoritmusok a Lagrange relaxáció és az oszlopgenerálás kombinációján alapulnak.

A jármű- és személyzet ütemezés esetén az alkalmazható matematikai eljárásokról, egy- és többdepós jármű- és vezetőütemezési modellekről, illetve gyakorlati problémák megoldásával kapcsolatos eredményekről Huisman PhD értekezésében találhatunk bővebb áttekintést [39].

Freling és Huisman a [40]-ben a megfelelő Lagrange-féle relaxációkat és Lagrange-féle heurisztikákat is tárgyalja. A Lagrange relaxációk megoldásához oszlopgenerálást alkalmaznak a partícionálási típusú modellek beállítására. Haase et al. [41] pontos megközelítést mutat be a városi közlekedési rendszerekben a jármű és a személyzet egyidejű menetrendje problémájának megoldására. Ez a megközelítés a járművezető ütemezési problémájának meghatározott partícionálási formulájára támaszkodik, amely magába foglalja a buszvonalakra vonatkozó korlátozásokat. 2008-ban Mesquita és Parias [42] két matematikai programozási modellt is szolgáltatott ehhez a problémához. 2019-ben Horváth és Kis [43] egy új matematikai programozási modellt javasolt, amely ismert modellek ötleteit ötvözve bemutatta a branch and bound-on alapuló megoldási technikát. 2010-ben Steinzen et al. [44] egy másik teljesen integrált VCSP megközelítést adott, ahol a mögöttes járműütemezési modell az idő-tér hálózati technikán alapult.

Konklúzió

A jármű- és járművezetővel kapcsolatos ütemezési problémák és megoldási módszerek irodalmi áttekintése során bemutatásra került algoritmusok, mint szekvenciális modellek meghatározott sorrendben törekednek az optimalizálásra, de az integrált, egyidejű módszerek kialakításának lehetőségei terén is komoly eredmények találhatók. A városi buszközlekedést elméleti szempontból vizsgálva megállapítható, hogy nehéz az egzakt, vagy a közel egzakt megoldások megkeresése a gyakorlatban felmerülő problémák esetén. Már néhány százezer fős városok esetén is nehezen kezelhető, összetett feladattal állunk szemben, amely tovább bonyolódhat, ha a jogszabályok, az egyéni igények, és munkavállalói érdekek figyelembe vétele is megkövetelt a megoldás során. Ilyen korlátozó feltételek lehetnek a munkaidőre, a járművezetés idejére, a járművezetők munkaszüneteire vonatkozó előírások, de egyes esetekben tekintettel kell lenni a telephelyek kötöttségeire is.

A szakirodalom tanulmányozását követően általánosan elmondható, hogy a hazai gyakorlati problémákra a publikált megoldások csak jelentősen egyszerűsített, csökkentett számú paraméterekkel

és/vagy korlátozásokkal lennének adaptálhatóak. Az ezekre az algoritmusokra alapozott, a piacon elérhető ún. „dobozos szoftverek” (pl. IVU, PTV, Goal Systems, SAP, Microsoft, stb.), amelyek a menetrend megvalósulási folyamatot célzottan támogatják, a nagy járműflottát üzemeltető cégek belső köreiben már elérhetőek. A felhasználói tapasztalatok azt mutatják, hogy ezen szoftverek sokszor nem a helyi viszonyoknak megfelelő gyakorlatot követve működnek, egyrészt koránt sem teljesekek, másrészt az alkalmazott módszerek tekintetében is folyamatos fejlesztésre szorulnak. A helyi adottságokat figyelembe vevő, vagy azt adaptáló egy-egy programmódosítás akár csak hosszú évek alatt valósul meg. Ezért erre a problémára jelenleg még nincs egységes, általános érvényű megoldás és így megfelelő támogatás sem.

2.4 A P-gráf módszertan irodalmi áttekintése

Az előző fejezetekben láthattuk, hogy a VRP feladatok megoldására kidolgozott algoritmusok nagy része valamilyen heurisztikát alkalmaz az optimum keresése során, amik nem tudják garantálni, hogy a kapott optimum globális optimum. A P-gráf módszertanra alapozott menetrend modellezés, megvalósítás (jármű- és járművezető ütemezés) valamint optimalizálás számos ponton eltér az eddig bemutatott módszerektől. A következőkben áttekintem a módszertannal kapcsolatos szakirodalmat.

A P-gráf módszertant az 1990-es évek elején dolgozták ki komplex vegyipari gyártórendszerek modellezésére és optimalizálására Friedler Ferenc és L.T. Fan professzorok vezetésével. A nevét az alkalmazott irányított páros gráfról (Process Graph) kapta [45] és [46].

A P-gráf módszertant ma már többféle, egymástól különböző területeken alkalmazzák. Például Kovács et al. [47] és [48]. Bertók et al. [49] az ellátási láncok optimális kialakítását vizsgálta.

Bárány et al. [50] P-gráf alapú módszert javasolnak a járműütemezés szállítási költségeinek és környezeti hatásainak minimalizálása érdekében. A hozzárendelési problémát P-gráfes reprezentációból kiindulva oldják meg, amely megadja a strukturális modellt és a megoldás alapját. A megközelítés magában foglalja a maximális struktúragenerálást, amely további inputként szolgál a matematikai programozási modell létrehozásához és megoldásához. A módszer végén megadják az optimális és véges számú n-legjobb szuboptimális megoldást.

Garcia-Ojeda et al. [51] P-gráfes megoldást mutattak be a menekülési útvonalak tervezésére, amely evakuálási helyzetek ütemezése során kritikus lehet. Lam et al. [52] a P-gráf kiterjesztett megvalósítását mutatta be egy nyílt szerkezetű biomassza-hálózat szintéziséhez.

Tick [53] az üzleti folyamatok modellezésének irányába kiterjesztett munkafolyamat-problémákat vizsgálta.

Tick et al. [54] P-gráf módszertant alkalmazta az üzleti folyamatok modellezésére, névleges és kibővített költségeket egyaránt megadva az egyes működési egységeknek, figyelembe véve, hogy csak korlátozott számú működési egységnek van kiterjesztett költsége, a többinek pedig nominális költsége.

Almási et al. [55] az üzleti folyamatok modellezésének irányába kiterjesztett munkafolyamat-problémákat egy továbbfejlesztés során robusztus PNS-problémának nevezte el.

Az adaptív komplex rendszerek szervezeti modell alapú multiagens rendszer tervezés P-gráfes alkalmazását láthatjuk Gracia-Ojeda et al. [56] tanulmányában.

Heckl et al. [57] többperiódusos műveleteket tárgyalnak P-gráf keretrendszerrel, míg Atkins et al. [58] a P-gráf módszertan segítségével vizsgálják a feldolgozás melléktermékeinek biofinomítókban történő hasznosításának gazdasági megvalósíthatóságát.

Vincze et al. [59] a CPM problémákat P-gráfokká alakították át, hogy az alternatív feladatok és megoldások helyzetét egy lépésben kezeljék. Számos megfelelő matematikai programozási modellt adtak, szemléltetve, hogyan jelennek meg az alternatív esetek a struktúrában.

Ercsey [60] a ruhagyártás problémájára nyújt megoldási javaslatot P-gráffal. A javasolt modell elsősorban a korlátos pénzügyi és emberi erőforrások szempontjából meghatározott alternatívákat kezeli.

Benjamin et al. [61] módszertant javasolnak az integrált bioenergia-rendszerekben lévő kritikus részek üzemeltetésének elemzésére az üzemzavarok elleni robusztusság növelése érdekében.

Aviso et al. [62] fenntartható energiarendszer több időszakos optimalizálását vizsgálja az üvegházhatást okozó gázok kibocsátásának csökkentése érdekében.

Kovács et al. [63] feltárta a szétválasztási hálózatok alapvető strukturális tulajdonságait, és tanulmányozta az alkalmazott matematikai programozási modellek érvényességét, különös tekintettel a redundanciára. Kimutatta a szintézis alapú megközelítés fontosságát, amely kritikus lehet az optimális szétválasztó hálózatok keresése során.

Bartos és Bertók [64] P-gráfokkal határozta meg az autóiipari és az elektronikus gyártósorok optimális terhelését, ahol az összeszerelés különféle alkatrészeket és jelentős számú emberi erőforrást igényel. A matematikai programozási modell algoritmikus előállítása és az azt követő optimális megoldás mellett a P-gráfok vizuálisan is támogatják a munkavállalók feladatokhoz rendelését.

Bertók és Bartos [65] nemrégiben egy optimalizálási módszert javasolt a megújuló energiaforrások energia-allokációjához és tárolásához, figyelembe véve a termelők, a tárolók és a fogyasztók különböző prioritásait. Kiterjesztették az eredeti P-gráf módszertant a többperiódusos irányra, valamint arra az esetre, ahol a célok és a köztes entitások nem halmazhatók fel.

Sanmarti et al. [66] P-gráfokat használtak a többcélú, kötegelt ütemezési feladatok megoldására.

Süle et al. [67] korlátozásokkal, valamint a megújuló erőforrások bizonytalanságainak figyelembevételével vizsgálták az ellátási láncok megoldását, vagyis az n- legjövődélmezőbb ellátási lánc-alternatívák előállításakor figyelembe veszik a nyersanyagok elérhetőségének általános megbízhatóságát is.

Cabezas et al. [68] a fenntartható folyamatrendszereket és az ellátási láncokat elemezték áttekinthető cikkükben. Alaposan megvizsgálták a P-gráf módszertan használhatóságát, valamint az összefüggéseket más módszerekkel. Ábrázolták a P-gráfok lehetséges alkalmazásának előnyeit a megvalósítható struktúrák szempontjából is.

Tan et al. [69] a P-gráfokat Monte Carlo-szimulációs megközelítéssel kombinálva alkalmazták a szén-dioxid-gazdálkodás tervezéséhez, annak érdekében, hogy az általános rendszereket a CO₂-kibocsátás szempontjából minimalizálni lehessen. Céljuk a robusztus és közel optimális szén-dioxid-gazdálkodási hálózatok azonosítása volt, amelyet a P-gráf módszertan által generált optimális és közel optimális megoldások alapján érnek el.

König É. és Bertók [70] a P-gráfokat alkalmazták az áruszállításra, és bemutattak egy algoritmikus módszert, amely minden megvalósítható forgatókönyv bevonására és felsorolására alkalmas, amikor a felmerülő bizonytalanság esetén elemzik a szerződések feltételeit, vagyis azt szükséges elemezni, hogy melyik megoldás olcsóbb, vagy kínál nagyobb rugalmasságot.

Fan YV et al. [71] P-gráfokat használtak döntéstámogató eszközként a hulladékgazdálkodási rendszerek integrált tervezésének kidolgozásához a körforgásos gazdaság támogatására. Számos esettanulmányt vettek figyelembe a települési szilárd hulladék összetétele alapján az ország különböző jövődéli

szintjein alapulva, meghatározták a legmegfelelőbb kezelési megközelítést, valamint a közel optimális megoldásokat annak érdekében, hogy kezeljék az ellentmondásos célokból adódó nehézségeket.

Tan RR és Aviso [72] a P-gráf megközelítés kiterjesztését javasolják a többperiódusú folyamathálózati szintézishez annak érdekében, hogy fiktív folyamatok hozzáadásával figyelembe lehessen venni a folyamategységek részleges terhelésének alsó működési határait is.

Konklúzió

A P-gráf módszertanra alapozott menetrend modellezés, -megvalósítás tanulmányozása alapján általánosságban elmondható, hogy az üzemi menetrend megvalósítási folyamat egészének optimalizálására olyan „workflow” megközelítésű modellezés körébe sorolható, folyamat-alapú módszer, amely garantáltan optimális feladatmegoldáshoz vezetne, ma nem érhető el. A struktúraoptimalizálás ezen a területen napjainkban még inkább tapasztalati úton valósul meg, nem pedig tudományosan megalapozott módon.

A P-gráf módszertan irodalmi áttekintését követően megállapítható, hogy az általános módszert sikeresen adaptálták számos alkalmazási területre. Ez indokolja az új kutatási irányt, a P-gráf módszertanra alapozott menetrend modellezést és megvalósítást (jármű- és járművezető ütemezés), azaz a városi buszközlekedés alkalmazási területre történő P-gráf módszertan adaptációt.

A következő fejezetben bemutatom az általános és a BKV specifikus menetrendkészítés gyakorlatát, mely az azt követő fejezetekben tárgyalt vizsgálatom szakmai megalapozását képezi.

3 A menetrendkészítés folyamata

A kutatásom középpontjában lévő optimalizációs vizsgálódásaimhoz körül kell járni az általános és BKV specifikus menetrendkészítés gyakorlatát, melyek megismerését követően pontosabban meg lehet határozni a módszertant, megvalósítani a modellt és a kutatás eredményét átültetni a napi üzemeltetésbe.

A menetrend a közlekedésre vonatkozó közlekedési rendet határozza meg. A szolgáltatóra vonatkozóan közszolgáltatási kötelezettséget jelent az abban foglaltak teljesítése. Az üzem szempontjából a menetrend legfontosabb szerepe az, hogy a forgalom szabályozása révén tervszerűvé tegye a közlekedés lebonyolítását. A menetrendre épül fel a személyforgalom többi terve, mint például a teljesítményi terv, költség terv és munkaügyi terv. A menetrend készítés üzemi jelentősége az utazási szükségletek optimális kielégítése az ehhez szükséges járműteljesítmények minimalizálásával. Mivel a megrendelt teljesítmény a menetrendekben kerül megtervezésre, ezért ennek a tervezésnek a színvonalától függ a végeredmény minősége. Egy Budapest méretű város napi menetrendje a viszonylatok függvényében akár több száz adathalmazból is állhat, amit a szezonális nagyságban és dinamikusan befolyásol.

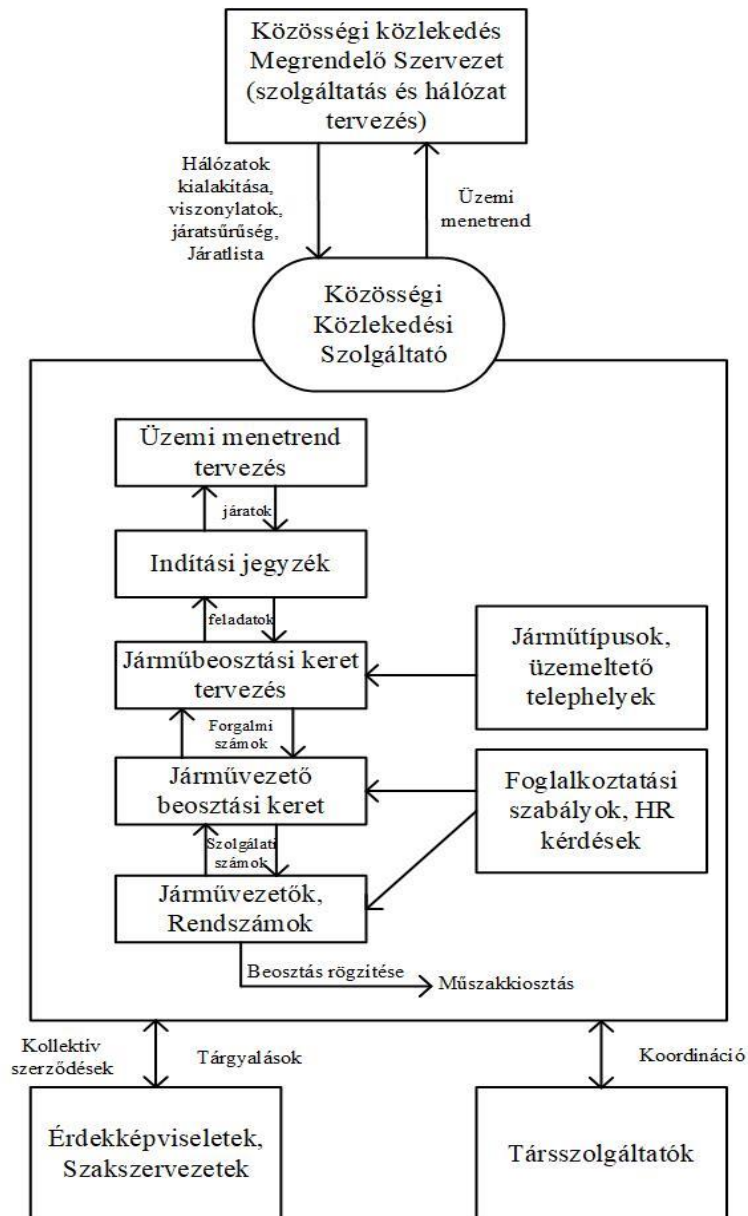
A rendelkezésre álló menetrend és a teljesítéséhez szükséges erőforrások ütemezése közötti kapcsolatot a szolgáltatások szintjéhez rendelt költség-haszon jelenti. A rendszerek napi működéséhez tartozó elemzés hiányos a kérdéssel foglalkozó szakirodalomban. Mivel a szolgáltatások szintje és a működtetési költségek általában konfliktusban vannak egymással, a vizsgált rendszerek célja általában az, hogy egy olyan megoldást találjanak, amely egy kompromisszum megkeresését tűzi ki célul a két részfeladat együttes megoldása során.

A menetrendkészítési folyamathálózat tartalmazza azt, hogy mely szervezetek milyen tevékenységeket végeznek el, illetve ezek milyen kapcsolatban állnak egymással. Az általános városi közlekedésre vonatkozó kapcsolati hálót láthatjuk a 3. ábrán, amely természetesen igaz a buszközlekedésre is. A közösségi közlekedési szolgáltatótól független szervezet kezdeményezi a folyamatot azzal, hogy egy előzetesen elvárt tervezési feladat megoldását várja el.

A menetrendkészítés során kerül végrehajtásra az üzemi menetrend tervezése, az indítási jegyzék elkészítése, a járműbeosztási keret meghatározása, a járművezetői beosztási keret meghatározása. Az elkészült menetrend alapján történik a járművezetők hozzárendelése. E komplex folyamat alapvetően három külön részre határozható, de összefüggő fő részekből áll:

- Indítási jegyzék: Az indítási jegyzék a végállomási indulási és érkezési időpontokat tartalmazó táblázat. A különböző vonalak indítási jegyzékeinek elkészítése viszonylag egyszerűen, a paraméterlapok alapján elvégezhető, azonban azok összehangolása után a beosztási keretek elkészítése már bonyolultabb matematikai ismeretek alkalmazását igényli jellemzően a gráfelmélet és lineáris programozás területéről.
- Járműbeosztási keret: A járműbeosztási keretek egy adott indítási jegyzék alapján készülnek, mely során az elsődleges szempont többek között az adott közlekedési társaság járművei számának minimalizálása, valamint a különböző garázsmenetek/rezsimenetek hosszának lehetőség szerinti csökkentése. A jelenlegi gyakorlat nagyrészt gráfelméleti és kombinatorikai optimalizálási módszereket használ.
- Járművezetői beosztási keret: A járművezetői beosztási keret lényegében egy adott járművezető adott időszakra meghatározott munkafeladata.

Természetesen mindez úgy történik, hogy az elérhető járműtípusok és az üzemeltető telephelyek érintettségére éppúgy figyelemmel kell lenni, mint a foglalkoztatási szabályokra és a kapcsolódó HR kérdésekre. A folyamat kereteihez hozzájárulnak további meghatározó szereplők, nevezetesen az érdekképviselők, szakszervezetek és a társszolgáltatók is.



3. ábra. Az általános menetrend készítés folyamata
(Forrás: saját szerkesztés)

Az alapmenetrendeken felül meg kell különböztetni rendkívüli vagy alkalmi menetrendet, ha a rendkívüli szolgáltatás a hatályos szabályoknak megfelelő határidők szerint tervezhető; illetve operatív menetrendet, ha a menetrendi feladatokra a szükséges határidők nem állnak rendelkezésre. Gyakran előfordul továbbá, hogy az előre nem látható menetrend-változások, vagy az előre látható, de nagy tömegű változások jelentős és koncentrált terhelést adnak a menetrend-szerkesztőknek, akik ezért a határidőket nehezen, vagy csak jelentős túlmunkával tudják tartani. A gyakorlatban kapcsolódó nagymértékű manuális munkaigény miatt korlátozott a "próbálkozások" lehetősége, azaz egy-egy jobb vagy hatékonyabb megoldás megtalálása számos esetben nem lehetséges, illetve a háttérbe szorul.

A hazai gyakorlatban a legtöbb tervezési alkalmazás kézi adatfelvételen alapul, vezérlő algoritmusokkal. Az automatizálás egyes helyeken azonosítható csak, például a forgalmi naptár feltöltésekor, vagy a jármű/személyzet ütemezésében egy bizonyos szintű automatikus feltöltéssel, korlátozott matematikai háttérrel.

A számítógéppel támogatott menetrend készítés Meilton cikkében [73] részletes bemutatásra kerül. Az egyes részfolyamatokat különféle forgalomszimulációs és szolgáltatástervező szoftverek is támogathatják, amelyek között létezik általános célú megoldás és egy-egy részfeladat támogatásához kidolgozott célmegoldás is.

Az alábbiakban bemutatom a menetrend tervezésének és készítésének a főbb jellemzőit.

Ahogy a 3. ábrán is jól látható, a város és a közösségi közlekedés kapcsolata egy hálózatban testesül meg. A közösségi közlekedés megrendelőjének feladatai közé tartozik a stratégiai tervezés, a hálózat és a viszonylatok útvonalának kialakítása. A hálózattervezési folyamat annak összetettsége miatt részproblémákra oszlik, amelyek taktikai, stratégiai és operatív döntéseket is magukban foglalnak, lásd Közforgalmú Közlekedés [1], Desaulniers és Hickman [74] és Ceder [75].

A közlekedési hálózati tervezés során a megrendelő meghatározza a vonalak térbeli elhelyezkedését és a kapcsolódó üzemeltetési jellemzőket, például járműtípusokat és a megállók közötti távolságot.

A taktikai tervezés részeként meghatározásra kerül a járatsűrűség. Itt a feladatok közé tartozik az optimális menetrend megalkotásához a járat sűrűségének, hangolási rendjének kialakítása, valamint a járműkiadás területi és időbeni diszponálása. Ide tartozik ezen felül olyan követelmények teljesítése is, mint például a vonalak kapacitása vagy a járműtípusok figyelembevétele. Ez utóbbira példa lehet az is, hogy melyik vonalon és milyen arányban közlekedjenek az akadálymentes járművek. A járatsűrűsége az időegység alatt egy adott viszonylatban közlekedő járatok számát értjük (járat/óra, járat/nap, esetleg járat/hét). A működési periódusok és a keresleti minták (reggeli csúcs, reggeli csúcs utáni, délutáni csúcs stb.) alapján meghatározható az óránkénti járatok száma is.

Az előállt hálózatok, mint például a városi autóbuszvonalak, egy összetett hálózatot alkotnak. A közösségi közlekedési hálózatot vonalak vagy más néven viszonylatok alkotják. A vonalat a végállomások, az útvonal és az ehhez tartozó megállóhelyek határozzák meg. A hálózat jellegét a kialakított vonalak jellemzői és egymáshoz való kapcsolódásuk határozza meg. A vonalak hossza alapján lehetnek hosszú és rövid vonalakból álló, illetve ezek kombinációjából álló hálózatok. A hosszú viszonylatos rendszerben kevés átszállásra van szükség. A rövid viszonylatos rendszer alapelve, hogy egy-egy útvonalon csak egy, vagy legalábbis kevés viszonylat közlekedik. A hálózattal szemben általános követelmény, hogy feleljen meg az utasáramlatoknak, az utasok nagy része számára átszállásmentes eljutást tegyen lehetővé, és biztosítsa a közlekedési eszközök megfelelő kihasználását, a gazdaságos üzemvitelt. Továbbá fontos követelmény, hogy a közösségi közlekedési hálózat megfelelő alternatívát nyújtson az autóval közlekedők számára is.

A szolgáltatók az előírásoknak megfelelően végzik a személyszállítási feladatokat a kialakított hálózaton.

A viszonylatok üzemi menetrendjeit a megrendelői paraméterek alapján a szolgáltatók maguk készítik. Ez az ún. fordatervezés. A forda a járatokat a járművekhez autóbuszokra lebontva tartalmazza, vagyis a járatokat a járművekhez rendeli hozzá. Egy forda az egy autóbusz által kiszolgálható járatokat tartalmazza, vagyis a forda egy autóbusz egy napja. A menetrend napi teljesítéséhez annyi autóbuszra van szükség, amennyi a járműfordák száma. A fordatervezés során járatkapcsolásokat kell létrehozni, fordulóállomásonként meg kell határozni, hogy az egyes induló járatokat melyik érkező járat autóbusza teljesítse. A probléma egyszerűsített formában hozzárendelési feladatként is felfogható. A fordatervek készítése során követni kell a Munka Törvénykönyve, a társasági Kollektív Szerződés, valamint érintettség esetén a társoperátor foglalkoztatási szabályait, miközben a műszaki paraméterekre (adott járműtípus üzemanyag fogyasztása, tankmérete, stb.) is figyelmet kell fordítani. Kézenfekvő, hogy az üzemi menetrendek készítői számára jelentős időigényű feladat a fordakészítés, továbbá a fordakészítés minősége (jármű- és járművezető mennyiség, üzemóra stb.) jelentősen befolyásolja a hatékonyságot.

Fordatervezés során a feladatok magukban foglalják többek között a következőket:

- fordaszám minimalizálás,
- az összes járat fordával való lefedése,
- foglalkoztatási szabályok figyelembevétele.

A folyamat részeként járatnak nevezünk egy járműnek, pl. autóbussznak a kiinduló állomástól a célállomásig – meghatározott útvonalon és időben – történő egyszeri végighaladását.

A járatlista olyan adathalmazt jelöl, amely menetrend-típusonként és naptípusonként tartalmazza, hogy egy adott viszonylaton vagy viszonylatsoporton a készülő menetrendben milyen járatokat (indulási és érkezési időpontokat) kell biztosítani. A formátumát tekintve lehet az indítási jegyzékkel azonos vagy egyszerűbb táblázatos megjelenésű. A járatlisták és üzemi menetrendek átadása folyamatosan, napi szinten történik, meghatározott eljárásrend szerint, közvetlen munkavállalói szintű kapcsolattartással. A járműkiadási táblákban valamennyi naptípus tekintetében a törzskocsik napi maximális járműkiadását kell lekövetni, jármű típusonkénti, viszonylatonkénti és üzemeltetőkénti bontásban.

Az üzemi menetrendkészítés két bejövő paramétere a kezdő fordarendszer, azaz a járatlista és a járműkiadási táblázat. Mindkettőt a megrendelő határozza meg és biztosítja a szolgáltatók részére a vonatkozó határidők figyelembevételével.

Az operatív tervezés a rövid távú döntésekre összpontosít, mely döntések alapvető mozgatórugója a járművek használatával, az üzemanyag-fogyasztással és a járművezetők bérével kapcsolatos összköltségek közben tartása, lehetőség szerint minimalizálása. A közösségi közlekedés operatív tervezésének, ütemezésének elkészítését a legtöbb esetben 3 fázisra különítjük el. Ezek a következők: járművek ütemezése, a járművezetők ütemezése és a műszakkiosztás.

A folyamat részeként az alábbiakban néhány ismert részprobléma megnevezése következik.

- Közlekedési hálózati menetrend: Meghatározza az autóbusszok érkezési és indulási idejét az átszállítási kapcsolatokat a hálózat minden megállójára.
- Járműütemezési probléma (az angol megnevezés után rövidítése VSP): Meghatározza az utazási járművek hozzárendelését az összes tervezett utazás fedezésére úgy, hogy a járműhasználaton alapuló üzemeltetési költségek a lehető legkisebbek legyenek.
- Járművezető ütemezési probléma (az angol megnevezés után rövidítése CSP/DSP): Meghatározza a napi feladatokat, amelyek lefedik az összes menetrend szerinti utat, és minimalizálják a járművezetők bérének költségeit. A CSP/DSP megoldásának meg kell felelnie a járművezetőkre vonatkozó speciális munkaügyi előírásoknak, mint például a minimális/maximális munkahossz, a pihenés nélküli maximális munkaidő és az összes járművezető napi pihenése.
- Járművezető beosztási probléma: Ha egy adott telephelyhez rendelt járművezetők számára egy bizonyos időhorizonton (pl. egy hónap) belül meghatározott általános feladatok halmaza van rendelve, akkor ezeket a feladatokat az elérhető járművezetőkhez rendeli a munkarendjükhöz mérten, a munkaügyi előírások betartása mellett, a járművezetők bérezése szem előtt tartásával.

Az egyes, felvázolt részproblémák megoldása már önmagukban is meglehetősen bonyolult. Ezért a fenti ütemezési és egyéb feladatokra a szokásos megközelítés a szekvenciális módszertanok megvalósítása. Ezek iteratív eljárások, amelyek során mindegyik iterációban egy vagy több részproblémát önállóan, a többi részfeladattól függetlenül oldanak meg, bemenetként figyelembe véve a korábbi részproblémákra kapott aktuális megoldásokat.

A fenti részfeladatok hazai gyakorlati megvalósítása a közösségi közlekedés szolgáltatói oldaláról szintén két részre bontható, követve a szakirodalomban található módszertanokat: járműforduló tervezés és vezénylés. A járműforduló tervezése során a menetrendi járatok és az autóbusszkapacitás között a kapcsolatot a forda teremti meg.

A forgalom lebonyolítására kidolgozott menetrend és fordaterv végrehajtásának előkészítő szakasza a vezénylet, mely a járművek feladatainak és a járművezetők munkabeosztásának meghatározását jelenti.

A vezénylet a menetrend végrehajtásának kezdete; a közlekedési folyamatot kiszolgáló munkaerőnek az autóbuszokhoz való szervezett beosztása.

A vezénylet során a feladat:

- az autóbusz (jármű/munkaeszköz),
- a járművezető (munkaerő),
- és a forda (hozzárendelési feladat)

összekapcsolása.

A folyamathoz tartozó beosztáskészítés költségeinek jelentős hányada a munkaerő költség, így a járművezető beosztása, ütemezése is központi kérdés. A szolgáltató oldaláról számos gondot jelent az, hogy a vezényletrel szemben támasztott követelmények sokszor csak egymás rovására történhetnek. A beosztások készítésekor a feltételek erősen szakma-specifikusak, így a problémák megfogalmazása, a modellek és megoldási módszerek meglehetősen eltérőek. A szempontok között szerepelhet többek között a járművezetők pihenőidejének minimalizálása, vagy hogy a járművezetők munkaideje a korlátok betartása mellett egyenletes legyen.

Gyakorlati szempontból a folyamat további lépése a műszakkiosztás (rostering, crew rostering, staff rostering, driver rostering kifejezések is használatosak erre az angol nyelvű szakirodalomban), amely az operatív tervezés harmadik fázisának tekinthető. Amikor a műszakkiosztásra kerül a sor, addigra az előző feladatok (járműütemezési és járművezető-ütemezési feladatok) már megoldottak.

Tekintettel arra, hogy egy ütemezési rendszer tervezési időszaka tipikusan egy hosszabb időperiódus (több hét, vagy hónap hosszú), amelyre a feladatot meg kell oldani, ezért a tervezési folyamatot a gyakorlatban úgy kell tekinteni, hogy a járműütemezés és a vezetőütemezés feladata a tervezési időszak minden egyes napjára (vagy ha az adott rendszer megengedi, akár több napos periódusra is) ismétlődik. Ezután a műszakkiosztás feladat fázis következik: a megfelelő (jármű- és vezető-) ütemezések alapján az adott tervezési időszakra kell ezt elkészíteni, az általános és a helyi szabályok figyelembevételével. Ebben az esetben a feladat tovább nehezedik azáltal, hogy a korábban meghatározott járatok előre megadott időintervallumokkal, indulási és érkezési helyekkel rendelkeznek, míg a járművek különböző telephelyekhez tartozhatnak, és az is előírás lehet, hogy bizonyos járatok csak bizonyos telephelyhez tartozó járművekkel hajthatók végre.

3.1 A buszközlekedés mérhető paramétereit és hatékonysági mutatóit

A közösségi közlekedési társaságok üzleti tervezéséhez meghatározott irányelvek, tervezési premisszák részeként írja elő a konkrét mutatókon keresztüli hatékonyság javítási elvárásokat a szolgáltatás megrendelője.

A munkaerőpiac hatásai miatt az elmúlt években jelentősen növekvő személyjellegű költségek jelentkeznek a béremelések következtében, így ez a tény egyre számottevőbben befolyásolja a hatékonysági mutatókat. A járművezetői foglalkoztatás hatékonyságára jellemző hatékonysági mutatószámok, amelyeket a munkaügyi, szakszervezet által kiharcolt szabályok, a képzésekre vonatkozó szabályozási környezet változása is erőteljesen befolyásoló tényező.

A dolgozatomból a hatékonyság mérésére az alábbi mutatószámok kerülnek vizsgálatra

- **A járművezetők átlag nettó munkaórája (átlagos szolgálat hossza):** A menetrend tervezés megvalósítása során felsorolásra kerülnek az elkészült járművezető szolgálatok, és az ehhez tartozó főbb jellemzők (szolgálat kezdés, végzés, szolgálat hossza). Ezek alapján kerül meghatározásra az átlagos szolgálathossz. A paraméter akkor tekinthető optimálisnak, ha ez a szám minél közelebb van a 8 órához. Alacsony átlag munkaóra esetén a járművezetők havi munkaórája, betartva a törvényes munkanapok számát, nem fogja elérni a havi alapórát, így bérkiegészítést szükséges alkalmazni, ami többlet ráfordítás a szolgáltatónak. Ugyanakkor a magas átlagmunkaóra, ugyanúgy betartva a törvényes munkanapok számát, a járművezetőknek jelentős túlórákat jelent, ami szintén ráfizetés.
- **A járművezetők nettó munkaórájának a szórása:** Értéke általában 8:20-9:00 közötti. Ha egy menetrendben nagy a szolgálati számok közötti eltérés, akkor a járművezető havi beosztásában különböző szolgálatokat kénytelen teljesíteni, hiszen ahhoz, hogy meglegyen a havi törvényes munkaórája, egy hónapon belül hol hosszabb, hol rövidebb szolgálatokat teljesít. Ez a manuális módszert alkalmazó beosztás készítőnek többletmunkát is generál.
- **Összes szolgálat hossza:** Az egyes szolgálatok hosszának az összege.
- **Összes tartózkodási idő:** Az az idő, amikor a járművezetők semmilyen hasznos tevékenységet nem végeznek, és nem is pihennek. Csak a közvetlen az egyes végállomásra érkezés és indulás között eltelt idő, amikor a járművezető az indulására vár. Ennek minden érkezés és indulás között a minimuma a technológiai és kiegyenlítő idő összege. Ennek az időnek mindenképpen el kell telni érkezés és indulás között. Minél kevesebb ilyen idő van egy elkészült menetrendben, annál ideálisabb, hiszen ennyivel kevesebb a "haszontalan" munkavégzés. Fontos kiemelni, hogy ezek az idők tartalmazzák a technológiai és kiegyenlítő időket.
- **Menetrend elkészítési idő:** A menetrend készítésekor minden esetben szükséges az indítási jegyzék(ek) szerkesztése, majd ebből generálja a ForTe a jármű- és járművezetői beosztási keretet. Ebben az esetben annak a tükrében adjuk meg az elkészítési időt, hogy feltételezzük; a kézi megoldás elsőre helyes és nem szükséges további korrekció. Minél kisebb ennek az ideje, annál hatékonyabb a menetrend készítési folyamat.

Egyéb a hatékonyság mérésére használt mutatók, amelyek a valós folyamatokban relevánsak, de a vizsgálat szempontjából nem veszem figyelembe

- **Rezsi/hasznos km:** A szolgáltatás hasznos teljesítményéhez az ún. rezsizmenetek (pl. a telephelyről/garázsba történő ki- és beállítások) nem tartoznak hozzá, mert ténylegesen nem biztosítanak menetrend szerinti utasszállítási kapacitásokat, tehát ez inkább veszteségként értékelendő és a volumenét csökkenteni igyekszik.
- **Tervezési paraméterek:** egy-egy menetrendre jellemző paraméterek, pl.: végállomási kapacitások, járműdarabszámok, stb.
- **Menetrend üzemóra:** Tartalmazza a jármű összes munkával töltött idejét, beleértve a rezsizmeneteket, a jármű átvételeket, leadásokat, illetve az összes végállomási tartózkodást. Minél kevesebb egy menetrend üzemórája, annál kevesebbe kerül az üzemeltetése. Ez a mérőszám azért is lényeges, mert a buszközlekedés szolgáltatója ez alapján számláz a megrendelések teljesítése után.
- **Járművezetői összes teljesített munkaóra/jármű üzemóra:** Foglalkoztatás hatékonyságára jellemző.
- **Jármű darabszám/átlagos létszám:** Létszámgazdálkodás hatékonyságára jellemző.
- **Járatkapcsolás:** Adott járatrendszer ellátásához szükséges autóbuszok számát úgy állapítjuk meg a gyakorlatban, hogy az érkező és induló járatok időadatait összehasonlítva a járatokat összekapcsoljuk. Akkor van autóbusz beállításra szükség, amikor egy fordulóállomáson induló járatot nem előz meg érkező járat. A tervezés első lépéseként (állomásonként) felírjuk az érkező és induló járatok érkezési és indulási időpontjait. Az eljárás során az induló járatokhoz keresünk azt

megelőző érkező járatot. Minden induló járat esetében megvizsgáljuk, hogy megelőző érkező járához illeszthető-e. Amennyiben nincs megelőző érkezés, akkor autóbust kell beállítani, így meghatározhatjuk a beállítandó buszok számát. Ha egy induló járatot több érkező járat előz meg, akkor a járatkapcsolást a legutolsónak beérkező járáttal kell elvégezni, ez biztosítja az egybefüggő, hosszabb tartózkodási idők keletkezését. Az eljárás befejezése után fennmaradó olyan érkező járatok, amelyeket nem kapcsolunk induló járához, képezik majd a fordák utolsó járatait, vagyis az lesz a forda befejező járata. Az eljárást állomásonként külön-külön kell elvégezni. Az eljárás első lépését képező kiinduló fordarendszert a megrendelő határozza meg, ilyen formában adják át a teljesítendő járatokat. Az üzemeltető feladata ebbe beépíteni a foglalkoztatási szabályokat, de azonban a megrendelésen nincs lehetőség változtatni, ezért az eljárásban használatos járateltolásra nincs lehetőség.

- **Karbantartások:** A gyakorlatban a fordatervek nem tartalmazzák a tankolási és karbantartási folyamatokat. Az autóbuszok megtankolását a telephelyeken végzik, miután a jármű teljesítette az aznapi fordáját, így fordatervezés során figyelni kell, hogy a forda tankolás nélkül teljesíteni tudja a hozzá tartozó járatokat. A karbantartások szintén a saját telephelyen történnek, melyek előre be vannak tervezve, erre a telephelyi diszpécsernek kell figyelnie, hogy a kijelölt karbantartási napon, a járművet ne rendelje egyik fordához sem.

3.2 A menetrend megvalósítás folyamata jelenleg

A BKV közlekedésinformatikai rendszereinek alapját a ForTe rendszer biztosítja. A ForTe rendszer szolgáltatásai a BKK megalapításával két részre kerültek felosztásra a korábban már bemutatottak szerint. A szolgáltatás alapadatai (útvonal, megállóhelyek, utastájékoztatósi adatok, stb.) a BKK részére hozzáférhetőek, míg a közlekedés lebonyolításához szükséges funkciók a BKV részére hozzáférhetőek (eszköz és járművezetői összerendelések, teljesítmények nyilvántartása és elszámolás, stb).

Korábban bemutatásra került az üzemi menetrendkészítés két bejövő paramétere a járatlista (kezdő forda rendszer vagy kiindulási menetrend az indulásokra/érkezésekre) és a járműkiadási táblázat. Mindkettőt a közlekedés megrendelője határozza meg és biztosítja a szolgáltatók részére a vonatkozó határidők figyelembevételével. A fordatervek kidolgozásának módszere a menetrendszerkesztőtől függ. A járatlista kinyomtatását követően kezdetét veszi a tervezési fázis, amely jelenleg a számítógéptől független, papír alapú munka. A szükséges járműmennyiség maximuma a reggeli csúcsidőszakra tehető, amikor nincs pihenetetés, vagyis a mértékadó járműigény kizárólagosan a megrendelőtől kapott járatlisták függvénye, az üzemi menetrendek (és foglalkoztatási szabályok) végletekig történő megfeszítése esetén is pontosan ugyanannyi kocsit kellene forgalomba adni, mint reggelente. A munkaközi szünetek kiadása a reggeli csúcsidőt követően, kb. 8 óra magasságában kezdődik, a viszonylatok követési ideje ekkor ritkul, emiatt kevesebb jármű forgalomban tartására van szükség, a felszabaduló kocsikkal pedig megkezdődik a járművezetői munkaközi szünetek kiadása. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy az indulási időpontok kerülnek átsorolásra egyik forgalmi számtól a másikhoz úgy, hogy a végállomási állásidő megfeleljen az előírtaknak (pl. egybefüggő 30 perc legyen). A pihenetetés miatt többletként forgalomban tartott járművek számának minimalizálása érdekében, és mivel a végállomási tárolóhelyek kapacitása véges, a munkaközi szünetek nem egyszerre, hanem egymáshoz képest eltolva kerülnek kiadásra, tehát a járművek egymást váltva állnak félre letölteni a pihenőidőt. A járatlistától is függ, de hozzávetőleg 4-6 járművenként szükséges egy újabb jármű forgalomban tartása a pihenőidők biztosítása érdekében. Ezt egyébként befolyásolják a munkaügyi szabályok és az érdekképviseléssel kötött megállapodások pl. a Kollektív Szerződés előírásai is: minél hosszabb egybefüggő pihenőt kell kiadni minél szűkebb időszámban, a pihenetetés annál több plusz kocsit igényel.

A 4. ábrán látható egy menetrend a ForTe rendszer képernyőképe alapján.

Csere		Nyugati pályaudvar M V						Árpád hid M V						
		AV <input type="checkbox"/>						AV <input type="checkbox"/>						
Fszám	Be	Érk.	Ind.	Útvonal	P	Ki	Fsz2	Be	Érk.	Ind.	Útvonal	P	Ki	Fsz2
3		08:36	08:54	IC98					09:10	09:14	CZ27			
2		08:48	09:06	IC98					09:23	09:26	CZ27			
1		09:00				MK								
4		09:12	09:18	IC98					09:35	09:38	CZ27			
5		09:24	09:30	IC98					09:47	09:50	CZ27			
3		09:36				MK								
1	MK		09:42	IC98					09:59	10:02	CZ27			
2		09:48	09:54	IC98					10:11	10:14	CZ27			
4		10:00	10:06	IC98					10:23	10:26	CZ27			
5		10:12				MK								
3	MK		10:18	IC98					10:35	10:38	CZ27			
1		10:24	10:30	IC98					10:47	10:50	CZ27			
2		10:36	10:42	IC98					10:59	11:02	CZ27			
4		10:48				MK								
5	MK		10:54	IC98					11:11	11:14	CZ27			
3		11:00	11:06	IC98					11:23	11:26	CZ27			
1		11:12	11:18	IC98					11:35	11:38	CZ27			
2		11:24				TARF								
4	MK		11:30	IC98					11:47	11:50	CZ27			
5		11:36	11:42	IC98					11:59	12:02	CZ27			
2	TARF		11:54	IC98		VALT			12:11	12:14	CZ27			
3		11:48	12:06	IC98					12:23	12:26	CZ27			
1		12:00				FG								
4		12:12	12:18	IC98					12:35	12:38	CZ27			
5		12:24	12:30	IC98					12:47	12:50	CZ27			
2		12:36	12:42	IC98					12:59	13:02	CZ27			
3		12:48	12:54	IC98					13:11	13:14	CZ27			
4		13:00	13:06	IC98					13:23	13:26	CZ27			
5		13:12	13:18	IC98					13:35	13:38	CZ27			
2		13:24	13:30	IC98					13:47	13:50	CZ27			
3		13:36	13:42	IC98					13:59	14:02	CZ27			
4		13:48	13:54	IC98		VALT			14:11	14:14	CZ27			
6	GF		14:06	IC98					14:23	14:26	CZ27			
5		14:00	14:18	IC98					14:35	14:38	CZ27			

4. ábra. A járművek egymást váltva állnak félre munkaközi szünetre – részlet a 26-os busz viszonylat nyári munkanapi menetrendjéből (Forrás: ForTe képernyőkép)

Nagy forgalmú végállomások esetén kiemelt figyelmet kell fordítani a rendelkezésre álló tárolóhelyek megfelelő felosztására, a vonalak egyébként egymástól független menetrendjeinek összehangolására, ellenkező esetben a legsűrűltabb pihenési időszakokban (8-10, 18-20 óra között) a járművek nem fognak elférni, torlódás keletkezik, a járművezetők pedig nem tudják szabályosan letölteni a regenerálódásra és pihenésre szolgáló munkaközi szünetüket. A délelőtti műszakban dolgozók munkaközi szüneteinek kiadását követően a feleslegessé váló járművek félreállításra kerülnek, ezek lesznek az osztott munkaidős, ún. beugró szolgálatok, vagy a hidegváltós szolgálatok (a járművezetők nem közvetlen váltják egymást az autóbuszon, hanem a végző járművezető a járművet leállítja a neki kijelölt helyen, a kezdő járművezető pedig ugyanitt járműátvétellel kezdi meg a szolgálatot). Tárolási helyük kijelölése szintén függ a végállomások tároló kapacitásától. Hiába lenne gazdaságos 20-30 db járművet ott parkoltatni a végállomáson, ha csak 10 db jármű számára biztosított tárolóhely. Az igény és a lehetőségek felmérése után vizsgálat indul, hogy a kettő különbségét jelentő járműszám elhelyezésére hol nyílik lehetőség. Amennyiben van a közelben kevésbé terhelt végállomás vagy tárolótér, a járművek oda kerülnek félreállításra, amennyiben ilyen nincs, a legközelebbi, vagy karbantartási szempontok miatt a honos telephelyre kerülnek beküldésre.

A délutáni csúcsidőre az osztott munkaidős járművek újra forgalomba állnak, ezzel biztosítva a sűrűbb közlekedés járatlista szerinti többlet járműigényét. A járműigény csökkentése érdekében gyakran több viszonylatot is kiszolgál egy-egy többletjármű, folyamatos átszerelésekkel (viszonylatváltás). Ennek a módszernek a teljesítményekre gyakorolt kétségtelenül kedvező hatásai mellett hátrányai is vannak. Tervezési oldalról egymással összefüggő fordarendszerek jönnek létre, melynek eredménye, hogy az egyik vonal menetrendjének változása magával vonja a másikat, harmadikát, stb. is, ezáltal a kiadott

járművezetői beosztások sokkal nagyobb mértékben módosulhatnak hónap közben. A fordarendszer módosítása miatt az akadálymentes kocsival teljesített indulások is változnak, ezért sűrűbben szükséges cserélni az utastájékoztató laptáblákat a vonal összes megállóhelyén, amelynek szintén költségvonzatai vannak. Forgalomirányítási szempontból is nehézség, hogy a különböző forgalmi zavarok könnyedén átgyűrűzhetnek egyik viszonylatról a másikra, megnehezítve a menetirányító diszpécserek munkáját és rontva az utaskiszolgálás színvonalát.

Fentiekből látható, hogy a délutáni csúcsidőben már részben függ a menetrendek szerkezeti kialakításától is a szükséges járművek száma, de az alapvető igényt még itt is a megrendelőtől kapott járatlista határozza meg.

Ha a végállomások nem teszik lehetővé a félreállásos pihentetést, akkor leváltásos módszerrel történik a műszaki pihenő kiadása. Ekkor az autóbuszok folyamatosan forgalomban maradnak, a járművezetők váltják egymást. Ebben az esetben érdemes arra törekedni, hogy az adott járművezető a műszaki pihenő végeztével a saját autóbuszára ülhessen vissza, de ez nem minden esetben oldható meg a rendelkezésre álló erőforrásokból. Előnye, hogy a pihentetéssel nem kell megvárni a csúcsidőszak végét, így a járművezetők számára kedvezőbb elosztású startok alakíthatók ki. Hátránya, hogy forgalmi zavar, késés esetén nehezebb az operatív intézkedések foganatosítása (késés esetén a váltó járművezető és járműve egymáshoz képest elcsúszik), nem alakítható ki saját járműves rendszer, valamint a típusdiverzifikáció miatt forgalombiztonsági kockázatot hordoz az eltérő paraméterű járművek egy szolgáltatón belüli megjelenése, váltakozása. A leváltásos pihenő ezen felül általában magasabb munkaóra és létszám szükséglettel bír.

Új járatlista esetén érdemes először a kezdések és végzések alapján felmérni, hogy várhatóan hány szolgáltatásra, azon belül is hány váltószámra, beugróra, illetve hidegváltóra lesz szükség. Ezzel kialakul egy elképzelés a készítendő menetrend szerkezetéről, amelyet a szolgáltatók alakítása során a menetrendszerkesztő követ. Több telephely esetén rezsimenetek szempontjából szükséges előre meghatározni a kocsik kezdéseinek és végzéseinek helyét (közelebbi végállomás). A délelőtti és délutáni pihentetés során törekedni kell a szolgáltatók kezdési sorrendjében biztosítani a munkaközi szüneteket, hogy a keret szerkesztése közben elkerüljük a munkakörülmények szempontjából kedvezőtlen, hosszú egybefüggő vezetési időket. Váltószámok esetében a szolgáltatóváltást úgy kell tervezni, hogy összességében a délelőtti és a délutáni munkaóra átlaga nagyjából kiegyenlített legyen viszonylaton belül is.

A papíron elkészített vázlat alapján kezdődik meg a menetrend rögzítése a ForTe rendszerben az indítási jegyzékkel. Ha a rögzítés után lefuttatott ellenőrzés nem jelez hibát, eltérést a járatlistához képest, akkor következik a járműbeosztási keret elkészítése. Az összes indítási jegyzékben lévő forgalmi szám legenerálása után kerülnek hozzárendelésre a járműtípusok és az üzemeltető telephelyek. Ezt követően futtatható a kiegészítés, amely során a ForTe rendszer hozzáadja az addig csak fejben számított rezsimeneti időket és útvonalakat a fordákhoz a paraméterlapokon szereplő adatok alapján. Ezt követően újabb ellenőrzés futtatása következik, ezúttal a járműbeosztási kereten a ForTe rendszer előre rögzített algoritmusa és a FUTÁR követelményei alapján. Ezután lépés a járművezetői beosztási keret generálása, amely a járműbeosztási keretek adatait a szolgáltatói számokhoz rendeli. A ForTe rendszer csak mérsékelt támogatást nyújt, például a több járművel dolgozó kétrészes szolgáltatók összefűzése, bizonyos tevékenységek javítása akár több tíz tételen egyesével, kézzel történik. A járművezetői beosztási keret véglegesítését követően ismét a beépített ellenőrzések futtatása szükséges. Ekkor derül ki, hogy a papíron megtervezett menetrendszerkezet valóban minden foglalkoztatási szabálynak megfelel-e. Amennyiben hibára derül fény, a folyamat az indítási jegyzék szerkesztésétől kezdődik előlről, jó esetben csak az érintett forgalmi számra vonatkozóan, rosszabb esetben akár az egész menetrend átalakításával.

Amennyiben a menetrend minden tekintetben hibátlan, megerősített státuszt kap a ForTe rendszerben, és átadásra kerül a megrendelőnek érvényesítésre. Érvényesítést követően a forgalmi és szolgálati számok a hozzájuk rendelt telephelyeken feltöltendőként jelentkeznek, ahová a beosztáskészítők és diszpécserok rögzítik a konkrét rendszámokat és járművezetőket.

3.3 Konkrét gyakorlati menetrend megvalósítási példa

Két valós példán keresztül, egy kisebb bonyolultságú menetrend esetén a 118-as busz viszonylatra, és egy közepesen bonyolult menetrend esetén a 26-os busz viszonylatra bemutatom a menetrend gyakorlati megvalósítását.

Az adott járatrendszer ellátásához szükséges autóbuszok számát úgy állapítjuk meg, hogy az érkező és induló járatok időadatait összehasonlítva a járatokat összekapcsoljuk. Akkor van autóbusz beállításra szükség, amikor egy fordulóállomáson induló járatot nem előz meg érkező járat. Az eljárás során az induló járatokhoz keresünk azt megelőző érkező járatot. Minden induló járat esetében megvizsgáljuk, hogy megelőző érkező járához illeszthető-e. Amennyiben nincs megelőző érkezés, akkor autóbuszt kell beállítani, így meghatározhatjuk a beállítandó buszok számát. Ha egy induló járatot több érkező járat előz meg, akkor a járatkapcsolást a legutolsónak beérkező járáttal kell elvégezni, ez biztosítja az egybefüggő, hosszabb tartózkodási idők keletkezését. Az eljárás befejezése után fennmaradó olyan érkező járatok, amelyeket nem kapcsoltunk induló járához, képezik majd a fordák utolsó járatait, vagyis az lesz a forda befejező járata. Az eljárást állomásonként külön-külön kell elvégezni. A gyakorlatban a forda tervek nem tartalmazzák a tankolási és karbantartási folyamatokat. Az autóbuszok megtankolását a telephelyeken végzik, miután a jármű teljesítette az aznapi fordáját, így fordatervezés során figyelni kell, hogy a forda tankolás nélkül teljesíteni tudja a hozzá tartozó járatokat. Az előre betervezett karbantartások szintén a saját telephelyen történnek, arra a telephelyi diszpécsernek kell figyelnie, hogy a kijelölt karbantartási napon, a járművet ne rendelje egyik fordához sem. Az eljárás első lépését képező kiinduló fordarendszert a megrendelő határozza meg, ilyen formában adják át a teljesítendő járatokat. Az üzemeltető feladata ebbe beépíteni a foglalkoztatási szabályokat, de a megrendelésen nincs lehetőség változtatni, ezért az eljárásban használatos járat eltolására nincs lehetőség.

A 26-os busz viszonylat menetrendje

Az összeállított megoldandó feladat főbb paraméterei:

- járműkiadás egy telephelyről
- váltás engedélyezése egy végállomáson
- hat darab jármű
- menetek száma 177
- forgalomba kezdés/végzés mind a két végállomáson lehetséges
- a műszaki pihenő biztosítására egy végállomáson van lehetőség

A viszonylat jellemzői:

- Végállomások:
 - Göncz Árpád városközpont M
 - Nyugati pályaudvar
- A irány:
 - Nyugati pályaudvar M- Váci út - Nyugati tér - Szent István körút - Jászai Mari tér - Margit híd - Schulek Frigyes sétány - Árpád híd - Róbert Károly körút - Teve utca, forduló - Róbert Károly körút - Göncz Árpád városközpont M
 - Útvonal hossz: 5,4 km

- B irány:
 - Göncz Árpád városközpont M - Róbert Károly körút - Árpád híd - Schulek Frigyes sétány - Margit híd - Germanus Gyula park - Üstökös utca - Árpád fejedelem útja - Bem rakpart - Gyóni Géza tér - Margit híd - Szent István körút - Nyugati tér - Váci út – Nyugati pályaudvar M
 - Útvonal hossz: 6,5 km

A megoldás adatait az 1. táblázat foglalja össze.

Szolgálat	Kezdés	Végzés	Szolgálat hossza
1	4:12	12:32	8:20
2	13:34	21:45	8:11
3	4:32	11:54	7:22
4	11:49	19:52	8:03
5	5:46	14:42	8:56
6	14:37	23:47	9:10
7	5:47	13:54	8:07
8	13:49	22:29	8:40
9	6:01	15:12	9:11
10	15:07	23:45	8:38
11	13:10	21:21	8:11
Átlag (óra, perc)			8:26
Összes szolgálat hossza (óra, perc)			92:49
Tartózkodási idő (óra, perc)			20:05
Jármű üzemóra (óra, perc)			85:49
Elkészítési idő			kb. 3 óra

1. táblázat. A megoldás részletei

A 118-as busz viszonylat menetrendje

Az összeállított megoldandó feladat főbb paraméterei:

- járműkiadás egy telephelyről
- váltás engedélyezése egy végállomáson
- három darab jármű
- menetek száma 99
- forgalomba kezdés/végzés mind a két végállomáson lehetséges
- a műszaki pihenő biztosítására egy végállomáson van lehetőség

A viszonylat jellemzői:

- Végállomások:
 - Óbuda, Szentlélek tér
 - Óbudai autóbuszgarázs
- A irány:
 - Szentlélek tér - Tavasz utca - Flórián tér - Szentendrei út - Bogdáni út - Huszti út - Bojtár utca - Kunigunda útja - Dinamó utca, forduló - Kunigunda útja - Bojtár utca - Bécsi út - Pomázi út – Óbudai autóbuszgarázs
 - Útvonal hossz: 6,1 km
- B irány:
 - Óbudai autóbuszgarázs - Pomázi út - Törökkő utca - Csillaghegyi út - Bojtár utca - Huszti út - Bogdáni út - Szentendrei út - Flórián téri felüljáró - Serfőző utca - Árpád fejedelem útja - Szentlélek tér
 - Útvonal hossz: 5,1 km

A megoldás adatait a 2. táblázat foglalja össze.

Szolgálat	Kezdés	Végzés	Szolgálat hossza
1	3:42	12:48	9:06
2	12:43	21:23	8:40
3	4:42	14:00	9:18
4	13:55	23:18	9:23
5	5:13	18:30	9:13
Átlag (óra, perc)			9:08
Összes szolgálat hossza (óra, perc)			45:40
Tartózkodási idő (óra, perc)			10:56
Jármű üzemóra (óra, perc)			42:20
Elkészítési idő			kb. 1 óra

2. táblázat. A megoldás részletei

3.4 Konklúzió

A 26-os busz viszonylat esetén:

Ez a feladat hagyományos kézi módszerrel körülbelül 3 óra alatt oldható meg. Ebben az esetben a 11 járművezető teljes várakozási ideje - amikor a járművezetők semmilyen hasznos tevékenységet nem végeznek, és nem is pihennek - 20 óra 5 perc; tehát minden járművezetőnek átlagosan 1 óra 49 perce van nem kívánt várakozási idővel.

A 118-as busz viszonylat esetén:

Ez a feladat hagyományos kézi módszerrel körülbelül 1 óra alatt oldható meg. Ebben az esetben az 5 járművezető teljes várakozási ideje - amikor a járművezetők semmilyen hasznos tevékenységet nem végeznek, és nem is pihennek - 10 óra 56 perc; tehát minden járművezetőnek átlagosan 2 óra 11 perce van nem kívánt várakozási idővel.

A közösségi közlekedésben a járművek és a járművezetők ütemezésével kapcsolatos feladatokat az elvárt határidőn belül kell megfelelően megtervezni. Az automatizáció és algoritmusos módszerek alkalmazása fontos lenne, mert a sebesség mellett a költségek és más tényezők is kiemelt fontossággal bírnak. Elméletileg a lehető legjobb megoldást keressük a járművek és a járművezetők ütemezésével kapcsolatos feladatok megoldása során és az idő paramétert, mint költséget minimalizáljuk, ugyanakkor számtalan egyéb költség és korlátozási tényező befolyásolja még a megoldást. A kézzel készült és jelenleg alkalmazott menetrendek a legtöbb esetben akár közel optimálisnak is tekinthetők, hiszen egy gyakorlott menetrendszerkesztő szakmai tudásának és logikai képességeinek köszönhetően igen jó megoldást tud viszonylag rövid időn belül adni. Ennek a gyakorlatnak természetes korlátja a feladat mérete és bonyolultsága, valamint a feladatmegoldásra fordított idő (továbbá az a tény, hogy a megoldások egy-egy esetben a megfogalmazott korlátozási feltételeket akár át is hághatják). A ráfordított idő tekintetében természetesen szignifikáns különbségek lehetnek, továbbá a válaszütemkritikus tervezési feladatok esetén a nem algoritmikus tervezés szinte szóba sem jöhet. Nyilvánvaló, hogy algoritmikus módszerek alkalmazásával a működési környezet változása, vagy az időközben felmerülő módosítási igények (pl. Kollektív Szerződés módosítás kezdeményezése) megjelenése esetén azok hatása jobban modellezhető, illetve kivitelezhető. Az egyszerre nagyszámú menetrendmódosításkor (pl. időszakos menetrendek, temetői forgalom, év vége, ünnepnapok stb.), nagyobb pótlási feladatok (metrópótlás ütemváltása), rendkívüli helyzetek (járványhoz kapcsolódó menetrendek) esetén is szintén csupán az algoritmikus tervezés lehet a járható út.

A vizsgálatot a közösségi közlekedéshez használt informatikai szakrendszerekből származó adatokból, a működési környezet tanulmányozásával, adatbányászati eszközök felhasználásával terjesztettem ki.

4 A vizsgálat Big data alapú megközelítése

A közelmúltig a feladatok megvalósítása számítási nehézségekbe ütközött, mára viszont a technológia fejlődése, az alkalmazott modellek és az azokat megoldó algoritmusok lehetővé teszik a nagyobb méretű, a valóságban ténylegesen előforduló feladatok tárgyalását és megoldását. Ezért ahhoz, hogy további költségcsökkentést érhesünk el a működési költségek terén, hatékony informatikai rendszereket kell alkalmaznunk.

A fentiek miatt az elmúlt évtizedekben a döntéstámogatási rendszerek fejlődésének az egyik fontos iránya volt az olyan programcsomagok előállítás, amelyek logisztikai rendszertervezési, valamint magasabb absztrakciós szinten komplettnek nevezhető optimalizálási feladatok megoldását tekintik fő feladatuknak. A gyakorlat azonban azt mutatja, hogy a közlekedési vállalatok fontosnak tartanak számos vállalat-specifikus elvárást és korlátozó feltételt, amelyeket az általános rendszerek nem képesek egységesen kezelni.

A közösségi közlekedési társaságoknál az üzemi menetrendek szerkesztése, a járművek és járművezetők ütemezése informatikai szakrendszer támogatásával történik. Az elérhető rendszerek korlátozott képességei miatt indokolt, hogy az üzemi menetrendkészítés specializáltan is támogatást kapjon, például optimalizálási célrendszerek, illetve komponensek kialakítása által. A kidolgozott módszerek a hazai gyakorlatban a menetrendszerkesztők saját tapasztalatától, intuíciójától függenek. Az informatikai szakrendszerek az elkészült menetrendek rögzítését, valamint azok foglalkoztatási és egyéb szabályok szerinti ellenőrzését támogatják, illetve a további üzemi folyamatok elvégezhetőségét, ellenőrzését biztosítják.

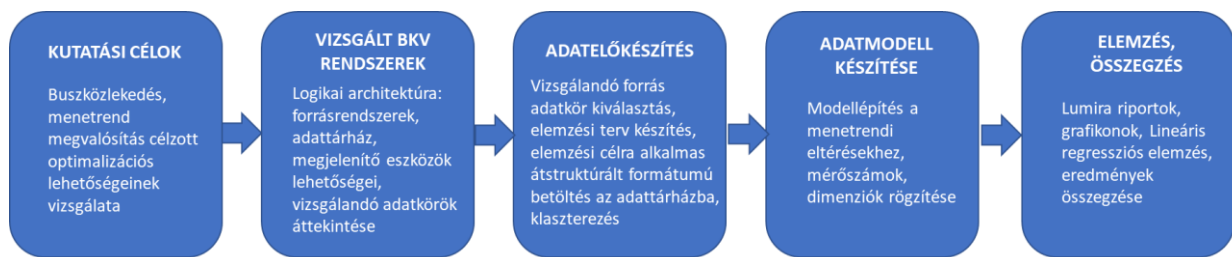
Az üzemi menetrendkészítés automatizálása azonban – a korábban már említettek szerint – különösen kívánatos rendkívüli helyzetekben (például járványhoz kapcsolódó menetrendek készítése esetén), vagy egyidejűleg nagyszámú menetrend-módosításkor. A feladatok párhuzamos elvégzése, vagy holtidőben, akár az éjszaka során történő feladatmegoldás reakció- és munkaidőt takaríthatna meg a menetrendkészítéssel foglalkozó munkatársaknál. Mindezek mellett a működési környezet változása, vagy különböző módosítási igények megjelenése esetén azok hatása jobban modellezhető lenne.

A havária események kezelése ezen a területen kiemelt fontosságú, a működési környezetben hirtelen bekövetkezett nagyméretű változás a következmények súlyossága miatt azonnali beavatkozást igényel. Ez természetesen támogató (akár számítógépes) rendszerekkel oldható meg a leginkább, azaz a problémára mindenképpen algoritmikus megoldást kell adni.

A kutatásom kezdeti szakaszában a rendelkezésre álló adatvagyonból olyan rejtett és komplex összefüggések, függőségek kinyerését tűztem ki célul, melyek felderítése a hagyományos módszerekkel (irodai alkalmazások, adatbázis-kezelő rendszerek stb. segítségével) szinte lehetetlen. A BKV-nál előálló óriási adatmennyiség strukturált feldolgozása, elemzése és az ebből való következtetések levonása különböző statisztikai vizsgálatokkal, adat-vizualizációval nem csak válaszokat, hanem előrejelzéseket is nyújthat, ezzel egészen újfajta eszközkészletet adhat a közlekedésszervezők, üzemeltetők kezébe. Adatbányászati módszerek segítségével az adathalmazokból kinyert információ a gyakorlati életben és a különböző kutatási területeken is jól hasznosítható. Ilyen alkalmazási terület a közösségi buszközlekedés, ahol földrajzi helyhez kötött információk is feldolgozásra kerülnek. Az adatok elemzésének módszerei a leíró statisztika, klaszteranalízis, a regresszió-elemzés és a gráfelemzés témakörébe tartoznak. A kapott eredmények grafikus módon is megjeleníthetők.

Meg kell azonban jegyezni, hogy az üzemi menetrend megvalósítás támogatására alkalmazandó elemzések elvégezhetőek lennének kisebb rendszereken is. Az optimalizálási célrendszerek kialakításához alapvetően nem lenne szükség Big data vizsgálatokra. Azonban a jelen fejezet igazolja, hogy a forrásrendszerekből származó adatvagyon mérete lehetetlenné teszi. Ez képezi az alapját a Big data jellegű megközelítésnek.

A 6. ábrán a kutatásom során alkalmazott adatelemzési eljárás lépéseit mutatom be.



6. ábra. Adatelemzési eljárás lépései
(Forrás: saját szerkesztés)

Az adatelemzési lépések:

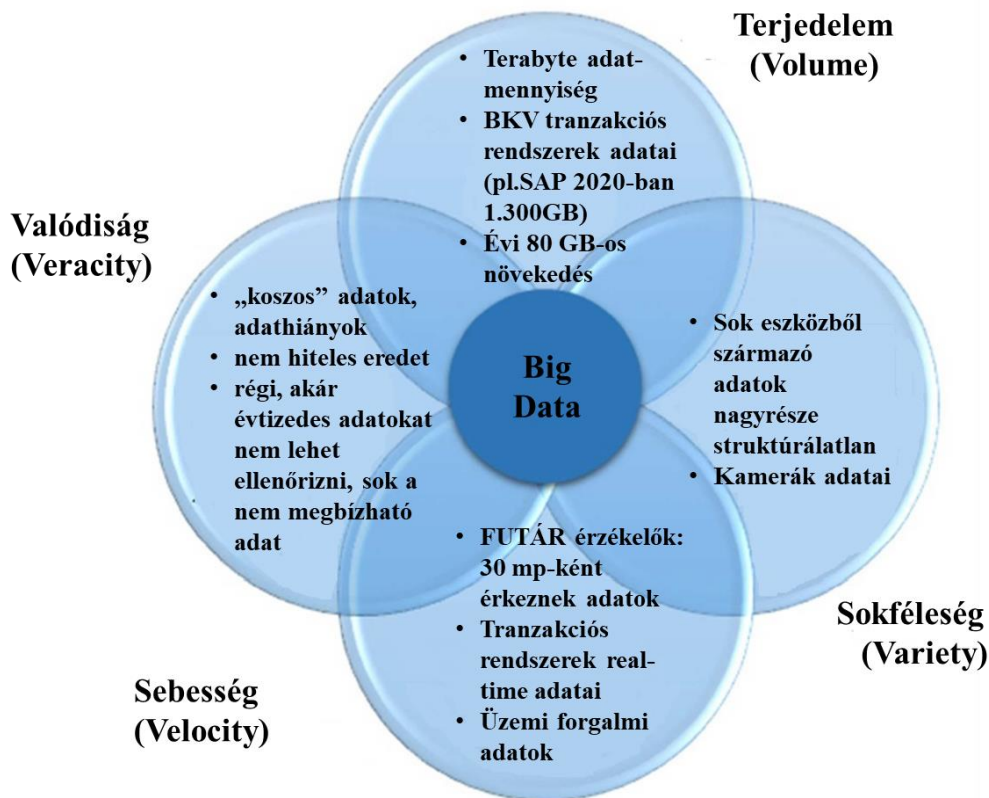
1. Kutatási célok kitűzése: A közösségi közlekedési szolgáltatás magas színvonalon, az utasok elégedettsége mellett valósuljon meg, ugyanakkor fontos cél a gazdaságossági szempont, az optimális költségek melletti működés elérése, így a menetrend megvalósítás optimalizációs lehetőségeit tűztem ki elemzési célul.
2. Vizsgált BKV rendszerek: A 4.1. fejezetben azonosítottam a vizsgálatba bevont forrás rendszereket, betöltendő adatokat, szükséges eszköztárat, és megvizsgáltam a kapcsolódásaikat. A 4.2. fejezet foglalkozik a forrás rendszerekkel, a logikai architektúrával, és a rendszerelemek leírásával, a 4.4. fejezet pedig a BKV-nál rendelkezésre álló a vizsgált adatok méretével, komplexitásával és használhatóságával.
3. Adatelőkészítés: Az elemzés menetét a 4.5. fejezet mutatja be. A 4.6 fejezetben elkészítettem az elemzési tervet, kiválasztottam a vizsgálatához szükséges adatköröket, beazonosítottam a hiányzó betöltendő adatokat, vagyis elkészítettem a fizikai mappinget, majd az elemzéshez alkalmas formátumban betöltöttem az adattárházba.
4. Adatmodell készítés: A 4.6 és a 4.7 fejezetben kerülnek ismertetésre az elkészült adatmodellek.
5. Elemzés, összegzés: az elemzési terv lépései alapján elvégeztem az elemzéseket, kiértékeltem a kapott eredményeket, amelyeket BI lekérdező eszköz segítségével grafikus módon megjelenítettem, és összegeztem a levont következtetéseket.

Megállapítottam, hogy a rendelkezésre álló adatvagyon messze kielégíti a Big data ún. 4V kritériumát mind az adatmennyiség (terjedelem), a valódiság, illetve az adat beáramlás sebessége, valamint a források és adattípusok sokszínűsége tekintetében (7. ábra).

Ezért indokolt alkalmazni a mai modern vizsgálati módszereket úgy a Big data, mint az üzleti intelligencia vagy a komplex statisztika területéről.

A [76] részletesen tárgyalja az adatbányászat alapvető matematikai és informatikai eszközeit, az adatbányászatban használatos modelleket, illetve algoritmusokat, azok működésének megértését, és az implementációs kérdéseket. A [77] kilenc fejezeten keresztül összefoglalja az adatbányászat előrehaladását az adott területeken, kezdve a véleményekből származó bányászati adatoktól, térbeli és időbeli adatbázisoktól, diszkriminatív részgráfintáktól, útvonalismeretek felfedezésétől, közösségi médiától és adatvédelmi problémáktól a bináris mátrixfaktorizáción keresztül történő számításcsökkentésig. A [78] innovációs szempontból vonja le a következtetéseket a döntéshozatal hatékonyabb támogatására. A [79] az adatok gyűjtéséről, feldolgozásáról, hasznosításáról ad részletes

áttekintést. A [80] a Big data három fő részét foglalja magában: fogalmak, elméletek és alkalmazások. A kutatás az ábrázolástól, modellezéstől és topológiától a disztribúcióig és a dimenziócsökkentésig terjed. Megvizsgál olyan területeket, mint például a statisztika, az adatbányászat, a gépi tanulás, a hálózatépítés, az algoritmusok, a biztonság és a differenciálgeometria. A [81] a Big data összevont leírását mutatja be, integrálva az akadémiai és gyakorlati definíciókat. A tanulmány középpontjában a strukturálatlan adatokkal kapcsolatos elemzések vannak. [81] kiemeli továbbá, hogy megfelelő és hatékony elemzési módszereket kell kifejleszteni a hatalmas mennyiségű heterogén adat kihasználásához. Azt is megerősíti, hogy új eszközöket kell kidolgozni a strukturált adatok prediktív elemzésére.



7. ábra. A BKV adatai megfelelnek a Big datajellemzőinek
(Forrás: saját szerkesztés)

Mivel a keletkező és feldolgozandó adatmennyiség minden bizonnyal növekedni fog, a feladatok automatizált megoldása és az alkalmazott algoritmusok hatékonysága iránti kíváncsiság is evidensnek tekinthető. A párhuzamos feldolgozás javíthatja a rendszerek teljesítményét. Arra is fel kell készülni, hogy az eredményekhez egyszerre többen, több helyről, többféle eszközön akarnak majd hozzáférni. Az idő szintén fontos befolyásoló tényező, nem mindegy, hogy az adatok keletkezése és a beavatkozás között mennyi idő telik el.

4.1 A vizsgált BKV rendszerek

A dolgozatomban a mindennapi munkám során felmerült kérdések megválaszolását tűztem ki célul, ezért az adatok és információk begyűjtését is ott kezdtem.

A kutatás megkezdéséhez szükséges volt a rendelkezésre álló adatvagyon méretének, komplexitásának feltérképezése. A modellt a BKV valós infrastruktúrájára alkottam meg.

A BKV informatikai rendszerének alapja az SAP vállalatirányítási programcsomag és a ForTe közlekedésinformatikai alkalmazás, ezen keresztül a FUTÁR rendszer, amelyek egyaránt kiterjedt módon gyűjtik a társaság gazdasági és műszaki adatait. Elemzésem egységei alapvetően a BKV statisztikái, melyek kellően nagy mennyiségű és megfelelő hierarchiájú adatokat tartalmaznak a vizsgálatokhoz.

A vizsgálatot megelőzően a szükséges adatokat tartalmazó rendszerek szigetszerűen működtek. Nem álltak rendelkezésre átfogó, az összefüggéseket feltáró lekérdezések. Nehézkes munkával lehetett csak az összetettebb jelentéseket elkészíteni, amelyek csak a kiválasztott, célzott problémára tudtak választ adni. Amennyiben további nézetek szerinti elemzésre volt szükség, újabb riportokat kellett készíteni. Nem lehetett átfogóan elemezni a történeti adatokat sem egyrészt a nagy adat-volumenek kezelhetlensége miatt (pl. a FUTÁR rendszerben tárolt összes megállóhelyi indulási tény adathalmaz több 10 milliós nagyságrendje miatt), másrészt annak köszönhetően, hogy a tranzakciós rendszerekben azok nem is álltak rendelkezésre, mivel a tárolóhelyen a szokásos lekérdezési igényeket kiszolgáló aktuális adatok elérhetősége volt a cél, a régebbi adatokat csak archivált tárolókban lehetett elérni.

A kutatást támogató kérdések elemzéséhez megterveztem az informatikai rendszer olyan beállítását, amely képes összekapcsolni az üzleti rendszereket és azokból valós időben naprakész adatokat szolgáltatni.

Az új struktúrának köszönhetően a különböző rendszerekből érkező adatok a HANA adattárházban összekapcsolhatókká és riportálhatókká váltak, mint pl. a részletes forgalmi, menetrendi tény és terv adatok, melyek a korábbiakban csak külön rendszerekben voltak megtalálhatók. Mivel az üzleti adatok a forrás rendszerekben formátum tekintetében lényegesen eltérhetnek egymástól, az adattárházba áttöltéskor szükség van egy egységes kezelési mód kidolgozására, majd az immár heterogén adatok összedolgozására. Az adattárház rendszerek előnye a nagyobb adatmennyiségek tárolási és feldolgozási képességén túl az, hogy megőrzi az adatok történetiségét, ezzel a múltbeli adatok elemzése alapján a jövőben várható folyamatok megtervezését segíthetik.

Az adatok elemzését lehetővé tevő új technikájú BI lekérdező eszköz (SAP Lumira) segítségével a jelentéseket szemléletesen, könnyen kezelhető, grafikus, több dimenzió mentén lenyitható formában lehet megjeleníteni.

4.2 A vizsgálatba bevont forrás rendszerek, eszközök és kapcsolódásaik

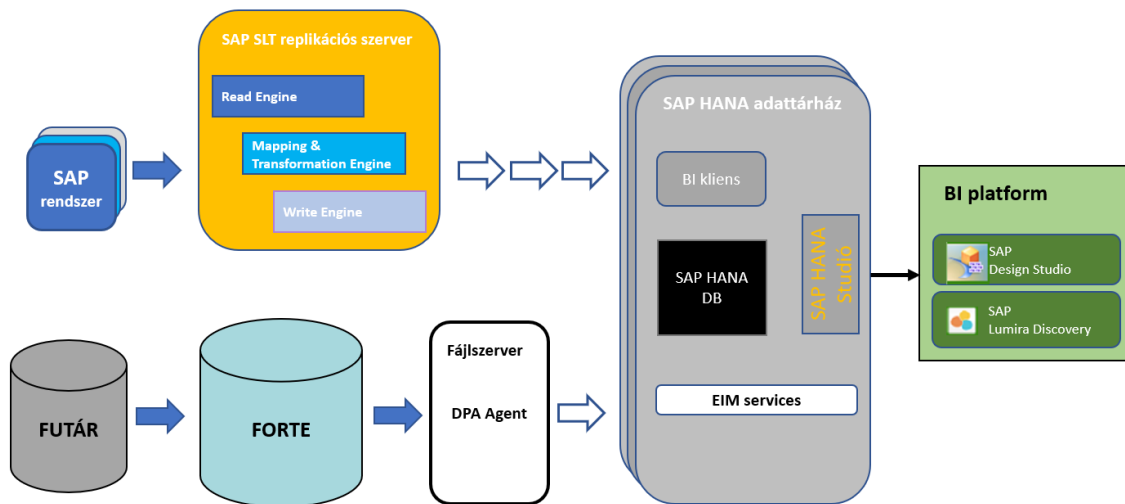
- **FUTÁR rendszer:**
 - A FUTÁR (Forgalomirányítási és UtasTájékoztatási Rendszer) biztosítja, hogy a fővárosi közösségi közlekedési hálózat utasai a lehető legtöbb információhoz juthassanak, ezáltal a leggyorsabban érijék el úticéljukat. A műholdas járműkövetésen alapuló rendszer a BKK számára lehetővé teszi a budapesti forgalom valós idejű, folyamatos, 24 órás felügyeletét, a menetrend szerinti közlekedés fenntartását, rendkívüli helyzetben pedig a gyors és hatékony közbeavatkozást.
 - A FUTÁR forrásrendszerből napi egyszer, éjszaka kerülnek csv fájl formátumban az adatok a ForTe rendszerbe, majd onnan az adattárházba.
 - E forrásrendszerből vizsgálati példám elemzéseiben megállóhelyi részletezettségben használok a menetrendi tény- és pontosság adatokat.

- ForTe rendszer:
 - A BKV közlekedésinformatikai rendszereinek alapját a ForTe rendszer biztosítja. A ForTe a T-Systems Magyarország (és annak jogelődje) által fejlesztett rendszer, mely a BKV igényei szerint került kialakításra. A közlekedési, forgalmi folyamatok tervezését és annak lebonyolítását segítő rendszer a 1990-es évek közepén került kialakításra, így magával hordozza a kor technikai „korlátait” is.
 - A ForTE rendszer szolgáltatásai két részre vannak osztva. A BKK 2012-es indulása óta a megrendelői feladatok és funkciók (a szolgáltatás alapadatai: útvonal, megállóhelyek, utastájékoztató adatok, stb.) a BKK részére hozzáférhetőek, míg a közlekedés lebonyolításához szükséges funkciók a BKV részére hozzáférhetőek (az eszköz és járművezetői összerendelések, a forgalmi teljesítmények nyilvántartása, járművezetői teljesítmény elszámolása, stb).
 - A forrásrendszerből napi egyszer, éjszaka kerülnek csv fájl formátumban az adatok az adattárházba.
 - E forrásrendszerből a vizsgálati példaim elemzéseiben a menetteljesítmény- és tervadatok, valamint a zavarnaplók adatait használom.
- SAP ECC rendszer:
 - A BKV ügyviteli programcsomagja az SAP 1998-ban került bevezetésre. A következő modulok vannak használatban: CO, FI, AM, SD, MM, PM, valamint a HR, amely egy külön adatbázisban futó SAP alkalmazásként lett implementálva. Alapvető probléma, hogy az SAP modulok adatai a rendszeren belül különállóak, standard lekérdezésekkel nem összekapcsolhatók. Ezt a problémát oldja meg az adattárház. Az SAP forrásrendszerből a vezetői jelentésekhez szükséges adatok valós idejű módon, egy külön eszköz segítségével kerülnek áttöltésre az adattárházba.

Az adattárház és kiegészítő eszközei

Az adattárház rendszer működtetéséhez, az információfeldolgozás automatizálásához és adminisztrációjához sok komponensre van szükség, melyek a teljes folyamat egy-egy kisebb-nagyobb részhalmozására nyújtanak megoldást (8. ábra). Kézenfekvő tehát ezeket komponenseket a megoldott részfeladatok alapján csoportokba sorolni:

- HANA adattárház: HANA adatbázison megvalósított natív adattárház. Az adattárház az alaprendszerekből átvett adatokat és az azokból több lépésben előállított, átstrukturált, aggregált, ad-hoc riportolásra előkészített adatokat tartalmazza.
- Data Provisioning Agent (DPA): a DPA eszköz végzi a ForTe és a FUTÁR rendszerekből automatizáltan érkező csv fájlok virtuális táblákká konvertálását, majd a kiolvasott adatok betöltését a HANA adatbázisba.
- Enterprise Information Management (EIM): HANA oldali eszköz, amely az adatbetöltések lépéseinek, folyamatának vezérlését végzi az adattárház oldalán.
- SAP Landscape Transformation (SLT): az eszköz segítségével közvetlenül az ERP rendszer adatbázisából történik az adatok kiolvasása, és ezek valós idejű ütemezett áttöltése a HANA adatbázisba.
- Lumira 2.3 – front-end lekérdező BI eszköz: Részei: BI platform, Lumira Design Studio és SAP Lumira Discovery.



8. ábra. BKV adattárház rendszer logikai architektúrája
(Forrás: BKV)

Szerver oldali architektúra

HANA adattárház: 2 db fizikai HANA szerver, Dell PowerEdge R940 Intel Xeon Platinum 8176 2.1G, 28C 6x1.8TB SAS, 6x1.6TB SSD 1536GB RAM

HANA DB verzió: HANA 2.0 SP03 rev 33
Felhasznált memória: 174 GB, peak: 478 GB

DPA szerver: 3 virtuális szerver, SUSE Linux Enterprise11, SP4 64 bit operációs rendszerrel.

Business Objects (BO): 3 db FlexFrame virtuális szerver

Fejlesztői BO: virtuális 1 socket, 4 core, 32GB RAM, 270GB HDD
Teszt BO: virtuális 1 socket, 4 core, 32GB RAM, 270GB HDD
Éles BO: virtuális 1 socket, 8 core, 64GB RAM, 270GB HDD

Telepített szoftverek:

- SBOP Enterprise 4.2 SP5 Patch 500
- Lumira Server 2.3 Patch 0

Kliens oldali architektúra

Kliens: Windows 10, 64 bit

Kliens alkalmazások:

- P-Graph Studio Version 5.2.4.2.
- Excel 2016
- SAP Hana studio 2.3.50.
- SAP Lumira Designer 23.0
- SAP BusinessObject Dashboard 4.2 sp3

Az adattárház létrehozása során fontos szempont volt az adatok konzisztenciájának vizsgálata, hiszen az átadott adatok különféle forrásból származnak. Szükséges volt annak vizsgálata, hogy a forrásadatok tartalmazzanak-e hibákat, hogy az elemzésnél ezeket milyen módon kell és lehet szűrni. Ilyen hibák lehetnek például: oda nem illő, hiányzó adatok, hibás hivatkozások és kódolások, illetve adattípus hibák.

4.3 Az adattárház kialakítása a BKV rendszerében

A kialakítás során vizsgálatom kiterjedt a BKV forgalmi alaprendszerének egyedi tevékenység szintű adataira, valamint a havi beszámolási célokat szolgáló forgalmi összesítő adataira vonatkozó elemzési adatstruktúra kialakítási módjára is.

Adatok az adattárházban

Az adatokat egy adattárházban kell gyűjteni, ez az alapfeltétele annak, hogy a nagy adathalmazok teljesen automatizált gyors adatfeldolgozását meg tudjuk valósítani. Az SAP HANA adatbáziskezelője lehetőséget teremt a szerteágazó forrásokból származó adatok valós idejű elemzésére. Felhasználói egy olyan memórialapú üzleti platformhoz jutnak, amely bármilyen típusú tranzakciót vagy adatot egyszerre képes feldolgozni a multi-modell adatkezelő motorjának köszönhetően. A HANA adatforrás-független adatbáziskezelő, amely segít csökkenteni az analitika és az operációs tevékenységek költségeit. Működése arra az alapelvre épül, hogy az adatok nem a merevlemezre kerülnek; hanem a számítógép rendszeremóriájába. Ekképpen az adatok kiértékelése akár 150-3500-szor gyorsabb lehet a hagyományos tárolási mód mellett megvalósított adatfeldolgozáshoz képest. Az in-memory számítástechnika feldolgozási képességei teljesen új üzleti modellt tesznek lehetővé, Big data kezelési képessége nemcsak abban segít, hogy a hatalmas mennyiségű adatot tudássá alakítsunk át, hanem strukturálatlan adatokat is kombinál a meglévőkkel, és azokat új kontextusokban használja fel. A HANA technológia képes megbirkózni a Big data azon követelményével, hogy nagyon sok adatot kell valós időben feldolgoznia, csak így van lehetőség az összetett elemzések esetén jelentkező sok egyidejű feladat kiértékelésre és a rövid válaszidőkre.

Az adattárház bevezetési munkálatait a SAP Hungary Kft. segítette, a munkatársai végezték el az infrastruktúra kialakítását, a telepítési bázis munkákat. Támogatták a BKV-t az új eszközökkel történő adatbetöltési folyamatok megvalósításában, a jogosultsági modell kialakításában, valamint az adattárház napi töltő folyamatainak beállításában.

A bevezetés során az én feladatomból volt az elemzéshez szükséges ForTe-FUTÁR, illetve SAP rendszerben található adatkörök kiválasztása és az adatmodellek elkészítése. Az ún. „mapping” készítés során az adott forrásrendszert ismerő szakértők biztosították a szükséges háttérinformációt. A vizsgált elemzéseimhez a megfelelő adatkörök (forrástáblák) az adattárház rendszerbe betöltésre kerültek.

Adatmodell építés

Elemzéseimhez a következő lépés a megfelelő részletettségű adatmodell elkészítése volt.

Az adatmodell tervezése során meghatároztam azokat az adatköröket, amelyek felhasználásával logikusan építhető fel az adatmodell az elemzési célok elérése érdekében. Így a modellek finomítása, (tanítása) iteratív módon történhetett, majd a végső modell kiválasztása után a modellt futtattam a nagy mennyiségű historikus adathalmazokon. A modellben az adatok összekapcsolását az elemzési céloknak alárendelten készítettem.

Megjelenítés

A megjelenítésre többféle lehetőség kínálkozik a HANA rendszer eszközeivel. Elemzéseimhez front-end eszközként a HANA adattárház önműködő, felhasználóbarát kezelőfelülettel rendelkező riportoló eszközt, a Lumirát használtam. Az eszközzel a többféle szempont szerinti lekérdezések egy grafikus felületen könnyen elkészíthetők. A front-end eszköz irányítópultjáról pedig – a megfelelő jogosultsági szintek mellett - az összes riport egy felületen elérhető.

Az adatvagyon elemzésének lehetőségei

A vizsgálati folyamatot megterveztem. Ennek lépéseit a 4.5 fejezet tartalmazza.

Az adathalmazok közötti összefüggések feltárásához a meglévő elemző eszközökhöz új, korszerű, mélyebb adatfeltárást lehetővé tevő eszközöket kerestem. Kiválasztottam az adott kategóriában a piacvezető termékeket, és az alábbi főbb szempontok szerint vizsgáltam azokat:

- BI elemző eszközkészletek: adat megjelenítő és elemző eszközkészletek, amelyek segítségével drag & drop módon, programozási tudás nélkül lehet előállítani és szerkeszteni a különféle jelentéseket mind windows-os felületen, mind táblagépeken.
 - Vizsgált termékek: Lumira, Tableau, Qlick, Microsoft Power BI, SAS Visual Analysis (Viya).
- Prediktív, adatbányász eszközök: olyan eszközkészletek amelyek magukba foglalják a magasabb szintű elemzési funkcionalitást; mint pl. döntési fa felállítási lehetőség, scenario elemzések, hatásvizsgálatok, clusterezés, text elemzés, forecasting funkciók lehetősége.
 - Vizsgált termékek: SAS Advanced Analytics, SAP BO Predictive analytics, SPSS.

A prediktív adatbányászati eszközök egyik legnagyobb előnye, hogy jóval gyorsabb elemzési ciklus érhető el alkalmazásukkal, mivel jól használható kész eszközöket kínálnak az elemzési lépések mindegyikére.

A HANA adattárházhoz kapcsolódó BI-, és prediktív adatbányász eszközök jellemzői:

- előrejelzések készítése,
- kulcs befolyásoló tényezők kimutatása,
- trendek elemzése – múltbeli esetek kapcsán,
- kapcsolatok, hatások feltárása,
- Lumirához integrált, azaz nem kell köztes front-end eszközt használni,
- támogatja az R nyelv használatát, és real-time adatfeldolgozást és elemzést tesz lehetővé, kapcsolható R nyílt kóddal létrehozott adatmodellekhez is,
- biztosítja a pontos, prediktív modellek gyors felépíthetőségét, több modell logika mentén: klasszifikáció, regresszió, klaszterezés, idősoros előrejelzések, asszociációs szabályok,
- kész automatizált technikák & függvények állnak rendelkezésre az adatok előkészítéséhez, modellezéshez: feltárhatók az együttmozgások, hatások, kockázati együttthatások, mozgatórugók azonosítása,
- grafikus folyamatláncok készítése,

- a HANA előre kidolgozott prediktív könyvtár logikáinak beépítése, futtatása (statisztikai, és folyamat logikák),
- beépített önkiszolgáló vizualizációs technikák, pl. szórásdiagram, mátrix grafikonok, párhuzamos koordináták, klaszter grafikonok, döntési fák,
- memória alapú adatbányászat, nyílt forráskódú analitika R alapon,
- integráció 6000+ elemzési függvény használatával.

A BI elemző eszközkészlettel kinyerhető jelentések

A BKV szakrendszereiből érkező adatok minden éjjel betöltésre kerülnek a HANA adattárházba, így azokat napi frissítéssel el lehet érni.

A HANA adattárházba az alábbi forgalmi- és munkaidőbeli tevékenységek alapadataiból készült Lumira jelentéseket vizsgáltam:

- megállóhelyi terv- és tényadatok,
- menetek, egyéb forgalmi tevékenységek adatai,
- zavarnapló adatok,
- vonal törzs,
- járművezető törzs,
- járműtípus törzs,
- ágazat törzs,
- telephely törzs,
- útvonal törzs,
- zavarkódok,
- járművezetők munkaideje, kezdés-végzés.

4.4 A vizsgált adatok a BKV rendszerében

Adatmennyiség

A ForTe és FUTÁR rendszerek kb. 500 db adattáblája közül a HANA adattárház rendszerbe 40 db-ot töltenek át napi rendszerességgel. Ezekből az alábbiakat használtam a menetrendi eltérések elemzéséhez:

F_FMTEV tábla – forgalmi munkalapok manuálisan rögzített tételei: 230 millió rekord, 40 GB adat,
 MEN tábla – FUTÁR rendszer által generált menet rekordok: 90 millió rekord,
 MEN_MH tábla – FUTÁR rendszer által generált megállóhelyi indulás rekordok: havi 30 millió rekord,
 MEN_ZAV tábla – menet és zavarnapló összekapcsolás tábla: 17 millió rekord,
 Törzstáblák: ~ 100.000 rekord.

Vizsgált időszak: 2373 nap (~ 6,5 év napi adatai 2014.01.01-től 2020.06.30-ig)

Jármű: 2.706

Járművezető: 10.661

Járművezető beosztás: 5.457.866

Forgalmi menet: 89.628.052

4.5 Az elemzés menete

A BKV közösségi közlekedés működtetésének célja, hogy a szolgáltatás magas színvonalon, az utasok elégedettsége mellett valósuljon meg, ugyanakkor fontos cél a gazdaságossági szempont az optimális költségek melletti működés elérése. Az adatmodell felhasználásával több elemzést is végeztem, hogy a vizsgált adatokból megkapjam azokat a kritikus pontokat, amelyeken tervezetten beavatkozva mérhető módon javítani lehetne a társaság működési hatékonyságán, vagy a gazdaságosságán. Ha a kapott elemzési eredmény túl általános érvényű volt, akkor a BI eszköz adta lehetőségeket kihasználva folytattam a vizsgálatot, akár a részetekhez történő lefűréssel. Vagyis konkrét esetekkel támasztottam alá az adatok mögött húzódo trendek felderítését.

Az elemzés tárgya

1.) A menetrendi eltérések elemzése

Elemzésem célja a gazdaságosság javítása, melynek során a szolgáltató-hibás (kötbéres) menetrendi eltérések összefüggéseit kerestem, hogy a zavarok ismeretében hogyan indulnak tovább a kutatásban, mely tényezők befolyásolják a számokat, hogyan lehetne csökkenteni ezeket az eltéréseket.

2.) A munkaidő és a forgalmi menetek közötti tartózkodási idő elemzése

Elemzésem célja szintén a gazdaságosság javítása, a vizsgálatom a járművezetők munkaidő optimalizálási lehetőségeire fókuszált.

Mindkét elemzésben kiemelten foglalkoztam egy könnyű és egy közepesen bonyolult viszonylattal, a 118-as és a 26-os busz vonalakkal.

4.6 A menetrendi eltérések elemzése

A HANA adattárház nem csillagséma szerint felépített, összevont nézeti egyszerre tartalmazza a ténytármakat és jellemzőiket, valamint a dimenzió attribútumokat is. A multidimenzionális adatmodellben az elemi adatokat nemcsak egy kulcs függvényében lehet elérni, hanem több kulcstól való függése is nyilvántartott az adatbázisban. Az egyes kulcsok, mint dimenziók szerepelnek az adatelemek elérésekor.

Mérőszámok: amit tárolunk az adatkockában, aminek az értékeit vizsgáljuk.

Dimenzió: jellemzők, amelyek meghatározzák az egyes tényadatokat.

Dimenzió értékkészlet: az egyes dimenzió értékek az adott jellemzőhöz tartozó lehetséges értékek halmazát jelölik.

Dimenzió elem tulajdonság: az egyes dimenzió értékek a tényekhez hasonlóan összetett struktúrával is rendelkezhetnek. Ebben az esetben az egyes struktúra elemeket nevezik tulajdonságoknak.

Adatcella: az adatkockában a tényadatok az egyes dimenzió értékekhez kötöttek. Így az adatkockát úgy képzelhetjük el, mint több, nagy kockába rendezett elemi kocka, vagyis adatcella rendszere. Egy adatcella egy konkrét dimenzió érték n -eshez tartozik, ahol n a dimenziók darabszáma. Minden dimenzió érték n -es kölcsönösen egyértelműen kijelöl egy cellát az adatkockában.

Dimenzió hierarchia: Egyes adatkockáknál előfordul, hogy a dimenziókra különböző tulajdonság szerint rendezetten van szükség. Egyazon dimenzió mentén több különböző dimenzió attribútum értékhalmoz helyezkedik el.

A multidimenziós modellemben a tényadatok, mutatószámok játsszák a központi szerepet. A koncepciónak megfelelően készítettem egy nézetet, amely tartalmazza az összes tényadatunkat és azok jellemzőit (dimenziók). Az adatok elemezhetősége nagyban függ a dimenziók számától, azok jellemzőitől, illetve elemeinek megfelelő csoportosíthatóságától.

Forrásrendszer adatok

- FUTÁR rendszer adatok:
 - menetek (MEN tábla): menetazonosító, dátum, viszonylat, rendszám, telep, járművezető, forgalmi szám, irány, induló és cél végállomás
 - megállóhelyi áthaladások (MEN_MH tábla): menetazonosító, megállóhely sorszáma, tervezett érkezés és indulás, tény érkezés és indulás
- ForTe rendszer adatok:
 - jármű törzs (F_JARMU tábla): rendszám, járműtípus
 - zavarnapló kapcsolótábla (MEN_ZAV): menetazonosító, zavarnapló azonosító
 - zavarnapló tábla (FI_ZAVINFO): zavarnapló azonosító, dátum, kezdő és záró időpont, zavartípus kód, viszonylat, hely, egyéb műszaki információk
 - zavartípus törzstábla (FI_ZAVKOD): zavartípus kód, megnevezés
- SAP PM modul adatok:
 - rendszám – SAP berendezés kapcsolótábla (ZUZELEKERD): rendszám, berendezés azonosító
 - SAP berendezés törzs (EQUI tábla): SAP berendezés azonosító, gyártási év

Tábla kapcsolások

Az SQL nyelv lehetőséget biztosít az összekapcsolás relációalgebrai műveleteinek közvetlen megvalósítására. A JOIN kulcsszó segítségével két adattáblát lehet összekapcsolni egy (vagy több) közös mező alapján. Az INNER JOIN parancs biztosít megoldást a szigorúbb összekapcsolásra, ahol csak a két tábla rekordjainak közös (összekapcsolható) halmaza jelenik meg az eredményben. A LEFT JOIN parancs segítségével kevésbé szigorú összekapcsolás is megvalósítható, ahol a bal oldali táblából (azaz a JOIN parancsnál az elsőként megnevezett táblából) a többi – nem összepárosítható – rekord is megjelenik az eredményben.

Menetfej tábla (MEN) - megállóhelyi indulásokat tartalmazó tábla (MEN_MH)

INNER JOIN - menetazonosító alapján

Adatkör: Megállóhelyi_és_menet_adatok

Megállóhelyi és menet adatok adatkör – zavarnapló kapcsolótábla (MEN_ZAV)

LEFT JOIN – menetazonosító alapján

Adatkör: MH_és_menet_adatok_zavar_kapcsolással

MH és menet adatok zavar kapcsolással adatkör – Zavarnapló tábla (FI_ZAVINFO)

LEFT JOIN – zavar azonosító alapján

Adatkör: MH_és_menet_adatok_zavar_adatokkal

MH és menet adatok zavar adatokkal adatkör – Zavartípus törzstábla (FI_ZAVKOD)

LEFT JOIN – zavartípus azonosító alapján

Adatkör: MH_és_menet_adatok_zavar_adatokkal_minősítéssel

Rendszám / SAP berendezés kapcsolótábla (ZUZELEKERD) – berendezés törzs tábla (EQUI)

LEFT JOIN – berendezés azonosító alapján

Adatkör: Rendszám_gyártási_év_adattal

MH_és_menet_adatok_zavar_adatokkal_minősítéssel adatkör – rendszám, gyártási év adattal adatkör

LEFT JOIN – rendszám alapján

Adatkör: MH_és_menet_adatok_zavar_adatokkal_jármű_gyártási_évvel
MH és menet adatok zavar adatokkal jármű gyártási évvel adatkör – jármű törzs tábla (F_JARMU)
LEFT JOIN – rendszám alapján

Adatkör: Ténytábla (megállóhelyi, menet, zavar és járműadatok)

Mérőszámok

Az adattárház tényadatait mérőszámoknak nevezzük. Ezek azok a mérhető, numerikus adatok, amelyeket az időben elemezni szeretnénk.

- Megállóhelyi áthaladások (indulások) száma: a forgalmi menetek kezdő végállomásáról és a menet közbeni összes megállóhelyen történő indulások száma.
- Késétt sajtáhibás megállóhelyi áthaladások (indulások) száma: az összes indulás közül a menetrendhez képest több mint 180 mp (induló végállomásnál 120 mp) késéssel történő indulás, ha megtalálható a menethez kapcsolt olyan zavarnapló, ami BKV hibás zavartípussal lett rögzítve.

Dimenziók

A dimenziók olyan entitások, amelyek mentén az adatot rendszerezük, és az elemzéseket futtatni kívánjuk. A dimenziókon hierarchiát definiálhatunk, amelyben az alacsony szintű, konkrétabb fogalmakat (pl. nap) magasabb szintű, általánosabb fogalmaknak rendeljük alá (pl. hónap, év).

- Menet dátuma
- Ágazat (Autóbusz, Troli, Villamos stb.)
- Telep: a menetet teljesítő járművet kiadó telephely
- Viszonylat: két végállomás között adott útvonalon és megállókkal definiált közlekedési szolgáltatás, melynek saját azonosítója van
- Forgalmi szám (logikai járműazonosító): adott viszonylaton a tervezett járművek elkülönítésére szolgáló azonosító
- Rendszám (valódi járműazonosító) a forgalmi számhoz rendelt jármű rendszáma
- SAP berendezés azonosító: a menetet teljesítő jármű azonosítója a SAP rendszerben
- Jármű típusa: jármű műszaki besorolása
- Menet iránya
- Jármű gyártási éve
- Menet típusa (forgalmi/garázs/átszerelő)
- Menet tervezett indulási ideje: a menetrendben vagy későbbi operatív tervben meghatározott indulási időpont
- Útvonal kódja: a viszonylat meghatározott útvonal vagy rész-útvonala
- Járművezető
- Megállóhely sorszáma: induló végállomástól számított megállóhely sorszám
- Megállóhely neve
- Megállóhely típusa (Induló vagy cél végállomás, köztes megálló)
- Pontosság (késétt, korai, pontos indulás)
- Menethez köthető zavar típusa: zavar oka
- Menethez köthető zavar saját hibás-e (kötbéres-e): a zavar oka a BKV hiba

Az elemzés adatmodellje

A 9. ábrán látható adatmodellt SAP HANA Design Studio-val készítettem, melynek verziószáma: 2.3.50

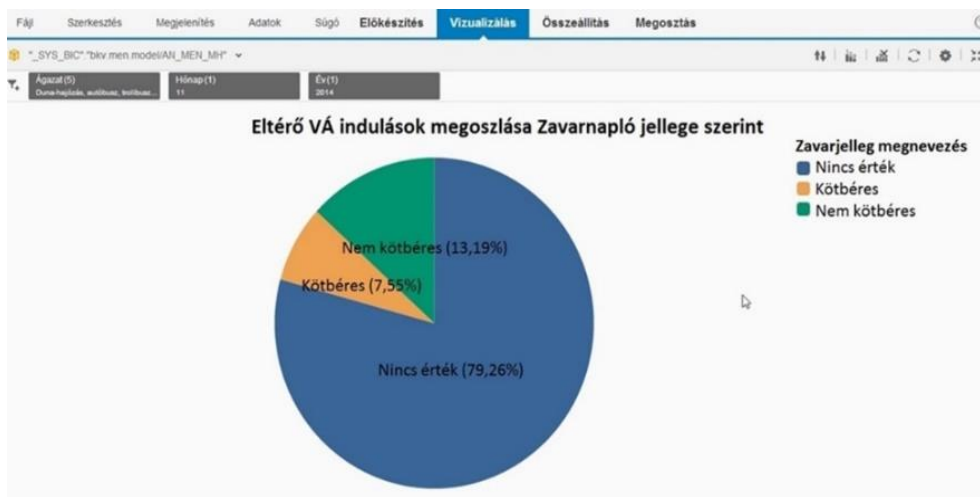
- *Vizsgált elemzés_3: Szolgáltató hibás eltérő megállóhelyi (MH) indulások száma zavarokód szerint*
Az összes viszonylatra, a 26-os majd a 118-as viszonylatokra
 - EREDMÉNY: az eltérő menetrendi indulások fő oka a műszaki zavar – vagyis a busz műszaki állapotával van összefüggésben az eltérő indulási adat. Mi legyen a következő szempont, ami mentén még pontosabb eredményeket kaphatnánk? Érdemes lenne megvizsgálni a járműéletkort.
- Ezért a járművek életkora szerint folytattam a részletesebb vizsgálatot, ugyanezen az adathalmazon.
Kimutatást készítettem a BKV járműparkjának életkor szerinti megoszlásáról, amelyről látszik, hogy érdemes-e a teljes adathalmazt vizsgálni, részt vesznek-e elemzésre érdemes arányban az idősebb járművek is a forgalomban.
 - *Vizsgált elemzés_4: Életkor szerinti vizsgálatok*
Forgalomban való részvétel járműgyártási év szerint
 - EREDMÉNY: a 80-as 90-es évjáratú járművek is viszonylag sok járatot teljesítenek.
Ezért tovább vizsgáltam az életkor szerint a menetrendi késések számát az összes viszonylatra, illetve külön a 26-os és 118-as viszonylatokra.
 - EREDMÉNY: Egyértelműen látszik az elemzésekből, hogy az idősebb járműveknél magasabb az eltérő indulások száma
- Megvizsgáltam újabb szempont, a járműtípus szerint ugyanerre az időszakra vonatkozóan, hogy vajon a járműtípusnak mennyire van szerepe az életkor mellett?
 - *Vizsgált elemzés_5: Szolgáltató hibás késések aránya jármű típus szerint*
 - EREDMÉNY: Megállapítható, hogy járműtípusonként igencsak változó a saját hibás késési arány.
- Más módszer választásával vizsgáltam tovább a fenti eredményeket: Lineáris regressziós modell segítségével megvizsgáltam, hogy a fenti eredmények függenek-e a napszaktól, járműtípustól, járművezetőtől, vagy a menettől? Ezek a tényezők mennyire befolyásolják a pontosságot?
 - *Vizsgált elemzés_6: Menetrendi eltérések függőségének megállapítása - kiátlagolt heti lefutása*
 - EREDMÉNY: Arra jutottam, hogy a napszak és a hét napjai jelentősége triviális, a viszonylatok, illetve a járművezetők ugyanolyan jelentősek, de egymástól függetlenek.
 - A járműtípusnak statisztikailag kimutatható hatása van.

Az elemzések részletei:

Vizsgált elemzés_1: Eltérő VÁ(végállomási) indulások megoszlása zavarnapló szerint

A 10. ábrán a menetrendtől eltérő (korai vagy késői) végállomási indulások eloszlása látható aszerint, hogy a BKK által felvett – és a menethez kapcsolt – zavarnapló zavarjelleg attribútuma szolgáltató hibás-kötbéres vagy nem kötbéres típusú-e.

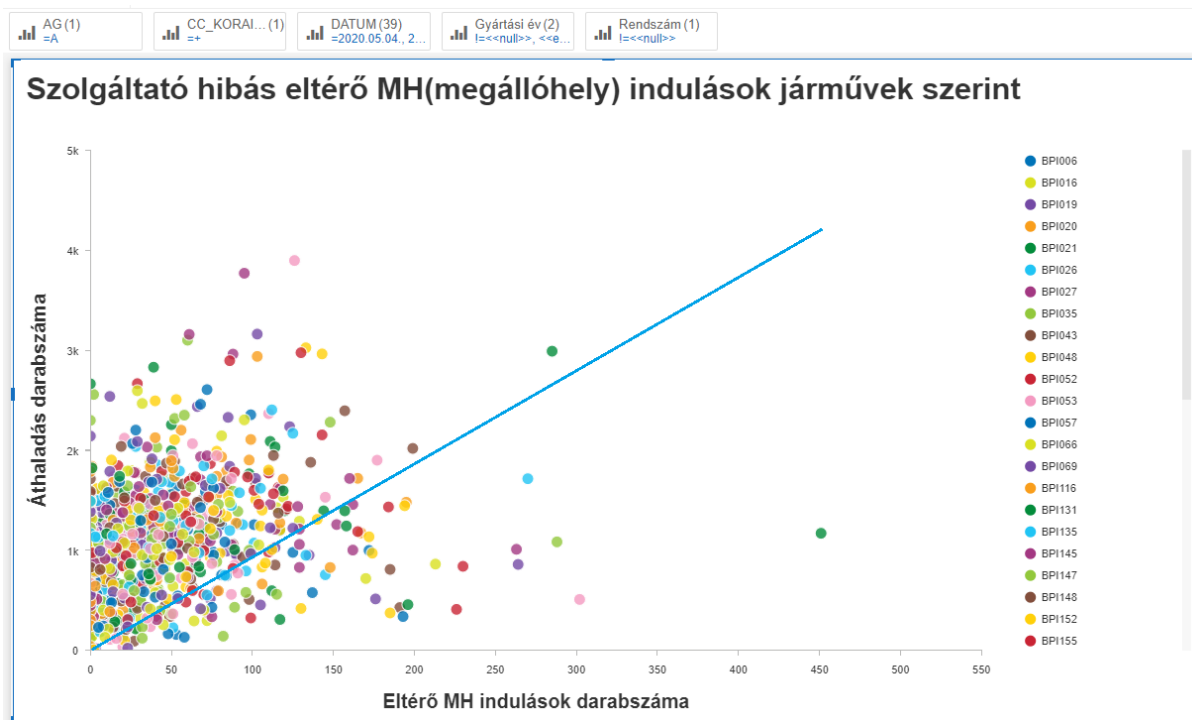
Az eredmény fontos információra derített fényt: az eltérő indulásoknak csak a 21 %-a van beazonosítva zavarnaplóval – a kiváltó ok szerint. A nem beazonosított 79%-ba beletartoznak a korai indulások – amelyekhez eleve nem tartozik zavarnapló, illetve az eltérést okozó kisebb jelentőségű események, amelyekhez szintén nem rögzítenek zavarokat. Kisebb arányban elképzelhető adathiány, elmaradt zavarnapló rögzítések is.



10. ábra. Eltérő VÁ indulások megoszlása zavarnapló szerint
(Forrás: Lumira riport)

A továbbiakban a **kötbéres** – vagyis a szolgáltató hibájából okozott eltérő indulásokat elemeztem, elsőként járművek szerint.

Vizsgált elemzés_2: Szolgáltató hibás eltérő MH(megállóhely) indulások járművek szerint



11. ábra. Szolgáltató hibás megállóhelyi indulások járművek szerint
(Forrás: Lumira riport)

A 11. ábrán a menetrendtől eltérő (korai vagy késői) saját hibás megállóhelyi indulások eloszlása látható rendszámoként gyűjtve aszerint, hogy a menetszámhoz viszonyított arányuk mennyire felel meg az

elvárt értéktartományának, ami a 0-10 %-os szolgáltató hibás arány (a grafikonon a színes körök a járművek, rendszám alapján).

Az elemzés rávilágított, hogy melyek az arányaiban „rosszul” teljesítő járművek: ezek a Lumira riporton látható határ trendvonal alatt jelzett járművek, mivel ezeknél a menetszámhoz képest számszerűen sok az eltérő indulás esemény. A kapott halmazra további részletező vizsgálatot lehet végezni, hogy az adott járműhöz (jelen vizsgálatban buszokhoz) köthető, túl gyakori szolgáltató hibájából bekövetkezett indulási zavar okokra fény derüljön. A BI lekérdező eszközökkel a modellekben rendelkezésre álló nézetek, valamint a betöltési granularitás szerint pl. járműtípus, járművezető, napszak, viszonylat, stb. a további részletekhez tetszőlegesen le lehet fűni.

Vizsgált elemzés_3: Szolgáltató hibás eltérő megállóhelyi (MH) indulások száma zavarkód szerint

Az elemzéseket további nézetek mentén folytattam, elsőként az összes viszonylatra:

Szolgáltató hibás eltérő megállóhelyi indulások zavarkód szerint, összes viszonylatra



12. ábra. Szolgáltató hibás eltérő megállóhelyi indulások zavarkód szerint
(Forrás: Lumira riport)

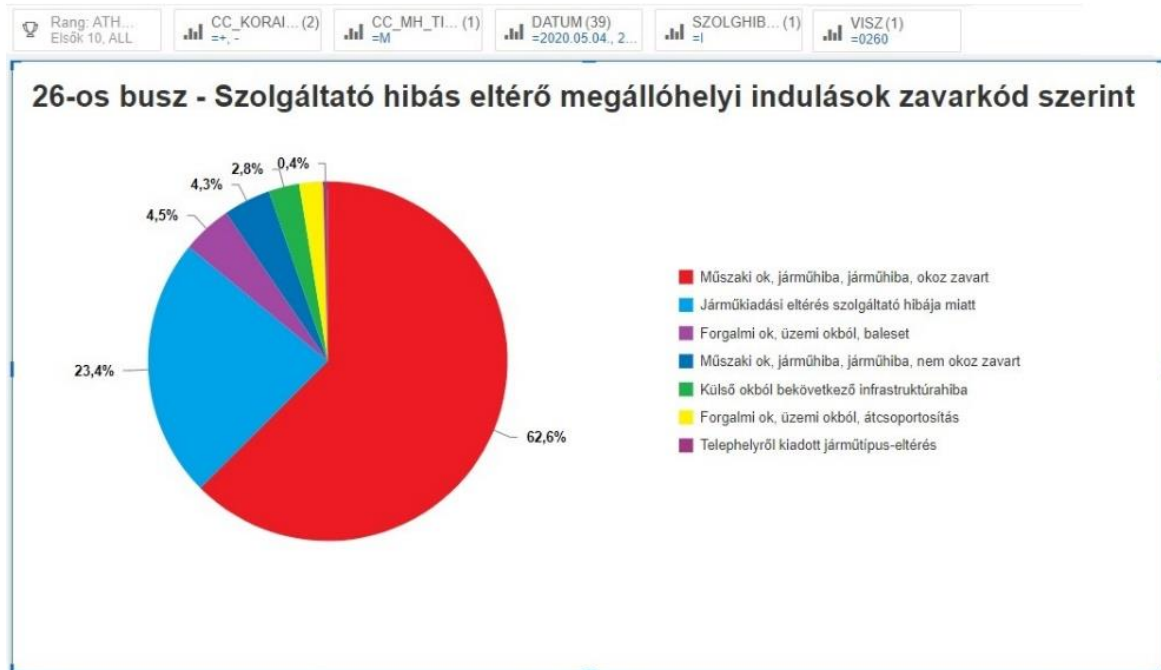
A 12. ábra a szolgáltatóhibás zavarok megoszlását mutatja az összes viszonylatra. Látható, hogy a műszaki okú zavarok fordulnak elő a leggyakrabban. Ha a kiválasztott két viszonylatra nézzük, hasonló eredményt kapunk.

A 26-os és 118-as viszonylatok szerinti lefűrés

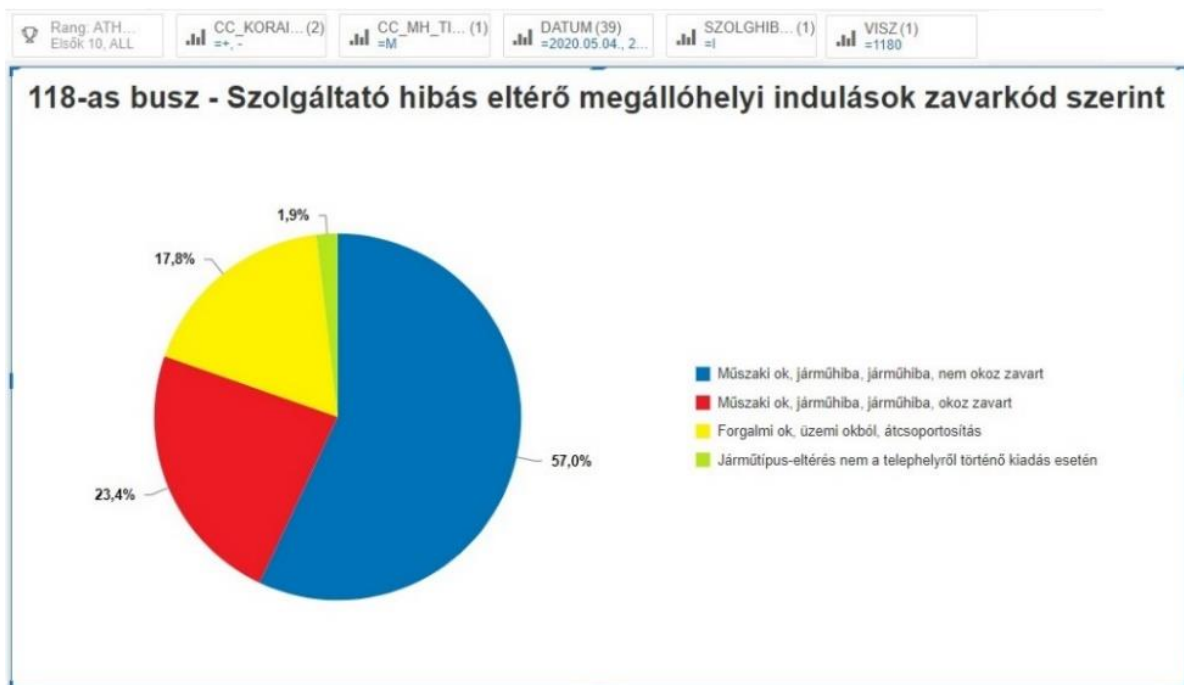
A 13. és a 14. ábrákon a két viszonylat menetrendtől eltérő (korai vagy késői) saját hibás megállóhelyi indulásainak eloszlása látható aszerint, hogy a BKK által felvett és a menethez kapcsolt zavarnapló zavartípus jellemzője milyenfajta saját hibát mutat.

Az elemzések megmutatják, hogy melyek a leggyakoribb zavarok, amelyek a szolgáltató hibájából következtek be. A kördiagramokon látszik, hogy a kiválasztott viszonylatokon a leggyakoribb zavar a „Műszaki ok, járműhiba” volt. Az egyik viszonylaton (26-os busz) a zavart okozó járműhiba komolyabb,

zavart okozó jellegű típusú, míg a másik viszonylatnál (118-as busz) az enyhébb, zavart nem okozó fajtája fordult elő eltérő indulási hibaokként.



13. ábra. Szolgáltató hibás eltérő megállóhelyi indulások a 26-os busz vonalán
(Forrás: Lumira riport)

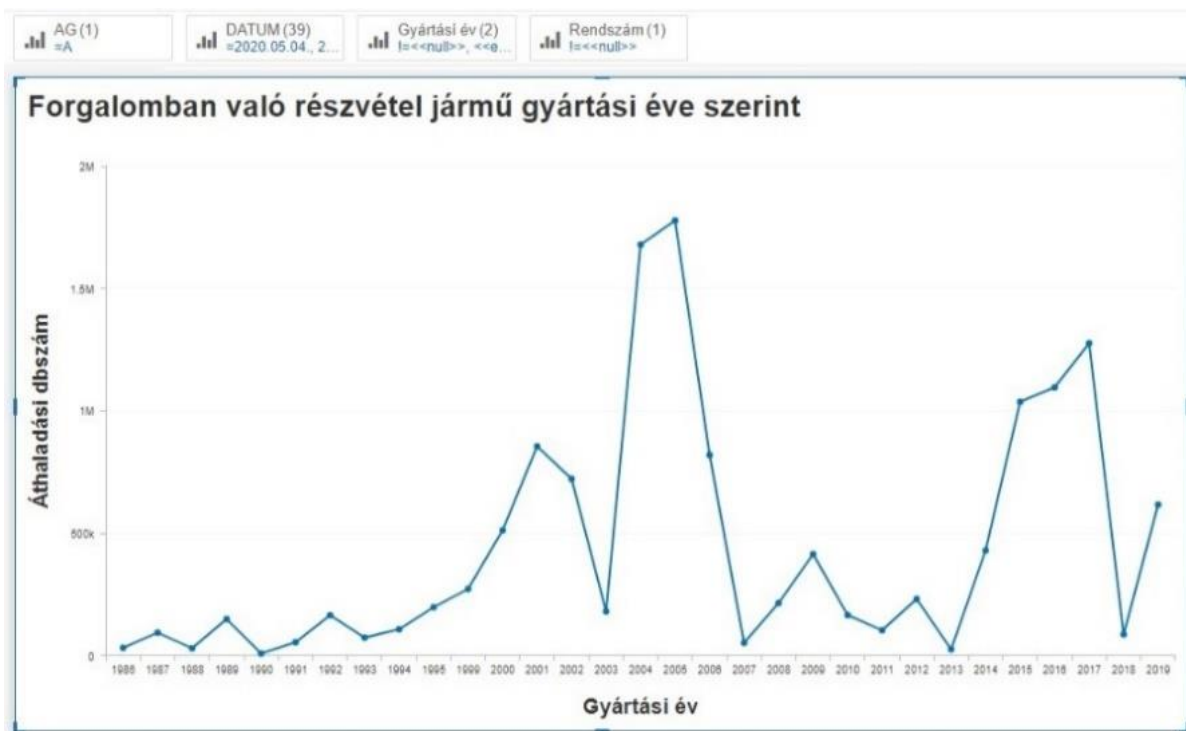


14. ábra. Szolgáltató hibás eltérő megállóhelyi indulások a 118-as busz vonalán
(Forrás: Lumira riport)

Mivel a fenti ábrákból azt a következtetést lehet levonni, hogy a legtöbbször műszaki oka van a saját hibás menetrendtől eltérő indulásoknak, további szempontok szerint kezdtem vizsgálni a menetrendi eltéréseket, elsőként a járművek életkora szerint. Feltételeztem, hogy kimutatható; az idősebb járműveknél több meghibásodással kell számolnia a karbantartási részlegnek.

Vizsgált elemzés_4: Életkor szerinti vizsgálatok

Forgalomban való részvétel jármű gyártási év szerint



15. ábra Forgalomban való részvétel jármű gyártási év szerint
(Forrás: Lumira riport)

A 15. ábrán bemutatott járművek forgalomban való részvételét kimutató grafikonról (összes megállóhelyi áthaladás jármű gyártási év szerint) látszik, hogy az életkor alapján a BKV járműparkjának adott évjáratú járművei mennyire vesznek részt a forgalomban: a 80-as, 90-es évjáratú járművek is viszonylag sok járatot teljesítenek.

Így következő lépésként megvizsgáltam évjárat szerint a saját hibás késések arányát az összes indulásokhoz viszonyítva. A régebbi, 80-as, 90-es évek évjáratú járművei valóban sok késést mutatnak, bár a grafikonon a rendszerváltás előtt gyártott, jobb minőségű Ikarus buszok javítanak a statisztikán.

Szolgáltató hibás menetrendi késések aránya jármű életkor szerint



16. ábra Szolgáltató hibás menetrendi késések aránya jármű életkor szerint
(Forrás: Lumira riport)

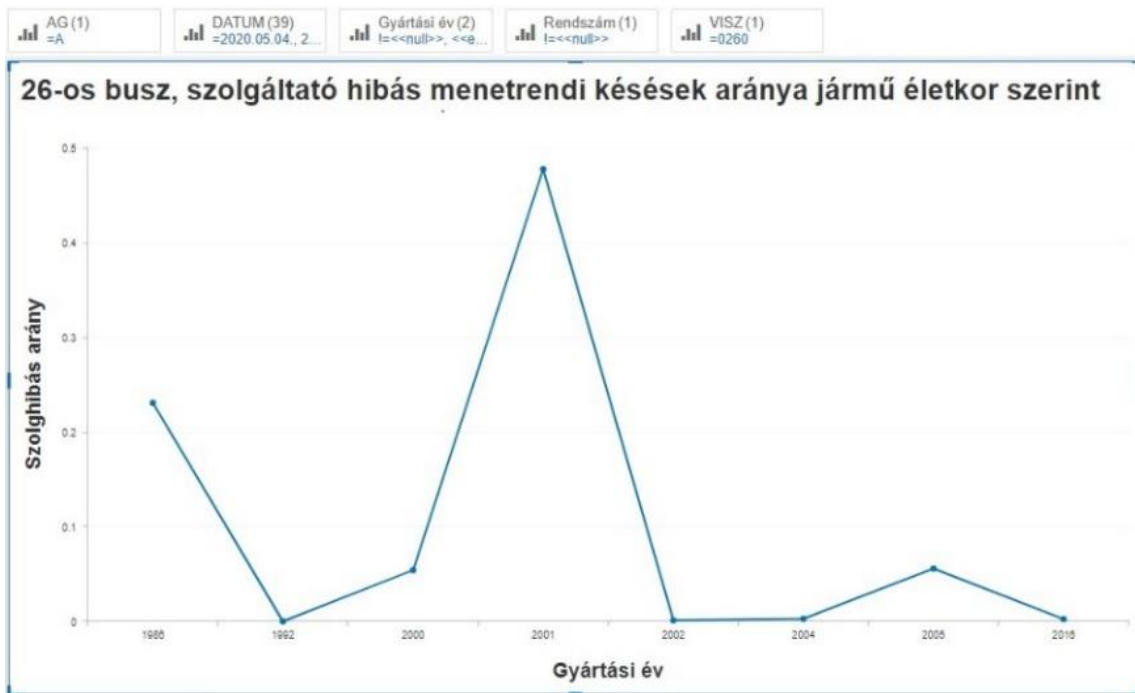
A 16. ábrán a Szolgáltatói hibás arány (a grafikon függőleges tengelyén) mutatja a saját hibás menetrendi késések arányát az összes megállóhelyi induláshoz viszonyítva járműgyártási évenként.

Azt lehet leolvasni, hogy valóban az idősebb járműveknél több az eltérés. A következőkben bemutatom a számok alakulását 1-1 viszonylatra.

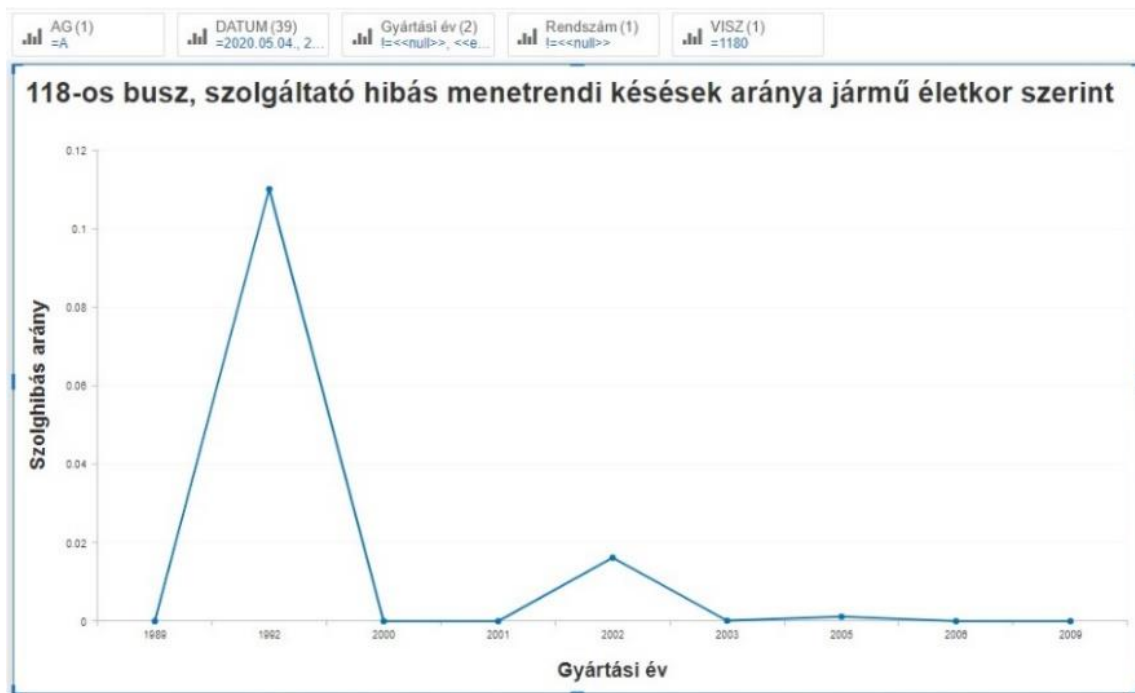
Lefűrés viszonylatokra

A fenti példákhoz hasonlóan a 26-os és a 118-as buszok viszonylatait vizsgáltam, így ezekre a viszonylatokra lefűrva is elkészítettem a fenti menetrendi késések aránya grafikont. Megállapítható, hogy e viszonylatokon a 20-30 éves járműveknél itt is magas a saját hibás késési arány.

A 17. és a 18. ábra alapján a vizsgálatok kimutatták az életkor szerepét.



17. ábra. 26-os busz, hibás szolgáltató hibás késések aránya jármű életkor szerint
(Forrás: Lumira riport)

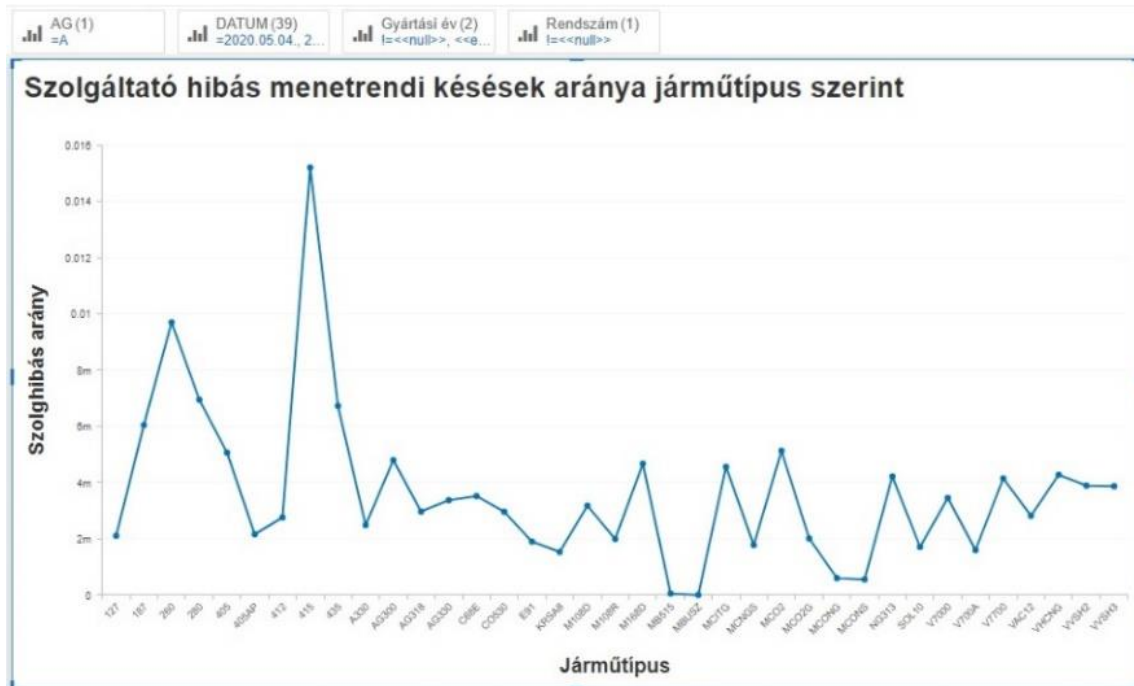


18. ábra. 118-as busz, hibás szolgáltató hibás késések aránya jármű életkor szerint
(Forrás: Lumira riport)

A továbbiakban felmerült, hogy van-e befolyása a járműtípusnak az eltérő indulások darabszámának alakulására. Ezért következő lépésként járműtípusonként is megvizsgáltam a menetrendi eltérések alakulását.

Lefűrés járműtípusra

A 19. ábrán a szolgáltatói hibás arány (a grafikon függőleges tengelyén) mutatja a saját hibás menetrendi késések arányát az összes megállóhelyi induláshoz viszonyítva járműtípusonként.



19. ábra. Szolgáltatói hibás késések aránya jármű típus szerint
(Forrás: Lumira riport)

Megállapítható, hogy járműtípusonként erősen eltért a saját hibás késési arány. Emellett még több, másfajta gazdaságossági vizsgálatot érdemes végezni, melyek alapján osztályozni, értékelni lehet az adott járműtípus használhatóságát, mely információ a járműpark összetételének helyes megválasztásához fontos támpontot adhat.

Megvizsgáltam más módszerekkel is, hogy valóban statisztikailag kimutathatóan levonható-e a fenti következtetés.

Vizsgált elemzés_5: Menetrendi eltérések függőségének megállapítása

Elemzési lépések

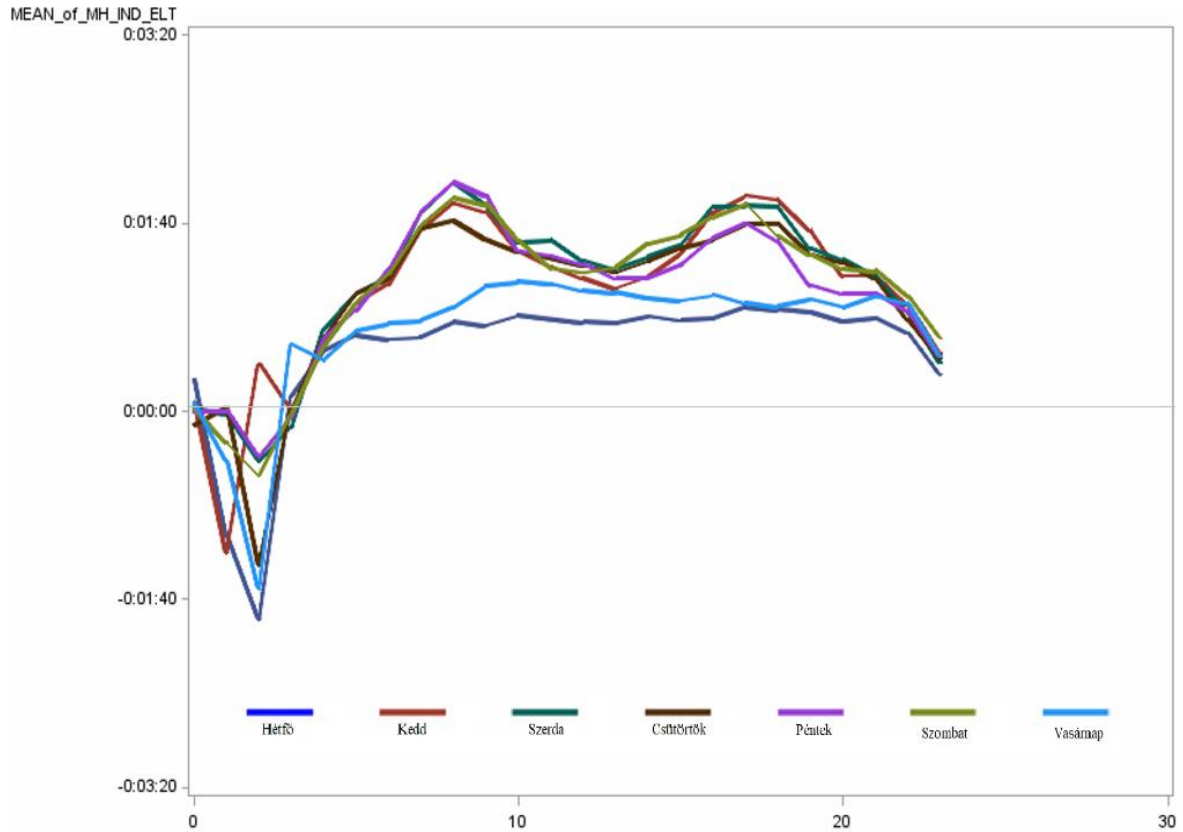
A buszközlekedésre vonatkozó menetrendi eltérések függőségének megállapításánál azt vizsgáltam, hogy a tipikus, csúcsforgalomból és egyéb általános, a napszaktól függő hatások függnek-e a járművezetőtől vagy jármű típustól.

Vizsgálati szempontok:

- Megállóhelyenként kiszámoltam az előjeles eltéréseket (+: késés),
- az eltéréseket menet szintre vonatkoztattam,
- az eltérések fő meghatározója a forgalom sűrűsége,
- ezt a jelenséget az eltérések heti lefutásával modelleztem,
- klaszteranalízis segítségével a járatokat három csoportra osztottam, egy csoportba a heti lefutás szerint hasonlóak kerültek,
- megvizsgáltam a klaszterátlaghoz képesti eltéréseket,
- kiátlagoltam a célváltozót a napszak, a hét napjai, járművezető, járat, járműtípus kategóriákra.

Lineáris regressziós modell segítségével megvizsgáltam, hogy ezek a tényezők mennyire befolyásolják a pontosságot.

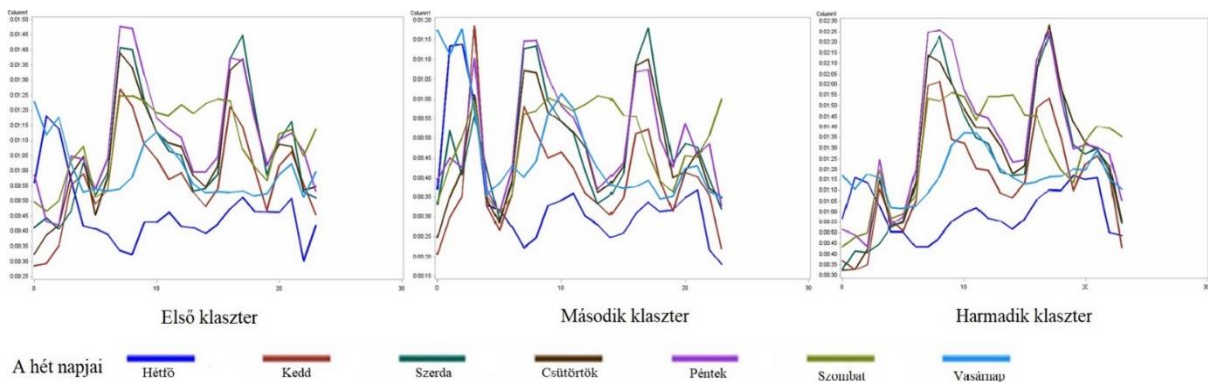
Az eltérésnek a teljes alapsokaságon kiátlagolt heti lefutása látható a 20. ábrán. A vízszintes tengelyen az óra, napon belül (0-23), a függőleges tengelyen az átlagos eltérés látható. A különböző színű görbék a hét különböző napjaihoz tartoznak.



20. ábra. Az eltérésnek a teljes alapsokaságon kiátlagolt heti lefutása
(Forrás: Predictive analytics)

Járatok eltérésének heti lefutása

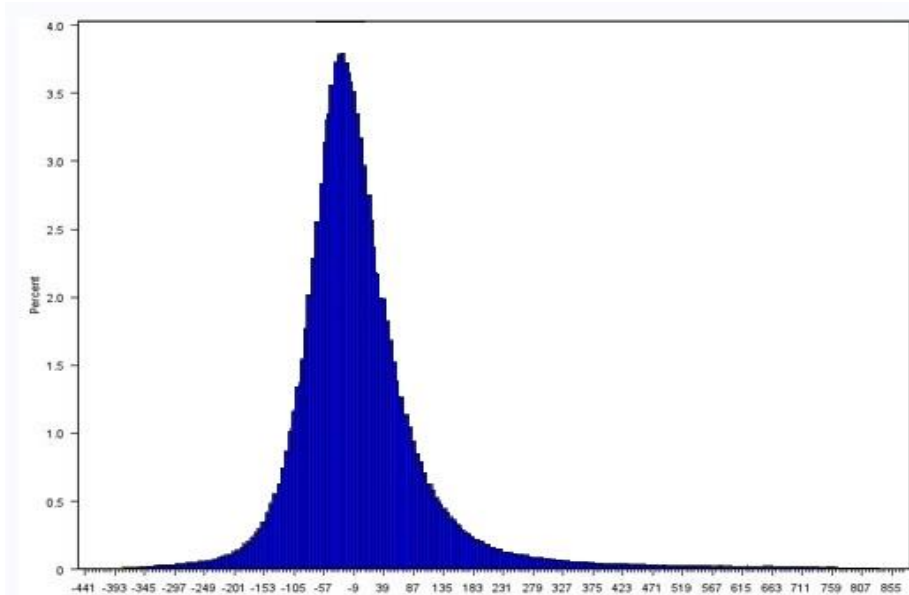
Klaszterezés segítségével a járatokat három csoportra osztottam. Egy csoportba a heti lefutás szerint hasonlóak kerültek.



21. ábra. A járatok eltérésének heti lefutása klaszterenként
(Forrás: Predictive analytics)

A 21. ábrán egyes menetek eltéréseinek a heti lefutás feletti része látható. A célváltozót a jelentősnek gondolt tényezők tekintetében kiátlagoltam az útvonalakra, a járműtípusokra és a járművezetőkre.

Lineáris regressziós modell segítségével megvizsgáltam, hogy ezek a tényezők mennyire befolyásolják a pontosságot. Kérdés, hogy a járművezetőtől függ-e a pontatlanság, ami a járművezető által tipikusan vitt járatok jellegéből fakad. A célváltozó eloszlását a 22. ábra mutatja be.



22. ábra. A célváltozó eloszlása
(Forrás: Predictive analytics)

Az autóbuszok pontatlanságát az alábbi tényezők befolyásolják:

- Milyen napszakban, illetve a hét melyik napján indul a járat a végállomásra.
- Ki a járművezető.
- Milyen viszonylatról, ill. útvonalról van szó.
- Mi a jármű típusa.

Arra jutottam, hogy a napszaknak és a hét napjainak jelentősége triviális, a viszonylatok, illetve a járművezetők ugyanolyan jelentősek, de egymástól függetlenek. A járműtípus tényezőnek is statisztikailag kimutatható hatása van.

4.7 A munkaidő és a forgalmi menetek közötti tartózkodási idő elemzése

Kutatásomat az optimalizálás, hatékonyságjavítás érdekében a jelenlegi működési rendben a munkaidő kihasználtság területén folytattam.

Az elemzés adatmodellje

A munkaidő elemzésekhez használt riportok az alábbi adatmodellel készültek:

Multidimenziós adatmodell munkaidő és tartózkodási idő elemzéshez

Forrásrendszer adatok:

- ForTe rendszer adatok:

- Forgalmi tevékenységek (F_FMTEV tábla): beosztás azonosító, dátum, telep, tevékenységkód, terv és tény indulási idő, érkezési idő, hely, útvonal, jármű rendszám, járművezető, megtett_út, ágazat, viszonylat, forgalmi szám, terv-tény jelző

Táblakapcsolások

F_FMTEV – aggregált F_FMTEV (dátum, indulási idő, viszonylat, forgalmi szám, tevékenységkód)

Inner join - dátum, indulási idő, viszonylat, forgalmi szám, tevékenységkód alapján – az adott tevékenység utolsó állapotának elérése miatt

Mérőszámok

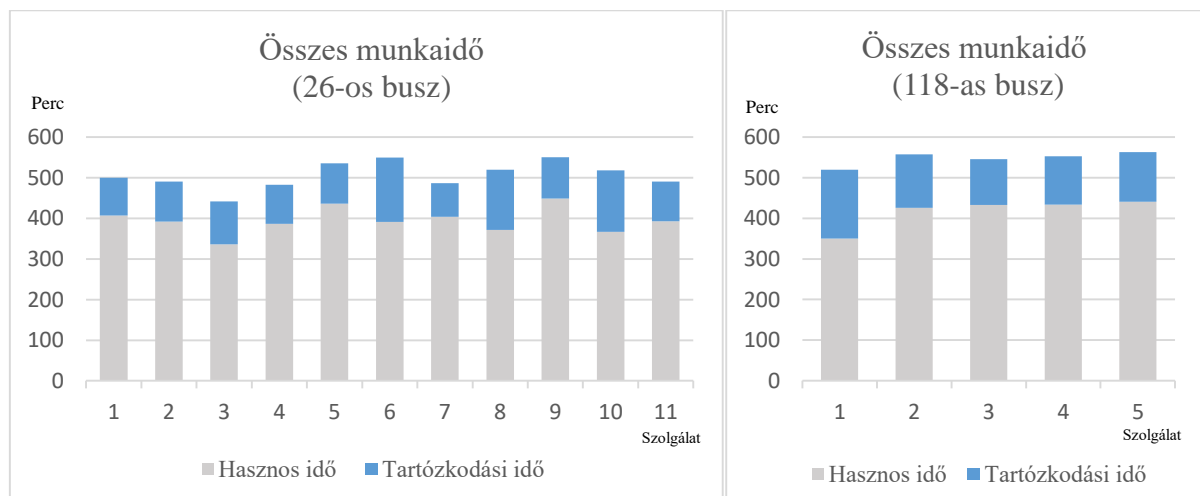
- Hasznos tevékenység időtartama: a tevékenységek kezdő- és záró időpontja közötti időtartamok járművezető beosztásonként
- Tartalék idő: várakozás típusú tevékenység időtartama járművezető beosztásonként
- Érkezés - indulás közötti idő: menetek közötti várakozási idő járművezető beosztásonként

Dimenziók

- Járművezető beosztás dátuma
- Ágazat (Autóbusz, Trolis, Villamos stb.)
- Telep: a menetet teljesítő járművet kiadó telephely
- Viszonylat: két végállomás között adott útvonalon és megállókkal definiált közlekedési szolgáltatás, melynek saját azonosítója van

Elemzés_2: A munkaidő és a forgalmi menetek közötti tartózkodási idő kimutatása

Elemeztem a járművezetők munkaidejét, a munkaidő és a forgalmi menetek közötti tartózkodási idő megoszlását. Az erőforrások optimalizált felhasználását vizsgáló riport példában a 26-os és a 118-as busz viszonylatokon elemeztem a járművezetők munkaidő kihasználtságát (23. ábra). A vizsgálat a rendszerben elérhető BI lekérdezővel készült. A bemeneti forrásadatok járművezetőnként, viszonylatonként, szolgálati bontásban tartalmazták, hogy a menetrend szerint közlekedő buszjáratokon a munkafelvételétől kezdődően a munka leadásának pillanatáig a járművezető milyen tevékenységeket végzett.



23. ábra. Összes munkaidő kimutatása a hasznos idő és a tartózkodási idő arányában (Forrás: saját szerkesztés)

A 23. ábrán a 2018.06.16 és 2018.07.31 között érvényben levő B80652 számú menetrend (26-os busz viszonylat) és a C06246 számú menetrend (118-as busz viszonylat) munkaidő - tartózkodási idő kimutatása látható, amely alapján megállapítottam, hogy a terv szerint a járművezetők munkaidejük jelentős, 22-24 százalékában nincsenek kihasználva. Jobb szervezéssel hatékonyabban tudnának dolgozni. A tényadatok – amelyek a felmerült rendkívüli események miatt eltérnek ettől, a menetrendben szereplő tervtől – némileg alacsonyabb tartózkodási idő arányt mutatnak.

4.8 Konklúzió

A járművek magas életkora miatt az eltérések zavaroka egyértelműen a műszaki hibák jelentkezése, amelyet csak a járművek fiatalításával, lecserélésével, vagy a drágább fődarabok, alkatrészek (pl. motor) cseréjével lehetne javítani.

További vizsgálataim szerint a járműtípus jó megválasztásának is jelentős szerepe van, és köztudott, a megbízható járműtípusok ára arányos a nyújtott minőséggel. Tehát a menetrendi eltérések darabszáma lecsökkentésének komoly költségvonzata van, és ez az állapot tartósan megmaradhat, különösen akkor, amikor a közlekedésre fordított költségvetési források csökkenő tendenciát mutatnak. A szükséges jármű-, illetve eszközcsere mértéke, idő- és forrásigénye jellemzően jelentősen túlmutat a pénzügyi lehetőségeken, ezért jelen fázisban nem reális alternatíva a szolgáltatásjavítási törekvésekben, ami a kutatási irányaimat illeti.

A munkaidő kihasználtság vizsgálata alapján arra a megállapításra jutottam, hogy javasolt a humán erőforrások kihasználtságát javító célzott optimalizációs eljárások kidolgozása és bevezetése.

A következő fejezetben egy klasszikus algoritmikus menetrend megvalósítási módszer adaptációját vizsgálom.

4.9 1. tézis

Kialakítottam a BKV informatikai rendszeréhez releváns olyan információs technológiai modellt, amely képes összekapcsolni az adott üzleti rendszereket, és azokból valós időben naprakész adatokat szolgáltat.

Igazoltam, hogy az üzemi menetrend hatékonyabb megvalósítása, annak algoritmikus támogatása nem valósítható meg a Big data jellegű megközelítés nélkül a forrásrendszerekből származó nagy adatmennyiség és a komplexitás miatt.

Big data alapú módszerrel elemeztem a BKV-nál rendelkezésre álló adatokat, melynek eredményeképpen rámutattam a buszközlekedés üzemi menetrend-megvalósítás területén az egzakt optimalizáltság hiányára.

Meghatároztam, hogy a jármű oldali hatékonyságjavítási törekvések jelen kutatás szempontjából nem reálisak, ugyanakkor a munkaidő jobb szervezésével jelentős hatékonyságnövekedést lehet elérni.

Vizsgálatokkal kimutattam, hogy a munkaidő hatékonyabb kihasználása révén az üzemi tervezés tovább javítható.

Ezen belül:

- Azonosítottam a BKV-nál rendelkezésre álló adatvagyonból a vizsgálatba bevont forrás rendszereket, az érintett adatok halmazát, szükséges eszköztárat és megvizsgáltam a kapcsolódásaikat.
- Az elemzési célok elérése érdekében meghatároztam a forrás rendszerek adatköreit, amely alapján az adekvát adatmodell felépíthető.
- Elkészítettem a BKV forgalmi alapszisztemének tevékenység szintű adataira, valamint a forgalmi összesítő adataira vonatkozó megfelelő részletezettségű adatmodellt.
- Az adatmodell felhasználásával a vizsgálatom szempontjából releváns elemzéseket elvégeztem.
- Felderítettem a menetrendi eltérések függőségeit.
- A Big data analízis során felderítettem az adatok mögött húzódó összefüggéseket.
- Megterveztem a BI lekérdező eszköz segítségével előállított eredmények vizualizációját.
- Kutatásaim révén összefüggést találtam a munkaidőn belüli tartózkodási idő kihasználatlanságára és megállapítottam a működési hatékonyságra vonatkozó eljárások beavatkozási pontjait.

Kapcsolódó publikációk

1.

Albert, Nagy ; József, Tick

Improving Transport Management with Big Data Analytics

In: Szakál, A (szerk.) 2016 IEEE 14TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT SYSTEMS AND INFORMATICS (SISY)

New York (NY), Amerikai Egyesült Államok : IEEE (2016) 278 p. pp. 199-203. , 5 p.

Könyvrészlet/Konferenciaközlemény (Könyvrészlet)/Tudományos [3167624]

2.

Albert, Nagy ; József, Tick

Review of Predictive Analytics Vendors for Transport Management Systems

In: Szakál, Anikó (szerk.) 2017 IEEE 15th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY) : 15th IEEE International Symposium on Intelligent Systems and Informatics

New York (NY), Amerikai Egyesült Államok : IEEE, (2017) pp. 225-230. , 6 p.

DOI IEEE Xplore WoS

Idézett közlemények száma: 1

3.

Albert, Nagy ; József, Tick

Modeling of operative planning solution for transport management systems

In: Szakál, Anikó (szerk.) Proceedings of 22nd IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems 2018 (INES 2018)

Budapest, Magyarország : IEEE Hungary Section (2018) 441 p. pp. 401-406. , 6 p.

Tudományos

5 Egy klasszikus algoritmikus módszer adaptációja a menetrend megvalósítási feladatokra

A menetrend megvalósítás folyamatának egyik legjobban vizsgált területe az eszközpark és a humánerőforrás optimális felhasználása, a kapcsolódó költségek minimalizálása. A számítástechnikai fejlődés következtében lehetőség nyílt az operációkutatás számos alkalmazási területen való nagymértékű használatára, így az üzemi tervezés folyamatainak gyorsabb és hatékonyabb elvégzésére is. A feladat optimális vagy közel optimális megoldásához kifejezetten nagy számolási kapacitás szükséges, és sok megoldandó, optimalizálandó matematikai részproblémát tartalmaz. A helyi sajátosságok matematikai modellezése lineáris programozási módszerrel történik, mely során egy lineáris célfüggvény szélső értékének megkeresését valósítjuk meg egy olyan halmazon, melyet lineáris egyenlőségek és egyenlőtlenségek határoznak meg.

Az alábbiakban ismertetett, klasszikusnak tekinthető optimalizálási módszer a teljes munkaidő minimalizálására irányul. Az elvi optimalizálási lehetőségének vizsgálata igen összetett, sok tényezőt magában foglaló feladat, ezért az integrált megközelítést szem előtt tartva az ütemezési feladat klasszikus megoldására egy kombinált jármű és személyzet ütemezés optimalizáló modellt használtam. Ennek több változata is ismert a 2. fejezetben is ismertetett szakirodalomban. A dolgozatomban alkalmazott módszer a Huisman doktori értekezésében [39] részletesen leírt VCSP modellt adaptált változata, melyhez felhasználtam a Haase et al. [41] eredményeit is. Az algoritmus kiegészítésre került egyrészt az üzemanyag fogyasztás, másrészt a parkolási korlátok kezelése tekintetében, és a feladat méretének a csökkentése járatösszevonási eljárást is tartalmaz.

Az eljárásban a problémák csökkentett sorozatát kell megoldani, melyek az eredeti változókból csak keveset tartalmaznak, egy sor új oszlopot kapunk a megoldás információi alapján. Abban az esetben, ha a megoldás nem javítható új oszlopok hozzáadásával, a csökkentett feladat optimális megoldása egyben az eredeti feladat optimális megoldása is.

Első megközelítésben a 3. fejezetben leírt gyakorlati menetrendkészítés folyamatainak ismeretében kidolgoztam a vizsgálati módszertant, annak összefüggéseit és végrehajtását.

5.1 A bemenő paraméterek

Az eljárás első lépését képező kezdő fordarendszert (járatlistát) és a jármű darabszámot a szolgáltatás megrendelője határozza meg, ami tartalmazza a feladat elvégzéséhez szükséges összes olyan paramétert, amely képes kezelni a leváltásos pihentetést is.

Első lépésben a járatlistákat szükséges kiválasztani. Ezt tekintem a feladat bemenetének.

Ezt követően a feladat ellátásához rendelkezésre álló járművek számát szükséges megadni telephelyre, típusra és időszakra lebontva. Ezt további bemenetnek tekintem. A feladat megoldhatósága szempontjából fontos, hogy a járatlista ne tartalmazzon olyan végállomási tartózkodásokat, ahol esetlegesen sérül a paraméterlapon megadott technológiai és kiegyenlítő idő, mivel ebben az esetben az eljárás azzal a hibával térhet vissza, hogy a feladat nem megoldható, miközben ezek az idők csak másodlagosak a megoldás szempontjából. Ezek után lehetőség van a végállomások, tárolóhelyek kapacitásának megadására.

Következő lépésben a foglalkoztatási szabályokat kell megadni, amely az időkereteket betartja és kihasználja. Itt tanácsos olyan szabályprofil készíteni, ami szűkebb tartományban engedi mozogni a megoldást (pl.: nem engedjük meg a 7 óra alatti szolgálatokat).

Ezek után kiválaszthatók és törölhetők a járatlistához tartozó útvonalak. Kezdetben minden a paraméterlapon szereplő útvonal megjelenik, de a feladat terjedelmének megfelelő szinten tartása érdekében javasolt a felesleges útvonalak törlése.

Az utolsó előtti lépésekben, megadhatók viszonylatonként és telephelyenként a váltási lehetőségek, illetve a pihentetési és lekerülési engedélyek. Megadható továbbá, hogy melyik viszonylaton milyen jármű közlekedhet.

Utolsó lépésként megadhatók a menettartamok. Itt van lehetőség a technológiai és kiegyenlítő idők módosítására, továbbá az éjszakai viszonylatok paraméter lapjainál szükséges a napszakok megváltoztatására.

5.2 A vizsgálati módszertan

Általánosságban minden járatnak van egy indulási időpont halmaza, és minden egyes időponthoz hozzárendelhetők egyedi korlátozások (pl. az adott indulás csak munkanapokon közlekedik, vagy minden nap kivéve az ünnepnapokat stb.). A feladat során egy adott halmaz elemeiből képzett párokkal kell dolgozni, ezért a gráfelmélet jó modellalkotási lehetőséget nyújt.

A modell legfontosabb elemei a menetrend szerinti járatok összessége és a rendelkezésre álló járművek. A menetrend szerinti járatok azok a járatok, amelyek során a buszok ténylegesen utasokat szállítanak. Minden ilyen utat az indulási és érkezési idők, az indulási és érkezési állomások, valamint a köztük lévő távolság határoz meg. A járművek elhelyezkedésük alapján különböző (fizikai) telephelyekre vannak felosztva. Ez lehet a garázs, vagy parkolóhely. A járművek különféle fontos jellemzőkkel is rendelkezhetnek, amelyek lehetővé teszik számunkra, hogy tovább csoportosítsuk őket. Ezeknek megfelelően a járműveket fizikai (földrajzi) elhelyezkedésük és jellemzőik alapján szétválasztott részhalmazokba sorolják. Az így kialakult részhalmazokat telephelyeknek nevezzük. Fontos szempont, hogy a gyakorlati megvalósítás során a menetrend szerinti járatok mellett a járműveknek más típusú feladatokat (pl. rezsijáratok) is el kell végezniük, amelyek nem utasszállítással kapcsolatosak, ugyanakkor a napi rutin részét képezik. Ilyen például az az eset, amikor munkakezdekor a járműnek el kell hagynia az éjszakai parkolót, vagy vissza kell térnie a nap utolsó járata után a parkolóhelyére. Ehhez hasonló rezsijáratok nappal is előfordulhatnak, pl. hosszabb szünetek esetén. Nagyon fontos, hogy minden menetrend szerinti járatához a felhasználó előre meghatározhatja azokat a telephelyeket, ahonnan a járat kiszolgálható. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy például bizonyos vonalakat adott típusú buszokkal vagy adott helyekről lehet csak kiszolgálni. Ezeket a követelményeket meghatározhatja az állomás helye és a forgalom jellemzői. Ha az első járat érkezési állomása nem azonos a második járat indulási állomásával, akkor figyelembe kell venni az állomások közötti rezsiiidőt. Lehetnek olyan szabályok, amelyek két járat között kötelező technológiai időt is tartalmaznak, amelyeket figyelembe kell venni az összeegyeztethetőség vizsgálatakor.

A javasolt modell irányított gráfon alapszik. A modellt leíró irányított gráf csúcsainak halmazát fel lehet bontani két diszjunkt halmazra úgy, hogy az egyes halmazokba tartozó csúcsok között nincs él, azaz nincsenek a halmazokon belül szomszédos csúcsok.

A vizsgálatom során azokat a gráfrepresentációkat vettem figyelembe, melyek a számítógépes feldolgozásban használhatók. Az első az élek felsorolása, amely egy lista: minden meglévő élre egy-egy bejegyzést tartalmaz.

Huisman [39] az éleket két fő csoportba sorolja, mégpedig rövid és hosszú csoportba.

Élek csoportosítása:

rövid (short) típusú élek: A rövidebb eseményeket, várakozásokat jelentik, amikor a járművezető a járműnél marad.

hosszú (long) típusú élek: Azt az eseményt jelentik, amikor a járművezető leállítja a járművet a parkolóban, és az felügyelet nélkül marad.

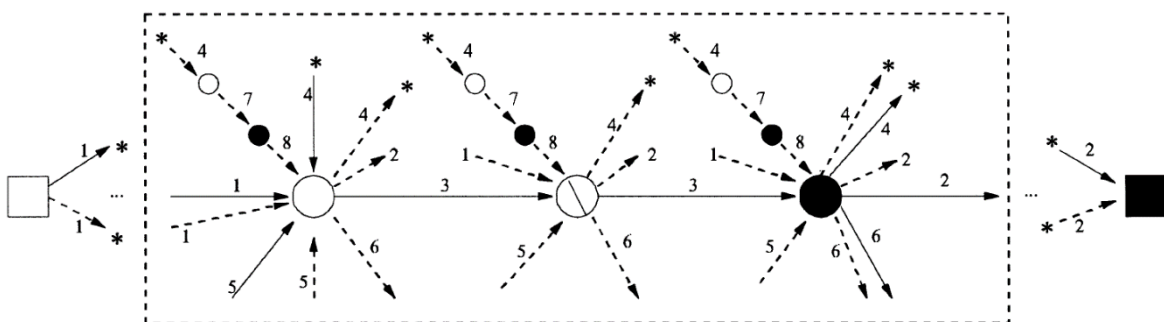
A Huisman által bemutatott gráfot, amelyben csak két éltípus van, a Haase et al. [41] megközelítéséhez hasonló elven kiegészítettem többféle éltípussal, amely jobban figyelembe veszi a gyakorlati sajátosságokat, pl. rövid pihenő, osztott műszak, parkolóhelyi várakozás, stb. A Haase et al. [41] megoldásában használt minta éltípusok a 24. és 25. ábrán láthatók.

A modellben az élek kiegészítésre kerülnek a depó élekkel is:

depó élek: A garázsmeneteket reprezentálják.

Élek felsorolása:

1. *start_of_schedule*: A bejelentkezési eseményt jelöli az első rezsijáratral a menetrend első menetrend szerinti járatának helyére
2. *end_of_schedule*: A menetrend utolsó rezsijáratát mutatja a telephely helyére a kijelentkezési esemény mellett
3. *short_wait*: Rövid várakozást jelent az ütemezett járat teljesítése után, amikor a járművezető a járműnél marad
4. *short_break_endstation*: A járművezető szünetét jelzi a végállomáson egy menetrend szerinti járat befejezése után
5. *short_break_depot*: A járművezető szünete, amelyet telephelyen, vagy tárolóhelyen tölt el egy menetrend szerinti járat befejezése után
6. *short_driverchange_endstation*: A járművezető-csere eseményét jelzi a végállomáson egy menetrend szerinti járat teljesítése után
7. *short_driverchange_depot*: A járművezető-csere eseményét jelöli egy telephelyen a menetrend szerinti járat teljesítése után
8. *long_stop_endstation*: A járműváltást jelöli, miközben a jármű a végállomáson hosszabb ideig parkol
9. *long_stop_depot*: A járműváltást jelöli, miközben a jármű telephelyen, vagy tárolóhelyen hosszabb ideig parkol
10. *long_dividedstop_endstation*: A jármű hosszú parkolását jelenti a végállomáson, miközben a járművezető osztott menetrend szerint dolgozik
11. *long_dividedstop_depot*: A jármű hosszú idejű parkolását jelenti a telephelyen vagy tárolóhelyen, miközben a járművezető osztott ütemben dolgozik

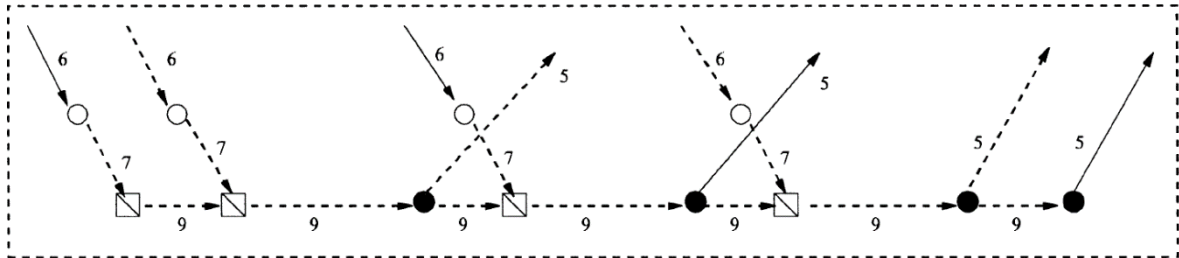


24. ábra. A járatokhoz rendelt minta éltípusok

Forrás: Haase et al. [41] (Figure 1)

A gráf két csúcsát akkor kötjük össze irányított élel, ha az őket reprezentáló járatok kompatibilisek, vagyis az él kiinduló csúcsához tartozó járat után végrehajtható a beérkező csúcs járata.

Az él hossza mindig az eltelt időt jelenti, ez a járművezető nettó munkaideje, amely a végső feladat megfogalmazása során megfelel a célfüggvénynek.



25. ábra. A járatokhoz rendelt minta éltípusok

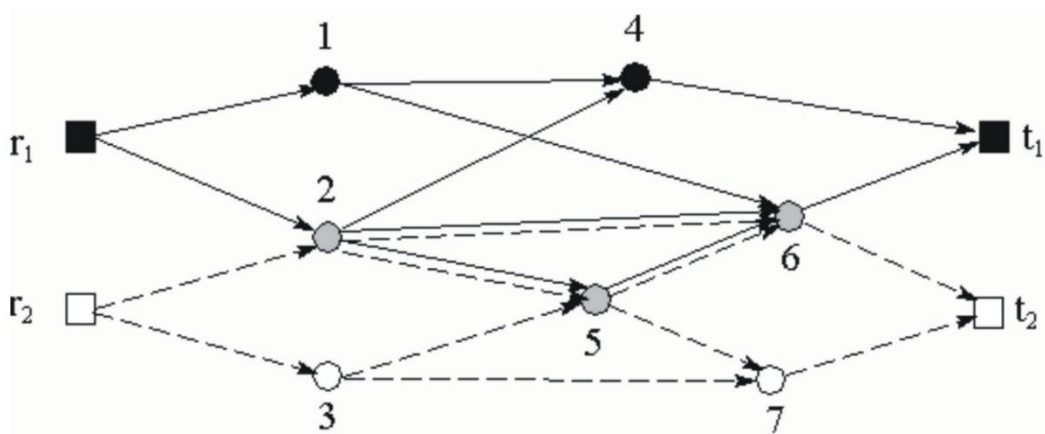
Forrás: Haase et al. [41] (Figure 1)

Csomóponttípusok

A gráf csomópontjait vagy csúcsait az egyes buszjáratok jelentik, amelyekhez hozzáveszünk egy indulási és egy érkezési telephelyet, vagy a szakirodalomban gyakran használt nevén depót.

Az irányított gráf esetünkben egy folyamhálózat, ahol a folyamok a buszközlekedés ütemezésére vonatkoznak. A folyam többtermékes, ami ugyanazt a hálózatot használja, és az áramlásnak különféle korlátozásai lehetnek. A gráf két kitüntetett pontja közötti áramlás modellezése úgy történik, hogy az egyik a termelő rész, vagy forrás, a másik a fogyasztó rész, vagy nyelő.

Egy ilyen gráf leíró struktúrája, amely jobban tükrözi a valós helyzetet a 26. ábrán látható. Az ábrán 2 depó és 7 járat látható, $N_1 = \{1, 2, 4, 5, 6\}$ és $N_2 = \{2, 3, 5, 6, 7\}$. Az egyszerűség kedvéért nem minden él szerepel az ábrán. A példán a d depónak megfelelő r^d és t^d a hálózat termelője és fogyasztója.



26. ábra. Példa a hálózat kialakítására

Forrás: Huisman [39] (Figure 2.1)

A Huisman [39] féle modell alapján a megoldás során a következő csomóponttípusok kerülnek bevezetésre:

- *source_depot*: A „forrás” telephelyeket ábrázoló csomópontok, depot(s)
- *sink_depot*: A „nyelő” telephelyeket ábrázoló csomópontok, depot(t)
- *járat*: A menetrend szerinti járatokat jelentő csomópontok, trip

5.3 Az eljárás főbb lépései

1. Az eljárás első lépésében a megfelelő bemenő adatok, paraméterek figyelembevételével kerül kialakításra az az irányított gráf, amely a későbbiek során a matematikai programozási modell felírásának alapjául szolgál.

A gráf kialakításának első lépése a csomópontok létrehozása az ütemezett járatok, a hely információk és az adott járműtípusok alapján. A gráf csomópontjai közé a felsorolt éleket is fel kell venni, figyelembe véve az ismert paramétereket és a munkaügyi szabályokat is. A csomópontok között különböző típusú párhuzamos élek is lehetnek, amelyeknek értelemszerűen különböző súlyértéke lehet. Például a járművezető a parkolási lehetőségektől és az állomás képességeitől függően szünetet tarthat a végállomáson vagy egy telephelyen. Ezek azonban eltérő munkaidőket jelentenek, ezért a valós helyzetet modellezve előfordulhat, hogy mindkét lehetőséget tartalmaznia kell a gráfnak. Ez azt is jelenti, hogy az adott szituáció figyelembevétele növeli az élek számát. Ugyanakkor ez önmagában nem feltétlenül jelent még problémát az optimalizálási modell méretében; de a lehetséges beosztási keretek száma bizonyos esetekben kritikusan nagy is lehet.

Az irányított gráf kialakításakor figyelemmel kell lenni a tartózkodási időre, ami a technológiai és kiegyenlítő időket foglalja magában, illetve a munkaügyi szabályokra, amelyek a várakozások, vagy a pihenőidők időtartamára vonatkoznak.

2. A második lépésben lehetőség szerint az összes szabályos járművezetői beosztási keret legenerálásra kerül, amelyet a gyakorlatban szolgálati számnak is neveznek. Itt már olyan ellenőrzés történik, ami figyelembe veszi a specifikációban megadott összes szabályt. A generálás az irányított gráf mélységi kereséssel való bejárása segítségével történik. A generálás közben minden csúcspontra ellenőrzést kell végezni, és ha a már kialakított részforda nem felel meg valamilyen szabálynak, akkor ezt az ágat levágjuk a keresési fából. Amikor a generálás elér egy kész járművezetői beosztás kerethez, akkor lefut egy végső ellenőrzés, ami csak akkor fogadja el a fordát, ha azt szabályosnak találja. Az így generált fordákat az eljárás eltárolja. Abban az esetben, ha túl sok fordá keletkezne, paraméterek segítségével a járművezetői beosztási keretek száma csökkenthető szűkítő feltételek meghatározásával, pl. csak a 7 és 9 óra közötti munkaidejű fordák generálása történik, stb.

Az alkalmazott módszer harmadik lépésében kerül felépítésre a matematikai programozási modell, ami a Huisman [39] által részletesen leírt VCSP modell adaptált változata. Az optimalizálásnál a cél a teljes munkaidő minimalizálása, illetve az, hogy a járművezetők között minél egyenletesebb legyen a munkaidő beosztása. A modell tartalmazza az üzemanyag fogyasztás, illetve a parkolóhelyi foglaltságok ellenőrzését is, sőt kezeli a különböző járműtípusokat és telephelyeket, illetve a tárolótereket.

Járatösszevonáskor legenerálásra kerül egy alap gráf, majd bizonyos feltételek teljesülésekor két szomszédos csúcs összevonásra kerül. Ahol először teljesül a technológiai és kiegyenlítő idő, azokat a csúcsokat tekintjük szomszédosnak. Ezzel az eljárással csökkenthető a gráf csúcseinak száma, ebből következően csökken a gráf mérete, és így kevesebb szolgálati szám generálódik.

3. A matematikai programozási modell megoldása során gyakorlati szempontból fontos, hogy lehetőség legyen időkorlát beállítására, pl. maximum mennyi ideig futhat a megoldó.

5.4 A matematikai modell formális leírása

A feladat matematikai megfogalmazásához az előfeltételeket az előző pontokban részleteztem. Az integrált jármű- és járművezető ütemezési VCSP modell a Huisman doktori disszertációja [39], 4. fejezetében részletesen leírtaknak megfelelő. A matematikai modell formálisan a [39] 4.2 fejezetében van kifejtve. A matematikai modellben két újszerűséget vezettem be. Az egyik arra vonatkozik, hogy az üzemanyag fogyasztást milyen feltételekkel kezeljük ((3) és (4) feltételek), a másik pedig a parkolási korlátok figyelembe vétele ((10) feltétel).

A modellt leíró gráf $G = (N, A)$, Huisman [39], Haase et al. [41]

Az ütemezett járatok halmazát $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ jelöli. Legyen D a depók (telephelyek) halmaza, $D_u \subseteq D$ pedig az u járat depóhalmaza: ide tartoznak azok a depók, amelyekből az u kiszolgálható. Figyelembe kell venni ebben az esetben a fizikai telephelyek és járműtípusok kombinációját.

Jelölje $U_d \subseteq U$ azon járatok halmazát, amelyeket a d telephelyről lehet kiszolgálni. Minden $d \in D$ -hez két csomópont tartozik $dt(d)$ és $at(d)$. Ez azt jelenti, hogy egy jármű a d telephelyről indul és oda tér vissza.

Ezután az N halmazt a következőképpen határozzuk meg:

$$N = \{u \in U\} \cup \{dt(d) | d \in D\} \cup \{at(d) | d \in D\}.$$

A hálózat éleinek megadásához, azaz a figyelembe vehető kompatibilis járatok megadásához a következő jelöléseket vezetjük be:

$$B_d = \{(u, u') | u, u' \in U_d \text{ kompatibilis járatok}\}, \forall d \in D.$$

A d telephelyről kiszolgálható járatok, továbbá a telephelyre visszaérkező járatok tekintetében az első és utolsó rezsijárata a telephelyről vagy a telephelyre a következő formulával írható le:

$$R_d = \{(dt(d), u), (u, at(d)) | u \in U_d\}, \forall d \in D.$$

A fentiek alapján meghatározható élhalmaz amely a hálózat d telephelyéhez tartozik:

$$A_d = B_d \cup R_d, \forall d \in D,$$

A gráf összes élének halmaza értelemszerűen az összes telephelyhez tartozó élhalmaz uniója, azaz:

$$A = \bigcup_{d \in D} A_d.$$

Ehhez meg kell határozni egy x egész értékű vektort, amely többtermékes folyamannak is tekinthető. A vektor dimenziója megegyezik a hálózat éleinek számával. Ha az e él a d depóhoz tartozik ($e \in A_d$), akkor az $e \in E$ élnek megfelelő vektor komponensét x_e^d jelöli. Az x_e^d értéke 1 lesz, ha az adott él szerepel az ütemezésben, egyéb esetben 0. Az első feltétel azt biztosítja, hogy minden menetrend szerinti járatot pontosan egyszer ütemezzünk.

Forrás: Huisman [39] dolgozata, 81. oldal, (4.2)

$$\sum_{d \in D, e \in u_d^+} x_e^d = 1, \quad \forall u \in U. \quad (1)$$

Az egyenletben u_d^+ az u csúcs azon kimenő éleinek halmazát jelöli, amelyek A_d -hez tartoznak.

A (2) formulában azt fejezzük ki, hogy az összes jármű visszatérjen a telephelyre az ütemezési időszak végére. Más szóval, ha egy adott telephelyhez tartozó jármű a végállomásra érkezik, akkor azt el is kell hagynia.

Forrás: Huisman [39] dolgozata, 81. oldal, (4.4)

$$\sum_{e \in u_d^+} x_e^d - \sum_{e \in u_d^-} x_e^d = 0, \quad \forall u \in U_d, \forall d \in D, \quad (2)$$

Az egyenletben u_d^- az u csúcs azon bejövő éleinek halmazát jelöli, amelyek A_d -hez tartoznak.

Az üzemanyag-feltételek meghatározásakor figyelembe kell venni az egyetlen tankolással megtehető távolságot (a gyakorlatban ez km-ben kerül meghatározásra). Ehhez összegezni kell a járművek által megtett távolságot, majd korlátozni kell a paraméterekben megadott értékekkel. Ehhez először új változókat kell hozzárendelni az N minden csúcsához az $\{at(d)|d \in D\}$ halmaz kivételével. Ezt a vektort t -vel jelöljük; a v csúcsához tartozó t komponens pedig t_v -vel jelöljük. Az egyenlőtlenség, amely kiszámítja a viszonylat távolságát egy adott csomópontig, a következőképpen adható meg:

$$t_{v'} \geq x_e^d (t_v + \delta_e), \quad \forall v \in N \setminus \{at(d)|d \in D\}, \forall e \in v^+,$$

ahol δ_e az e él által jelzett távolság, v' az érkezési csúcsa, és v^+ a v csúcs összes kimenő élének a halmaza. Tekintettel arra, hogy ezek a korlátozások nemlineárisak, célszerű őket átalakítani a következő lineáris formára:

$$t_{v'} \geq t_v + \delta_e - (1 - x_e^d)L, \quad \forall v \in N \setminus \{at(d)|d \in D\}, \forall e \in v^+, \quad (3)$$

ahol az L a lehető leghosszabb távolságnál nagyobb konstans.

A futási teljesítmények figyelembevételéhez további korlátozásra is szükség van, azaz annak ellenőrzéséhez, hogy a jármű futási távolsága a lehető legnagyobb érték alatt marad-e, alkalmazzuk a (4) formulát.

$$t_{v'} + \delta_e + x_e^d L \leq r_d + L \quad \forall v \in \{at(d)|d \in D\}, \forall e \in v^-, \quad (4)$$

A (4) egyenletben L a fentieknek megfelelően a lehető leghosszabb távolságnál nagyobb állandó, δ_e az e él által jelzett távolság, aminek indulási csúcsa v' , a d depó járműveire vonatkozó maximális lehetséges futási távolság az r_d , és v^- a v csúcs összes bejövő élének halmaza.

A következő (5) korlátozás biztosítja, hogy a telephelyek kapacitása ne sérüljön.

$$\sum_{e \in at(d)^-} x_e^d \leq k_d, \quad \forall d \in D, \quad (5)$$

Az (5) egyenletben k_d a d telephelyen rendelkezésre álló járművek száma.

A következőkben bemutatásra kerülnek a járművezető beosztásának a feltételei. A 2. fázisban generált érvényes járművezetői beosztási keretet az S_d jelöli. A beosztási keretekhez a módszer először hozzárendel egy y változóvektort, ahol az $y_s^d = 1$, ha $s \in S_d$ szerepel a megoldásban, különben $y_s^d = 0$. $S_d(u) \subseteq S_d$ azoknak a szolgálati számoknak a halmazát jelöli, amelyek tartalmazzák az $u \in U_d$ csúcsot. Hasonlóképpen $S_d(e) \subseteq S_d$ jelöli azoknak a járművezetői beosztási kereteknek a halmazát, amelyek tartalmazzák az $e \in A_d$ élet. A járműütemezési részhez hasonlóan a (6) formula biztosítja, hogy minden járat pontosan egy járművezető műszakjában szerepeljen.

Forrás: Huismann [39] dolgozata, 81. oldal, (4.5)

$$\sum_{s \in S_d(u)} y_s^d - \sum_{e \in u_d^+} x_e^d = 0, \quad \forall u \in U_d, \forall d \in D. \quad (6)$$

A mindennapi munka során a járművezetőnek meg kell jelennie a járműnél. Ez úgy modellezhető, hogy bizonyos éltípusokra mind a jármű, mind a járművezető menetrendje ki kell, hogy terjedjen, míg más éltípusokra csak a jármű menetrendje vonatkozik.

A_q^d jelöli a short_wait, short_break_endstation, short_break_depot, long_dividedstop_endstation és long_dividedstop_depot típusú élek halmazát.

Az A_q^d éleket mind a jármű, mind a járművezető menetrendjének le kell fednie. Ezt a következő (7) egyenlet fejezheti ki:

Forrás: Huismann [39] dolgozata, 81. oldal, (4.6)

$$\sum_{s \in S_d(e)} y_s^d - x_e^d = 0, \quad \forall e \in A_q^d, \forall d \in D. \quad (7)$$

Ha a járműváltással történő rövid szünetek megengedettek, akkor a rövid szünet típusú e élekre ezek a feltételek $0 \leq \sum_{s \in S_d(e)} y_s^d - x_e^d \leq 1$ értékre állíthatók. Hasonló kapcsolatok hozhatók létre a telephelyekről a depóba érkező, vagy onnan induló rezsijáratok és az azokat tartalmazó szolgálati számok között is. Ennek megfelelően felírhatók a (8) és (9) egyenletek.

$$0 \leq \sum_{s \in S_d(e)} y_s^d - x_e^d \leq 1, \quad \forall e \in dt(d)^+, \forall d \in D, \quad (8)$$

$$0 \leq \sum_{s \in S_d(e)} y_s^d - x_e^d \leq 1, \quad \forall e \in at(d)^-, \forall d \in D. \quad (9)$$

Legyenek T_1, \dots, T_m azok a lehetséges időintervallumok, amelyeknél a parkolási kapacitást ellenőrizni kell. Jelölje továbbá P azon járművek által használható állomások és parkolóhelyek halmazát, valamint $A_l^d(T)$ azon A_d élek halmazát, amelyek lefedik a T időintervallumot az l helyen. Jelölje a d telephely járművei l helyének parkolási kapacitását a T időintervallumban $c_l^d(T)$ -vel. A parkolási korlátok a következőképpen fejezhetők ki:

$$\sum_{e \in A_l^d(T)} x_e^d \leq c_l^d(T), \quad T = T_1, \dots, T_m, \forall l \in P, \forall d \in D. \quad (10)$$

Az átlagos munkaidőre vonatkozó korlátozások a következőképpen adhatók meg

$$\sum_{d \in D} \sum_{s \in S_d} (w_s^d - w_{max}) y_s^d \leq 0, \quad (11)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{s \in S_d} (w_s^d - w_{min}) y_s^d \geq 0, \quad (12)$$

A fenti formulákban w_s^d az $s \in S_d$ ütemezés nettó munkaideje, és w_{max} és w_{min} a megadott maximális és minimális átlagos nettó munkaidő.

Tegyük fel továbbá a következőket:

$$x_e^d, y_s^d \in \{0,1\}, t_i \geq 0, \quad \forall e \in A_d, \forall s \in S_d, \forall d \in D, \forall i \in N \setminus \{at(d) | d \in D\}. \quad (13)$$

A minimalizálandó kifejezés a célfüggvény. A lehetséges megoldások halmazán a célfüggvényen felvett minimális értéket optimumnak nevezzük, míg azon lehetséges megoldásokat, melyek a célfüggvénybe helyettesítve az optimumot szolgáltatják, optimális megoldásoknak hívjuk.

A korábban említetteknek megfelelően az optimalizálásnál a cél a teljes munkaidő minimalizálása, azaz ennek megfelelően célfüggvény a következő:

$$\text{minimize} \quad \sum_{d \in D} \sum_{s \in S_d} w_s^d y_s^d$$

5.5 Számítási eredmények

A számítási eredmények az 1. sz. mellékletben található.

A BKV gyakorlatában előforduló példák közül a 3.3. fejezetben bemutatott kézzel készült menetrendekre az alábbiakban bemutatom a fenti modell szerinti számítási eredményeket.

Az LP feladat változóinak csak egy része esetén áll fenn az egészértékűségre vonatkozó megkötés, ezért ebben az esetben vegyes egészértékű programozási feladatról (MILP – Mixed Integer Linear Programming) beszélünk. Az eredmények IBM ILOG CPLEX Optimization Studio-val kerültek meghatározásra.

Az elemzéshez használt virtuális architektúra:

CPU: 2 core, 2 GHz, AMD EPYC 7501
RAM: 48GB
DISK: 100 GB,(OS benne van)
OS: SuSe Linux Enterprise Server 15

Paraméterek

A 3. fejezetben bemutatásra került a menetrendkészítés folyamata. A számításához szükségesek a bemenő paraméterek, amelyeket a módszer használata során figyelembe kellett venni, és az egyes feltételekben jelennek meg, mint konkrét vagy azokból számolt értékek:

- Minimális munkaidő és maximális munkaidő hossza percben: a foglalkoztatási szabályokban szereplő minimális és maximális munkaidő
- Átlagos nettó munkaidő minimuma (w_{min}) és maximuma (w_{max}) percben: a foglalkoztatási szabályok betartásával biztosított megoldás esetén
- Szünetek maximális és minimális hossza percben: a foglalkoztatási szabályok betartásával biztosított megoldás esetén
- Maximális végállomási várakozás: Ez a paraméter kritikus a megoldás keresési terének leszűkítése érdekében. A paraméterlapon szereplő tartózkodási idő (nagyobb, mint a technológiai és kiegyenlítő idő maximum)
- Minimális és maximális idő járművezető váltásnál: Ez a paraméter kezeli azt, hogy csak olyan végállomási tartózkodásba fog beilleszteni váltást, ahol ezek teljesülnek. A minimum értéket a szerkesztői gyakorlat alapján nem célszerű 5 perc alá vinni. A maximumot pedig nem érdemes 25 perc fölé vinni, mert ebben az esetben a megoldás tartalmazhat ún. hideg váltást a végállomáson. A váltás mindig indulási időhöz van igazítva
- Legkésőbbi telephelyről való kiállás: Ennél később nem fog jármű kezdeni
- Legkésőbbi telephelyre beállás: Ennél korábban nem fog jármű végezni az adott napra
- Osztott pihenő idő legkorábbi kezdete: Ennél korábban, nem fog osztott szolgálat első részre végezni

Számítási lépések

A paraméterek alapján, első lépésben a gráf kerül legenerálásra. Majd ezt követően történik a gráfbejárás, ahol az összes lehetséges szolgálat elkészül. Miután megvannak a szolgálati számok (járművezetői beosztási keretek), a hozzájuk tartozó feltételekkel, a MILP legenerálásra kerül. Ezek közül a legfontosabb, hogy a megoldásnak le kell fednie az összes járatot. A solver a generált szolgálatokból annyi darabot ad vissza megoldásként, amennyi a feltételeknek és a célfüggvénynek a legjobban megfelel.

Az 3. táblázat bemutatja a két vizsgált eset legfontosabb jellemzőit, a járatok számát, a járművek számát, a járműtípusokat és a telephelyeket. A menetrend száma a 3.3 fejezetben tárgyalt eseteket mutatja be.

A megoldhatóságot, illetve a futási időt alapvetően a feladat jellege határozza meg, éppen ezért több tényező befolyásolja, ilyen például a járatok száma és hosszúsága, a telephelyek száma, a járműtípusok száma, a végállomási, illetve tárolótéri kapacitások és a járművek üzemanyag kapacitása.

Busz viszonylat száma	Járatok száma (u)	Járművek száma (k)	Járműtípusok száma	Telephelyek száma (d)
118	99	3	1	1
26	177	6	1	1

3. táblázat. A vizsgált esetek legfontosabb jellemzői

A modellben a számítási bonyolultságra jelentős hatással van a sorok és oszlopok száma. A sorok számát a gráf csúcsainak és éleinek száma befolyásolja. Az oszlopok számának nagyságrendjét a helyes szolgálati számok (járművezetői beosztási keretek) határozzák meg. Ennek megfelelően alakul a futási idő hossza is. A futási időt növeli, ha a telephelyek és a járatok számát növeljük.

A 4. táblázat bemutatja a feladatokhoz felírt irányított gráfok méretét, a gráfokhoz generált MILP matematikai programozási modell változóinak a darabszámát, a futási időt, és az érvényes szolgálati számokat, azaz a járművezetői beosztási kereteket.

Busz viszonylat száma	Csúcsok száma	Élek száma	Oszlopok	Sorok	Futási idő (sec)	Járművezetői beosztási keret
118	99	1604	48701	3978	542	46947
26	177	3763	32075	9869	1678	27973

4. táblázat. A számítási eredmények legfontosabb jellemzői

A két konkrét esetenél látszik, hogy a változók száma több tízezres nagyságrendű. Egy Budapest nagyságrendű városban vannak olyan viszonylatok, amelyekhez tartozó matematikai programozási modell változószáma jóval meghaladhatja az egymilliót és a korlátozási feltételek száma is több mint fél millió lehet. Ez nehézséget jelent a gyakorlati hasznosítás során.

Eredmények a 118-as busz viszonylatra

A megoldás részleteit az 5. táblázat foglalja össze.

Szolgálat	Kezdés	Végzés	Szolgálat hossza
1	3:42	12:30	8:48
2	4:42	17:31	8:30
3	6:02	14:41	8:39
4	12:31	21:03	8:32
5	14:58	23:18	8:20
Átlag (óra, perc)			8:33
Összes szolgálat hossza (óra, perc)			42:49
Tartózkodási idő (óra, perc)			10:10
Jármű üzemóra (óra, perc)			38:59

5. táblázat. A megoldás részletei

Algoritmikusan a feladat 2 perc alatt került megoldásra. Ebben az esetben a járművezetők teljes várakozási ideje - amikor a járművezetők semmilyen hasznos tevékenységet nem végeznek, és nem is pihennek - 10 óra 10 perc; tehát minden járművezetőnek átlagosan 2 óra 2 perce van nem kívánt várakozási idővel. Ez jobb megoldás, mint a 3.3 fejezetben bemutatott jelenleg alkalmazott menetrendkészítés.

Az is jól látszik az adatokból, hogy az algoritmikus megoldás ugyanannyi járművezetővel tudja megoldani a feladatot, mint a kézi megoldás esetében, viszont kevesebb munkaórával tudta elvégezni.

Eredmények a 26-os busz viszonylatra

A megoldás részleteit a 6. táblázat foglalja össze.

Szolgálat	Kezdés	Végzés	Szolgálat hossza
1	4:15	11:53	7:38
2	4:35	12:06	7:31
3	5:50	19:08	8:04
4	5:56	14:53	8:57
5	6:04	17:12	9:01
6	7:30	17:52	8:07
7	12:01	21:20	9:19
8	11:58	20:22	8:24
9	15:22	23:35	8:13
10	17:07	23:44	6:37
11	17:47	23:24	5:37
Átlag (óra, perc)			7:57
Összes szolgálat hossza (óra, perc)			87:28
Tartózkodási idő (óra, perc)			17:24
Jármű üzemóra (óra, perc)			79:48

6. táblázat. A megoldás részletei

Algoritmikusan a feladat 28 perc alatt került megoldásra. Ebben az esetben a járművezetők teljes várakozási ideje - amikor a járművezetők semmilyen hasznos tevékenységet nem végeznek, és nem is pihennek - 17 óra 24 perc; tehát minden járművezetőnek átlagosan 1 óra 34 perce van nem kívánt várakozási idővel. Ez jobb megoldás, mint a 3.3 fejezetben bemutatott jelenleg alkalmazott menetrendkészítés.

Az is jól látszik az adatokból, hogy az algoritmikus megoldás ugyanannyi járművezetővel tudja megoldani a feladatot, mint a kézi megoldás esetében, viszont kevesebb munkaórával tudta ezt elvégezni, körülbelül hatodannyi idő alatt.

5.6 Konklúzió

A feladat megoldásához gyakorlati megfontolások alapján a kitűzött cél elérése érdekében a Huisman által kidolgozott és a szakirodalomban publikált klasszikus VCSP módszert adaptáltam és alkalmaztam a megfogalmazott városi buszközlekedési feladat vizsgálatához.

Az adaptált módszer előnye, hogy új feltételeket is figyelembe vesz - ami az üzemanyagfogyasztás és a parkolási korlátok kezelését jelenti -, ezáltal jobban megfelel a gyakorlati elvárásoknak.

Az eredeti VCSP módszer szerint a járművezetői beosztási keret generálása úgy történik, hogy egyszerűen csak összeilleszti a munkaszakaszokat, míg az általam kidolgozott módszer képes a szabályok, paraméterek kezelésére is. A gráf felépítésénél bővítettem az éltípusokat (2-ről 11-re), így a gyakorlati sajátosságokat jobban figyelembe lehet venni.

A jelen fejezetben kidolgozott módszer valós példákon alapuló számítási eredményeit összevettem a 3. fejezetben tárgyalt kézzel készített menetrendkészítéssel, és az alábbi következtetésekre jutottam:

- Összes tartózkodási idő: A munkaórához viszonyítva a tartózkodási idő jelentősebb arányban csökkent. A módszernek köszönhetően több mint 10% csökkentést sikerült elérni.
- Járművezetői összes szolgálat hossza: Sikerült csökkenteni az összes munkaidőt, köszönhetően az a tartózkodási idők csökkenésének.
- Jármű üzemóra: Az eredmények alapján sikerült hatékonyabbá tenni a járművek üzemi idejét.
- Egy menetrend költsége a járműüzemóra, az összes munkaóra mindegyike csökkent az eljárás alkalmazásával.
- Mindezeket úgy sikerült elérni, hogy közben a foglalkoztatás hatékonyságára jellemző mutató nem, vagy nem számottevően csökkent.
- A menetrend elkészítési idő a töredéke a manuális módszerhez képest.

A fentiek alapján igazoltam, hogy a módszer alkalmas az erőforrások hatékonyabb felhasználására a rendelkezésre álló mennyiségi és minőségi paraméterek figyelembevételével.

Vizsgálattal rámutattam, hogy a MILP modellel generált magas változós szám miatt egy Budapest nagyságrendű városra történő ipari alkalmazása komoly számítási kapacitási kérdéseket vet fel.

A további kutatásom során a modell változós számainak és korlátozási feltételeinek jelentős méretű csökkenését tűztem ki célul és azt feltételezem, hogy az eddig alkalmazott módszerektől eltérő, újszerű megközelítésű megoldással további válaszokat kapok a feltételezéseimre.

Ezért a menetrend megvalósítási feladatokra irányuló további vizsgálódásaimat a P-gráf módszertan adaptációjára alapozott menetrend modellezés és optimalizálás felé fordítom.

5.7 2. tézis

A Huisman és munkatársai által kidolgozott és publikált, klasszikus VCSP modellt kiterjesztettem az üzemanyag fogyasztás és a parkolási korlátozások kezelésére, szem előtt tartva az integrált megközelítést és a gyakorlati alkalmazhatóságot, nevezetesen a BKV specifikus elvárásokat és adottságokat.

Bevezettem egy úgynevezett járatösszevonási eljárást, amely a feladat méretének a csökkenését eredményezte.

Esettanulmányban meghatároztam a szolgálati számokat és megállapítottam, hogy a menetrend költségelemei, a járműüzemóra, az összes munkaóra mindegyike csökkent. A módszernek köszönhetően

az eddigi gyakorlati működéshez képest több mint 10% csökkentést sikerült elérni a tartózkodási idő tekintetében, és ezzel együtt sikerült hatékonyabbá tenni a járművek üzemidejét is.

Igazoltam, hogy a módszer alkalmas a hatékony erőforrás-gazdálkodás tervezésére a rendelkezésre álló mennyiségi és minőségi paraméterek figyelembevételével.

- A gyakorlati menetrend megvalósítás folyamatainak ismeretében kidolgoztam ennek az elméleti módszernek az alkalmazásba vételének lépéseit.
- Meghatároztam a kombinált jármű- és személyzet ütemezés optimalizáló modell legfontosabb elemeit, a modellt leíró gráf jellemzőit, amelyen a matematikai programozási modell alapul.
- Definiáltam az eljárás főbb lépéseit.
- Meghatároztam az előfeltételeket, bemenő paramétereket, kiemelt figyelemmel a tartózkodási időre, illetve a munkaügyi szabályokra.
- Felépítettem a matematikai programozási modellt, ami a Huisman által részletesen leírt VCSP modell adaptált változata.
- Az algoritmust kiterjesztettem egyrészt az üzemanyag fogyasztás, másrészt a parkolási korlátozások kezelésére.
- A feladat méretének a csökkentése érdekében járatösszevonási technikát dolgoztam ki.
- Elvégeztem a matematikai modell formális leírását.
- A BKV gyakorlatában előforduló példák közül konkrét eseteken keresztül bemutattam a számítási eredményeket.

Kapcsolódó publikációk

1.

Albert, Nagy ; József, Tick

Tasks of operative planning for transport management systems

In: Szakál, Anikó (szerk.) 2019 IEEE 17TH WORLD SYMPOSIUM ON APPLIED MACHINE INTELLIGENCE AND INFORMATICS (SAMI 2019)

Herlany, Szlovákia : IEEE (2019) pp. 199-204. , 5 p.

Tudományos

2.

Békési, József ; Nagy, Albert

Combined Vehicle and Driver Scheduling with Fuel Consumption and Parking Constraints: a Case Study

ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 17 : 7 pp. 45-65. , 21 p. (2020)

DOI WoS Egyéb URL

Folyóiratcikk/Szakcikk (Folyóiratcikk)/Tudományos[31649321] [Egyeztetett]

3.

Albert, Nagy ; József, Tick

Modeling of bus transport operative planning tasks

In: Szakál, A (szerk.) IEEE 18th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI 2020)

Piscataway (NJ), Amerikai Egyesült Államok : IEEE (2020) pp. 89-94. , 6 p.

DOI Egyéb URL

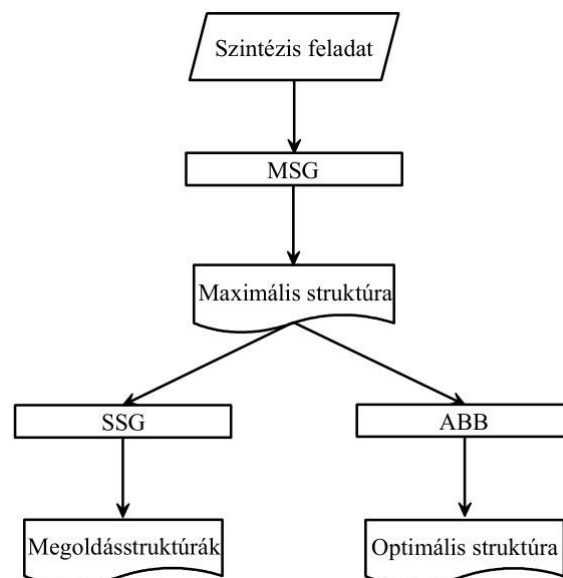
Tudományos

6 P-gráf módszertan adaptációja a menetrend megvalósítási feladatokra

A P-gráf módszertanra alapozott menetrend modellezés, megvalósítás (jármű és járművezető ütemezés) valamint optimalizálás számos ponton eltér az eddig alkalmazott módszerektől. A korábbi módszertanok esetében a feladat megoldására egyetlen nagyméretű MILP kerül felírásra, és annak egyetlen – a megadott célfüggvény szerinti optimális – megoldását határozzák meg, míg a többi lehetséges megoldás rejtve marad, nem kerül meghatározásra. Pedig ha ismernénk pl. az legjobb tíz megoldást, akkor lehetőségünk lenne más, esetleg nem metrizálható szempontok szerint is választani közülük. Lehetőség lenne néhány ismert megoldást más-más célfüggvény szerint is kiértékelni, azaz másodlagos szempontokat is figyelembe venni. Nincs lehetőségünk több lépésben, több kisebb méretű MILP matematikai modell megoldásán keresztül eljutni az optimális megoldáshoz, pedig e menetrend optimalizálási feladatok megoldásának az a jelenlegi legnagyobb problémája, hogy óriási méretűek és így hatalmas az erőforrásigényük mind számítási kapacitás, mind memóriaméret és futási idő tekintetében. A korábbi módszerek rendszerint a MILP algoritmikus felírásához egy gráf modellt használnak, amit viszont kézzel kell elkészíteni, nem ismert ennek a megoldási lépésnek az algoritmizálása. Ezzel szemben, ha a P-gráf módszertan alkalmazásával oldjuk meg az ilyen jellegű feladatokat, akkor mindezekre lehetőségünk lesz.

6.1 A P-gráf módszertan alapjai

A Friedler Ferenc és L.T. Fan professzorok vezetésével kidolgozott P-gráf módszertan [45] a feladat megfogalmazására ad egy zárt formalizmust, lásd 27. ábra (1. lépés). Amennyiben eszerint fogalmazzuk meg a feladatunkat, akkor a gráf létrehozása algoritmizálható, sőt az eredeti módszertan megadja az MSG (Maximal Structure Generation) algoritmust, amely ezt a megoldási lépést végzi el (2. lépés). Eredményként kapjuk a feladat maximális struktúráját, amely egyrészt megfelel a módszertan szerint megkövetelt szabályoknak, másrészt bizonyítottan tartalmazza az összes strukturálisan lehetséges megoldást.



27. ábra. A P-gráf módszertan alkalmazásának főbb lépései
(Forrás: Veszprémi P-gráf módszertan kutató csoport belső tanulmánya)

A módszertant (lásd P-Graph Studio: <http://p-graph.org/>) követve (3. lépés) rendelkezésünkre áll az SSG (Solution Structures Generation) algoritmus, amely felsorolja az összes lehetséges megoldását. A strukturálisan lehetséges megoldások számából látható, hogy milyen hatalmas a keresési tér. A következő lépésben (4. lépés) a rendelkezésünkre álló maximális struktúra, azaz egy irányított páros gráfcsúcs és -él objektumaihoz a feladatnak megfelelő attribútumokat rendelünk. Ezek után (5. lépés) az egyes megoldás struktúrához lehetőségünk van algoritmikusan generálni a MILP matematikai programozási modellt, majd ezt megoldva értékelhetjük a kapott megoldást.

Az eredeti módszeren belül rendelkezésre áll még egy kidolgozott kereteljárás, az ABB (Accelerated Branch and Bound) algoritmus, amely egy hatékony adekvát technika az ilyen jellegű gráfokon történő optimalizációs feladatokhoz. A gyorsítás annak köszönhető, hogy a gráfbejárás során kihasználhatjuk a feladat strukturális szabályait.

Mint látható, a korábbi megoldási módszerek esetében felsorolt hiányosságok mindegyikét ki tudjuk küszöbölni, ha a menetrend optimális megvalósítási feladatunkat a P-gráf módszertan alkalmazásával oldjuk meg. Az adott feladatosztályra való adaptáció annyit tesz, hogy minden lépésben figyelembe vesszük a specialitásokat. Számos alkalmazási területre létezik már bizonyítottan sikeres adaptáció. A teljesség igénye nélkül felsorolok néhány területet, amelyekre már elvégezték az adaptációt: vegyipari, összeszerelés jellegű, malomipari, sütőipari, reakció-szintézis, üzleti és járműütemezési feladatokra.

Az eredeti módszertan [45] fogalmi rendszerét és elnevezéseit használtam a továbbiakban, néhol utalva az adaptációs lehetőségekre, viszont a leírás formalizmusát néhány esetben megváltoztattam az egyszerűség és olvashatóság miatt, hiszen a disszertációnak nem célja ennek részletes taglalása.

Alapfogalmak

Gyártási, termelési rendszerekről, folyamatokról lévén szó, alapvető fogalmak az „anyag” és a „műveleti egység”, míg az anyagok a gyártás tárgyait azonosítják, addig a műveleti egységek a gyártás során a gyártási technológia által előírt lépéseket, átalakításokat, megmunkálásokat azonosítják. Általánosabban az anyagok az adott gyártási, termelési, üzleti stb. folyamatok tárgyát vagy állapotát azonosítják, míg a műveleti egységek a megmunkálást, átalakítást, megváltozást jelölik. Tehát egy adott feladat alapstruktúrájának választhatjuk azt az (M, O) halmazpárost ahol az M halmaz az anyagokat az O halmaz a műveleti egységeket tartalmazza. Az anyagok azonosítására használjuk az ABC nagybetűit, a műveleti egységek azonosítására egy (α, β) halmazpárost alkalmazunk, melynek első halmaza az adott műveleti egység input anyagjait, míg a második halmaz az output anyagjait tartalmazza.

$$M := \{A, B, C, D, E, F\}$$

$$O := \{(\{B\}, \{A, E\}), (\{C\}, \{A, J\}), (\{D, E\}, \{B\}), (\{H\}, \{E\})\}$$

$$O_1 = (\{B\}, \{A, E\}) \quad O_2 = (\{C\}, \{A, J\}) \quad O_3 = (\{D, E\}, \{B\}) \quad O_4 = (\{H\}, \{E\})$$

$$O := \{O_1, O_2, O_3, O_4\}$$

Az anyagokat tovább bonthatjuk a gyártási folyamatban elfoglalt helyük szerint, nevezetesen vannak nyersanyagok, végtermékek és köztes anyagok, vagy másként félkésztermékek, ezek halmazait rendre R, P, I -vel jelöljük és rájuk a következő összefüggések teljesülnek:

$$R \subseteq M, P \subseteq M, I \subseteq M, \text{ ahol } R \cup P \cup I = M \text{ és páronként diszjunktak}$$

Ezek után kijelentjük, hogy legyen a

$$(P, R, O)$$

halmazhármast egy gyártási, termelési feladat formális leírása.

Fogalmazzunk meg egy konkrét feladatot:

$$M := \{A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K\}, P := \{A\}, R := \{D, F, H, I\},$$

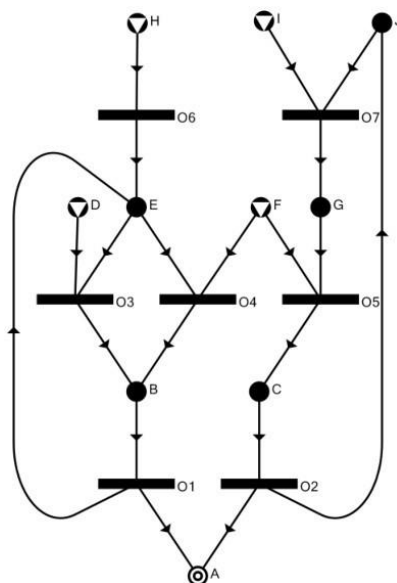
$$O := \{(\{B\}, \{A, E\}), (\{C\}, \{A, J\}), (\{D, E\}, \{B\}), (\{E, F\}, \{B\}), (\{F, G\}, \{C, K\}), (\{H\}, \{E\}), (\{I, J\}, \{G\})\}$$

$$\text{vagy másként } O = \{O_1, O_2, O_3, O_4, O_5, O_6, O_7\}$$

P-gráf

Annak érdekében, hogy a modellezni kívánt és a (P, R, O) halmazhármassal megadott gyártási folyamat kombinatorikus tulajdonságait ki tudjuk használni, szükséges egy egyértelmű strukturális reprezentációt bevezetni, ami - mint később látni fogjuk - nagyon szemléletes és könnyű kezelni. Az anyagok és a műveleti egységek közötti kapcsolatok (relációk) láttán ajánlkozik, hogy reprezentációnak az irányított párosgráfot kell választani. Mivel ez egy bizonyos szabályokat betartó folyamatot ábrázol, ezért lett a neve P-gráf (Process-graph, P-graph). Egy gráf akkor páros, ha a csúcsalmaza particionálható két diszjunkt halmazra úgy, hogy az azonos halmazban lévő csúcsok között nem megy él.

Ezek után legyen $G(A, B, E)$ páros gráf az adott gyártási folyamat P-gráfja úgy, hogy az $A=M$ azaz az anyagok halmaza továbbá $B=O$, azaz a műveleti egységek halmaza míg végül legyen $E = A_1 \cup A_2$ irányított élek halmaza, ahol $A_1 = \{(x, y) | y = (\alpha, \beta) \in o \text{ és } x \in \alpha\}$, $A_2 = \{(y, x) | y = (\alpha, \beta) \in o \text{ és } x \in \alpha\}$.



28. ábra. A megadott hálózatszintézis-feladathoz tartozó P-gráf
(Forrás: [46], Fig. 1.)

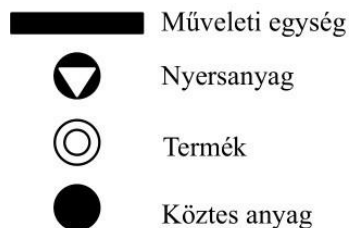
A fenti formális definícióban x jelöli az anyag típusú csúcsokat, y a műveleti egység típusú csúcsokat, α jelöli azon anyag típusú csúcsok halmazát, amelyekből mutat irányított él valamely műveleti egység típusú csúcsba, β pedig azon anyag típusú csúcsok halmazát, amelyekbe mutat irányított él a valamely műveleti egység típusú csúcsokból. Más szavakkal mondva, az A_1 élhalmaz minden eleme anyag típusú csúcsokból műveleti egység típusú csúcsokba mutat, míg az A_2 élhalmaz minden eleme műveleti egység típusú csúcsból mutat anyag típusú csúcsba.

Láthatjuk, hogy egy ilyen rendszer struktúrája az M anyaghalmaz, és az O műveleti egység halmaz felhasználásával (M, O) is azonosítható – szokták is ezt használni – amihez a fenti leírás szerint egyértelműen hozzárendelhető egy P-gráf, amit pl. az 28. ábrán is láthatunk.

A definícióból közvetlenül következnek az alábbi tulajdonságok:

- Az anyagokat a gráf anyag típusú, a műveleti egységeket a műveleti egység típusú csúcsai reprezentálják.
- Egy anyag és egy műveleti egység típusú csúcs között akkor és csak akkor megy él, ha a nekik megfelelő anyag és a műveleti egység kapcsolata része a reprezentálandó folyamatnak.
- Az élek irányai megegyeznek a folyamat előrehaladásának irányával.

Az anyag típusú csúcsokat körökkel, a műveleti egységek típusúakat vízszintes téglalapokkal ábrázoljuk. A fenti példához tartozó P-gráf a 28. ábrán látható. A különböző anyag típusú csúcsok, mint nyersanyag, termék, vagy melléktermék szimbólumai a 29. ábrán láthatók.



29. ábra. P-gráf ábrázolásának szimbólumai
(Forrás: P-Graph Studio: <http://p-graph.org/>)

Mint látható, a gráf definíciójának megadásánál az úgynevezett „materiális” jelleg nagyon megnehezíti az egzakt leírásokat, ezért most térjünk át a formálisabb indexhalmazokkal történő tárgyalási módra.

Mind az M anyaghalmaz, mind az O műveleti egység halmaz elemeihez rendeljünk különböző természetes számokat és ezután ezekkel az indexekkel hivatkozunk rájuk. A P-gráf csúcsait a megfelelő természetes számok, míg az éleit számpárok azonosítják. Ezek után a $G(A, B, E)$ P-gráf azonosító formulában $A \subseteq N$, $B \subseteq N$, $E \subseteq N \times N$, ahol N a természetes számok halmaza.

Természetesen a feladat megoldása után annak gyakorlati szempontból történő elemzése során visszatérünk az indexek által azonosított eredeti anyag és műveletiegység objektumokra.

Kombinatorikusan lehetséges megoldásstruktúrák

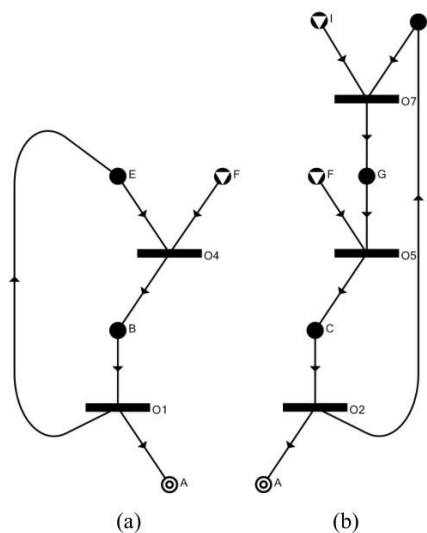
A P-gráf segítségével nem csak a rendszer szintaktikája, hanem a szemantikája is kifejezhető. A gyakorlatban egy valós folyamat struktúrája nem írható le tetszőleges párosgráffal, hiszen ezek a folyamatok rendelkeznek az adott alkalmazási területre vonatkozó bizonyos szabályokkal, törvényszerűségekkel. Nagyszámú folyamat elemzése során, megállapításra kerültek olyan alapvető - a terület szakemberei számára nyilvánvaló - törvényszerűségek, szabályosságok, amelyekkel minden valamilyen folyamatot reprezentáló P-gráfnak rendelkeznie kell. Ezeket a törvényeket úgynevezett P-gráf axiómaként fogalmazhatjuk meg. Ezt a módszertan bevezetői a [45] publikációban jelentették meg.

Önmagában mindegyik axióma triviálisnak tűnik, azonban azokat egyszerre alkalmazva kiszűrhetők a kombinatorikusan nem megfelelő, gyakorlati alkalmazások modellezésére használhatatlan hálózatok. Ha egy szintézis feladathoz tartozó P-gráf kielégíti ezeket az axiómákat, akkor a P-gráfot a probléma egy megoldásstruktúrájának mondjuk.

Axiómák:

- (S1) Minden legyártandó termék, azaz P minden eleme szerepel a struktúrában.
- (S2) Egy, a struktúrában szereplő anyag akkor és csak akkor nyersanyag, ha egyetlen, a struktúrában szereplő műveleti egység sem állítja elő.
- (S3) Minden, a struktúrában szereplő műveleti egység a szintézis feladatban definiált.
- (S4) Minden, a struktúrában szereplő műveleti egységből vezet út legalább egy legyártandó termékhez.
- (S5) Ha egy x anyag része a struktúrának, akkor létezik a struktúrában olyan műveleti egység, amely x anyagot felhasználja vagy előállítja.

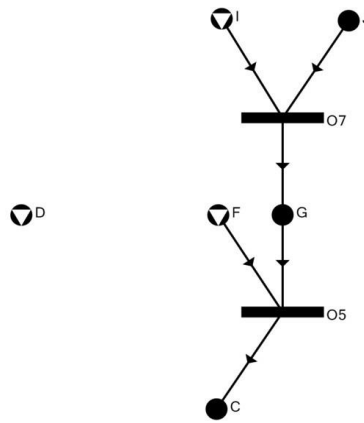
Tekintsük a korábban megadott mintafeladatunk maximális struktúrájának két részgráfját a megoldásstruktúrák koncepciójának az illusztrálására:



30. ábra. Két kombinatorikusan lehetséges megoldásstruktúra
(Forrás: Veszprémi P-gráf módszertant kutató csoport belső tanulmánya)

A feladathoz tartozó két különböző megoldásstruktúra látható a 30. ábrán. Érdekes megjegyezni, hogy ha egy műveleti egység típusú csúcs része egy megoldásstruktúrát reprezentáló P-gráfnak, akkor a műveleti egység bemeneti és kimenetei anyagalmazainak összes eleme is a gráfhoz tartozik. Az is említést érdemel, hogy egy megoldásstruktúra nem tartalmazza feltétlenül az anyagalmaz összes elemét, illetve a nyersanyagalmazból sem kell feltétlenül mindent felhasználnia a gyártás során.

Mivel a gyártandó termék, A, mindkét struktúrában szerepel, az első axióma mindkét esetben teljesül. A második axióma az első struktúrában az F, a második struktúrában az F és G csúcsok miatt teljesül, mivel nyersanyagként egyedül ezekbe a csúcsokba nem vezet él műveleti egységekből, azaz ezeket az anyagokat nem gyártja semmi. Az első struktúra két, a második pedig három műveleti egységet tartalmaz, amelyek mindegyike szerepel a feladat megfogalmazásában, így a harmas axióma is teljesül. A négyes axiómának megfelelően mindkét struktúrában minden műveleti egység típusú csúcsból vezet út a legyártandó termékhez. Az ötös axióma is teljesül, mivel mindkét struktúrában minden egyes anyag típusú csúcs legalább egy műveleti egységnek a kimenete vagy a bemenete. Ez a két struktúra tehát kielégíti az összes axiómát, szemben a 31. ábrán látható struktúrával, amelyre az egyes, kettes, négyes és ötös axióma sem teljesül.



31. ábra Axiómákat nem teljesítő részgráf
(Forrás: Veszprémi P-gráf módszertant kutató csoport belső tanulmánya)

PNS feladatosztály

A folyamathálózat-szintézis (Process Network Synthesis, PNS) az ipari alkalmazásokban gyakran felmerülő probléma. A PNS alapvetően optimalizálási feladat, melynek célja valamely termékek előállításában részt vevő erőforrások legköltséghatékonyabb meghatározása.

Az általános PNS feladatban adott egy ismeretlen hálózat által felhasználható bemenetek halmaza, a hálózat által előállítható kimenetek halmaza, ill. ismertek az építőelemek, amelyekből az ismeretlen hálózat összeállítható. Az építőelemeket általában műveleti egységeknek nevezik, a műveleti egységek be- és kimeneteit pedig anyagoknak. A műveleti egységeknek ismertek a kimeneteik, a bemeneteik, a lehetséges állapotaik, és a költségfüggvényeik is. A hálózat a műveleti egységek ki- és bemeneteinek megfelelő összekapcsolásával kapható meg. A PNS feladatot megoldó módszerek célja olyan optimális hálózat meghatározása, amely a feladatban meghatározott feltételeket teljesíti (input, output, használható műveleti egységek, stb.).

A PNS probléma részben kombinatorikus (műveleti egységek egy részhalmazának keresése), részben matematikai programozás (állapotváltozók, költségfüggvény) jellegű feladat. A kombinatorikus jelleg miatt az optimum meghatározása nehéz, mivel a probléma matematikai modellje sok bináris változót tartalmazó vegyes egész értékű programozási feladat lesz.

Egy ipari méretű feladat megoldása rendkívül számításigényes, továbbá annak halmazlefedési feladatokkal történő bizonyítása, hogy a PNS feladat NP-nehéz, Blázsik et al. [82] cikkében lett első körben bemutatva. A szerzők azt is bizonyították, hogy tetszőleges halmazlefedési feladat transzformálható egy PNS feladat alakjára. Fülöp et al. [83] cikkében egy fordított állítást bizonyít. Nevezetesen, hogy minden körmentes PNS feladat átranzformálható egy halmazlefedési feladat alakjára. Imreh és tsai által [84]-ben bizonyították, hogy a PNS feladat ekvivalens a halmazlefedési problémával, amiből következik, hogy a PNS probléma NP-teljes.

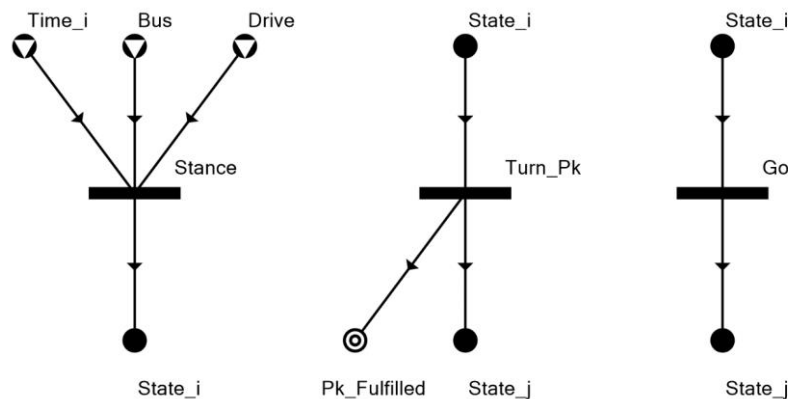
A kidolgozott egzakt matematikai módszerekre épülő eljárások nagy része egy matematikai programozási módszert alkalmaz PNS feladatok megoldására, mely a vegyes egész, sok bináris változót tartalmazó matematikai programozási feladat megoldását jelenti. Csakúgy, mint a VSP feladatok esetében, a feladat nehézségét kellőképpen mutatja, hogy több heurisztikus eljárást is kidolgoztak már a számítások gyorsítása érdekében, ám a megoldás optimumát ezek az eljárások nem tudják garantálni.

6.2 A városi buszközlekedés modelljének objektumai

A korábban bemutatott adaptációs folyamat lépéseit vesszük sorra, azaz első lépésként bevezetjük az új terminológiát, illetve azonosítjuk az alkalmazási terület objektumait.

Esetünkben az anyagjellegű csúcsok valamiféle állapotot vagy egy esemény bekövetkezését (a jármű az indító megállóban áll), vagy erőforrást (idő, járművezető, busz), vagy ténylegesen egy fizikai objektumot (garázs) azonosítanak. A műveleti egység jellegű csúcsok valamiféle tevékenységet (garázból kiállás, átszerelés stb.), vagy két állapot közötti átmenetet jelölhetnek. Egy műveleti egység jellegű csúcs azonosíthat egy olyan tevékenységet is, amely valamelyik esemény bekövetkezésének kiváltását, vagy éppen megakadályozását eredményezi.

A következőkben felsoroljuk a városi buszközlekedés modellezésére tervezett P-gráf objektumait, és azok jellemzőit, valamint ábrázolási módjukat.



32. ábra. Buszközlekedés P-gráf műveleti egységei (Stance, Turn_Pk és Go)
(Forrás: saját szerkesztés)

Stance

Egy ilyen műveleti egység bekövetkezése vagy végrehajtása azt eredményezi, hogy a garázból egy buszt egy járművezető a menetrendben megadott indulási időpontra az útvonal induló buszmegállójába vezeti, amire a munkaidejéből felhasznál ST percet. Végrehajtása után kialakul az az állapot, hogy a jármű készen áll valamelyik járat teljesítésére, azaz bekövetkezett egy új állapot. E műveleti egységek halmaza legyen State.

Turn_Pk

E műveleti egység bekövetkezése vagy végrehajtása azt jelenti, hogy az adott jármű és járművezető az adott viszonylat esetében az indító állomásról elindult, és elérte a végállomást majd onnan visszatért az indulási állomásra, teljesítve a köztes megállókat és így tovább. Tehát a rendszer állapota megváltozott, egyik State állapotból átment egy másik State állapotba, és eközben a járművezető munkaidejéből eltelt annyszor T perc, amennyi járatot teljesített. E műveleti egységek halmaza legyen Turn_Pk, legyen továbbá az ilyen típusú halmazok uniója Turn.

Go

Ez a művelet modellezi azt, amikor a járművezető nem végez egyéb tevékenységet, hanem átáll az indulási oldalra. E műveleti egységek halmaza legyen Go.

Rest

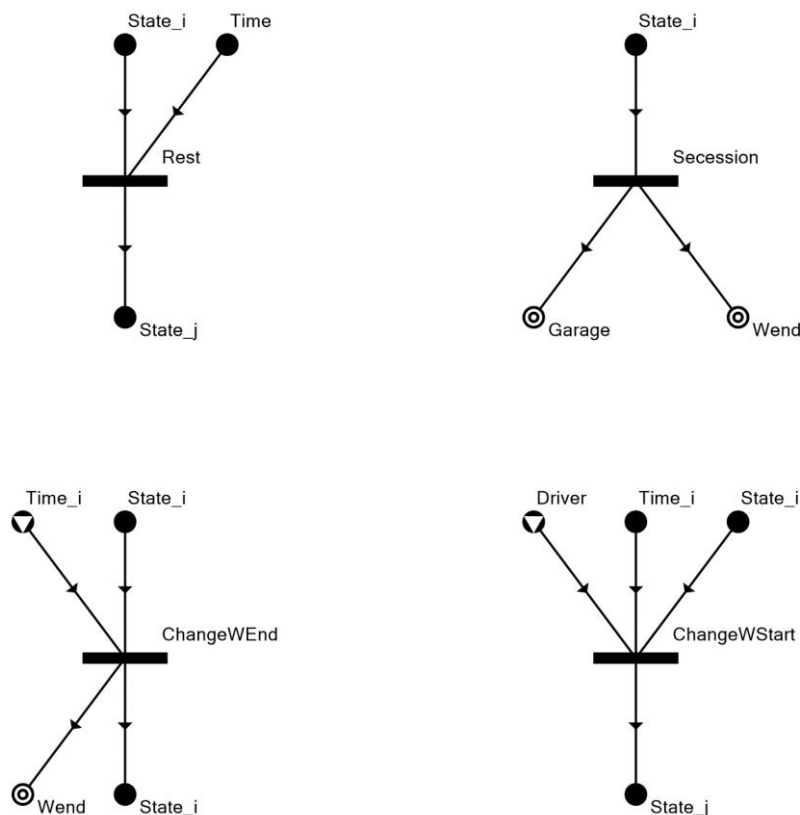
E műveleti egység bekövetkezése, vagy végrehajtása azt jelenti, hogy az adott busz és járművezető pihenő idejét tölti. Ez úgy történik, hogy valamelyik - az időkeretekre vonatkozó szabályoknak megfelelő - teljesített járat után félreáll és pihen. Ez az idő beleszámít a munkaidejébe, azaz a járművezető ebből felhasznál RT percet. Természetesen ezzel betartották a munkaidőre vonatkozó szabályokat. A pihenő letelte után visszaáll az indító állomásra, és teljesíti a további járatokat. E műveleti egységek halmaza legyen Rest.

Secession

E műveleti egység bekövetkezése vagy végrehajtása azt eredményezi, hogy az adott busz és járművezető visszatér a garázsba, azaz bekövetkezik a „Garage” és a „Wend” művelet előfeltétele és ezzel véget ér a folyamat. Ez az állapot végtermék jellegű hiszen ezt kell elérni minden busznak és minden járművezetőnek. Természetesen ez művelet csak akkor következhet be, ha az adott viszonylatban az adott busz és adott járművezető teljesítette a napi feladatait és teljesültek a járateljesítési folyamatra előírt korlátozó feltételek, pl. a pihenőidőkre vonatkozó munkaügyi szabályok. E műveleti egységek halmaza legyen Secession.

ChangeWEnd

Ez a műveleti egység típusú csúcs azt jelzi, hogy egy adott busz és a hozzá tartozó járművezető az indulási állomáson van, és a járművezető befejezi a munkát és átadja a buszt egy másik járművezetőnek, aki úgy kezdi a munkáját, mintha a garázsban állt volna ki. Ezt a műveletet a munkát befejező járművezető végzi el és a munkaidejéből elhasznált HT percet. E műveleti egységek halmaza legyen ChangeWEnd.



33. ábra. Buszközlekedés P-gráf műveleti egységei
(Forrás: saját szerkesztés)

ChangeWStart

Ez a műveleti egység típusú csúcs azt jelzi, hogy egy adott busz és a hozzá tartozó járművezető az indulási állomáson van, és a járművezető befejezi a munkát és átadja a buszt egy másik járművezetőnek, aki úgy kezdi a munkáját, mintha a garázsba állt volna ki. Ezt a műveletet a munkába álló járművezető végzi el és a munkaidejéből elhasznált HT percet. E műveleti egységek halmaza legyen ChangeWStart.

Wait

Ez a művelet modellezi azt, amikor a járművezető ütemezési szempontok miatt kénytelen várakozni. E műveleti egységek halmaza legyen Wait.

WEnd

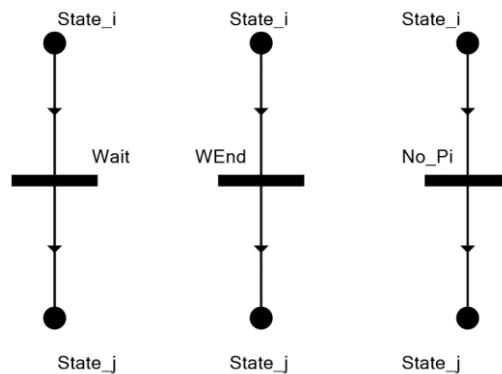
Ez a művelet modellezi azt, amikor a járművezető befejezi a munkáját. E műveleti egységek halmaza legyen WEnd.

No_Pi

Ez a műveleti egység annak az esetnek a kezelésére lett bevezetve, amikor a jármű és járművezető nem az első periódusban kezdi el a munkát. Természetesen ebben az esetben is betartották a munkaidőre vonatkozó szabályokat. E műveleti egységek halmaza legyen No_Pi.

PEnd

Ez a művelet modellezi azt, hogy minden járatot teljesíteni kell. E műveleti egységekből egy van.



34. ábra. Buszközlekedés P-gráf műveleti egységei
(Forrás: saját szerkesztés)

Nyersanyag jellegű csúcsok

Time:

Ez a nyersanyag típusú csúcs a rendelkezésre álló munkaidőt reprezentálja, a hozzárendelt paraméter a munkaidő hossza percben. Minimális értéke NWH, míg maximális értéke XWH. E műveleti egységek halmaza legyen Time.

Bus:

Ez az anyagtípusú csúcs a rendelkezésre álló buszflottát reprezentálja, a hozzárendelt paraméter a buszok száma, B. Az ilyen típusú csúcs sorszáma b.

DriverStart

Ez az anyagtípusú csúcs a rendelkezésre álló járművezetőket azonosítja, a hozzárendelt paraméter a létszám, azaz D fő. Az ilyen típusú csúcs sorszáma d .

Végtermék típusú csúcsok

Garage

Ez a végtermék típusú csúcs a rendelkezésre álló garázst, vagy garázsokat azonosítja. Azért végtermék, mert egy buszforda itt végződik, és természetesen minden busznak vissza is kell térnie a garázsba. Ebből a végtermékből egy van. Az ilyen típusú csúcs sorszáma g .

DriverEnd

Ez a végtermék típusú csúcs a járművezetők munkaidejének végét jelöli. Ebből a végtermékből egy van. Az ilyen típusú csúcs sorszáma r .

Pk_Fulfilled

Ezek a végtermék típusú csúcsok a menetrendből meghatározott periódusokban szereplő járatok teljesítését azonosítják. A hozzárendelt paraméter a perióduson belül teljesítendő járatok száma r_k , amit input paraméterként a feladat leírása tartalmaz. Nyilvánvalóan ez is olyan eredmény, amelyet teljesíteni kell. Az ilyen típusú csúcsok sorszáma Pk_f . A mennyiben minden járat teljesítését írjuk elő, akkor a végtermék jellegű csúcs neve Fulfilled, sorszáma f .

Köztes anyagtípusú csúcsok

State: Ezek a csúcsok a szerelvények (jármű és járművezető) különböző állapotait jelölik, nevezetesen azt jelölik, hogy mit tett eddig és mit tehet ezután a szerelvény. Az ilyen típusú csúcsok halmaza legyen State.

Maximális struktúra

Az alapobjektumok meghatározása után a P-gráf módszertan lépéseit követve a maximális struktúra generálása következik. Ennek során meghatározzuk, hogy a fentebb megadott építőelemekből hogyan lehet modellezni a menetrend teljesítésének folyamatát, pontosabban a teljesítés összes lehetséges módját. Felveszünk annyi csúcsobjektumot, mint amennyit a fenti leírásban megadtunk. Egy adott periódus és egy adott szolgálati szám (járművezetői beosztási keret) esetében adott az is, hogy milyen tevékenységeket végezhet el egy adott szerelvény, nevezetesen ez lehet Go, Rest, Secession vagy ChangeWEnd. A műveleti egységek modelljét figyelembe véve felvesszük az éleket, és előállt a maximális struktúra, ezt részletesen a következő két feladatosztálynál írjuk le részletesen.

Természetesen, ha a csúcsobjektumok sorszámaikat az előbb elmondottaknak megfelelően osztjuk ki, akkor a maximális struktúra generálását az MSG algoritmus elvégzi.

A maximális struktúra csúcsait azonosító sorszámaik mindig megválaszthatók úgy, hogy a Time típusú csúcsokból induló élek végpontjainak sorszáma növekvő legyen a tevékenységek időbeni egymásutánisága szerint.

Megoldásstruktúra

A 6.1. fejezetben tárgyalt klasszikus P-gráf módszertan öt axiómát határoz meg, amelyek teljesülését követeljük meg minden olyan részgráftól, amelyet megoldásstruktúrának nevezünk. A P-gráf módszer

városi buszközlekedési feladatokra történő adaptációjának fontos lépése, hogy a megoldásstruktúrákat meghatározó axiómákat ki kell egészíteni egy további, a feladatosztályra jellemző speciális tulajdonsággal, amit (S6) tulajdonságnak fogunk nevezni. Azaz egy részgráfot akkor és csak akkor nevezünk megoldásstruktúrának ha az (S6) tulajdonság is teljesül.

(S6) Minden köztes anyag jellegű csúcsnak, amely szerepel a részgráfban mind a befoka mind a kifoka egy.

Ez az újabb megkötés abból a meggondolásból vezethető le, hogy ebben a városi buszközlekedés feladatosztályban a járművezető és a jármű együttes állapotait és tevékenységeit követjük és írjuk le.

Ha egy „szerelvény” egy adott köztes állapotban van, akkor egy és csak egy tevékenységet kezdhet el, azaz az állapotot azonosító csúcs kifoka egy. Fordítva, egy szerelvény egy tevékenység teljesítése után egy és csak egy állapotba kerülhet.

A maximális struktúra egy adott viszonylathoz megadott menetrend összes strukturálisan lehetséges megvalósítását tartalmazza. Kérdés az, hogy hogyan lehet ezeket azonosítani, hogyan lehet közöttük keresni, illetve hogyan lehet bizonyos „jósági” szempont szerint kiértékelni. Ezt a matematikai modell leírásánál tisztázom.

6.3 Optimális menetrend megvalósítás ütemes menetrendek esetén

A városi buszközlekedés esetén számos viszonylatnál megfigyelhető a menetrendnek az a jellemzője, hogy egyes napszakokban, periódusokban (reggeli, délelőtti csúcsforgalom stb.) a járatok sűrűsége más és más, viszont az indítási idők között azonos idő telik el. Ezt nevezzük ütemes menetrendnek.

A kitűzött feladatunkban egy viszonylatot vizsgálunk, amihez tartozik egy induló állomás és egy végállomás, valamint ismerjük az egy forduló megtételéhez szükséges menetidőt. Természetesen ez az idő jellegét tekintve többféle lehet, pl. vezetési idő, technikai feladatok ellátásával eltöltött idő, végállomásokon átállási idő stb. Tekintettel arra, hogy ezek konstans időszakok, a gyakorlatban nyilván fontos kimutatni, de a matematikai modell szempontjából felesleges külön kezelni.

A menetrend ugyancsak meghatározza a periódusokban teljesítendő járatok számát is. Természetesen ismerjük a járműflotta nagyságát, azaz a buszok számát és feltételezzük, hogy mindegyikhez rendelkezésre áll járművezető is. Sőt, lehetőség van úgynevezett átszerelésre – egy alkalommal – ami azt jelenti, hogy az adott járművet az egyik járművezető átadja a váltó járművezetőnek.

Figyelembe kell venni a járművezetőkre vonatkozó munkaügyi szabályokat is. Van egy minimális és egy maximális időtartam a munkaidőre. A pihenőidőt egy alkalommal úgy kell kiadni, hogy a folyamatos vezetési idő nem haladhatja meg a maximális hosszúságú munkaidő felét. A pihenőidőt letölteni, illetve az átszerelést elvégezni csak az indító állomáson lehetséges.

Adottak a technikai feladatokra fordítható időkeretek, azaz garázsból kiállítás, beállítás, leszerelés, illetve átszerelés. Tehát összefoglalva, a járatokra vonatkozó paraméterek a következők:

- periódusok: P_1, P_2, \dots, P_n
- periódusokként teljesítendő fordulók száma: r_1, r_2, \dots, r_n
- periódusokként a menetidő, percben: t_1, t_2, \dots, t_n

A tevékenységekre vonatkozó paraméterek:

- pihenőidő hossza percben: RT
- átszerelés ideje percben: HT
- leszerelés ideje percben: LT
- garázsból kiállási idő percben: ST
- garázsba beállási idő percben: GT

Az erőforrásokra vonatkozó paraméterek:

- | | |
|--------------------------------------|------|
| - minimális munkaidő hossza percben: | NWH |
| - maximális munkaidő hossza percben: | XWH |
| - minimális munkaidő pihenés nélkül: | RNWH |
| - maximális munkaidő pihenés nélkül: | RXWH |
| - buszok száma: | B |
| - járművezetők száma: | D |

Célként jelen esetben a járművezetők munkaidejének hatékony kihasználtságát tűzzük ki, azaz minimalizálni fogjuk a nem vezetéssel és nem pihenéssel töltött időt.

Maximális struktúra felépítése

A menetrendből kiszámolható a periódusok száma, a járművezetői beosztási keretek számát tapasztalat alapján határozzuk meg pl. a jelenleg érvényes kézzel készített ütemezésből.

Az ütemes menetrendek esetében a maximális struktúra tartalmazni fogja az összes periódust, illetve az összes lehetséges tevékenységet. A P-gráfon a járművek, a járművezetők és az idő nyersanyag típusú csúcsként (*Bus, DriverStart, Time*), míg a garázs és a járművezetők munkaidejének vége, illetve a periódusok teljesítve állapotok végterméktípusú gráfcsúcsként (*Garage, DriverWend, Pi_Fulfilled*) szerepelnek. Első lépésként ezeket a csúcsokat vesszük fel.

A köztes anyag típusú csúcsok valamilyen állapot, vagy feltétel bekövetkeztét azonosítják. Ezek a gráfcsúcsok egy-egy adott műveleti egység beillesztésével kerülnek a gráfba.

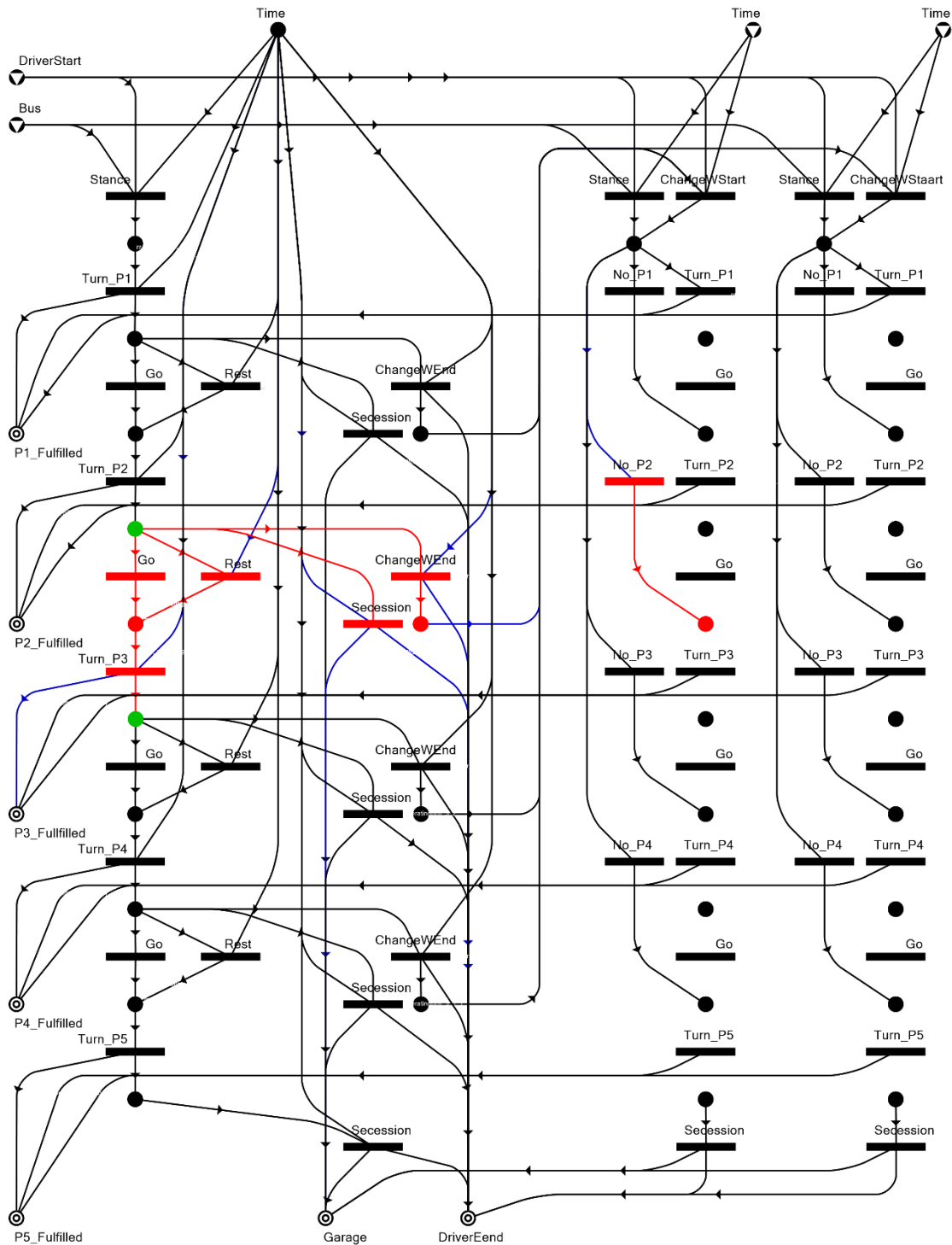
A műveleti egység típusú csomópontok különféle tevékenységeket képviselnek, nevezetesen a garászból kiállást, átállást az indulási oldalra, átszerelést, a garázsba beállást, a pihenést és a járművezetők cseréjét és természetesen egy járat teljesítését.

A tervezett maximális struktúrát a 35. ábra tartalmazza. A piros színnel ábrázolt részgráf tartozik minden egyes periódushoz és járművezetőhöz (járművezetői beosztási kerethez, vagy szolgálati számhoz) és a kék színnel ábrázolt élek mutatják a környezethez történő kapcsolódásokat.

Ha minden periódusra és járművezetőre felvesszük a gráfba ezt a struktúrát, és a környezethez kapcsolódó éleket behúzzuk, akkor elkészült a maximális struktúra.

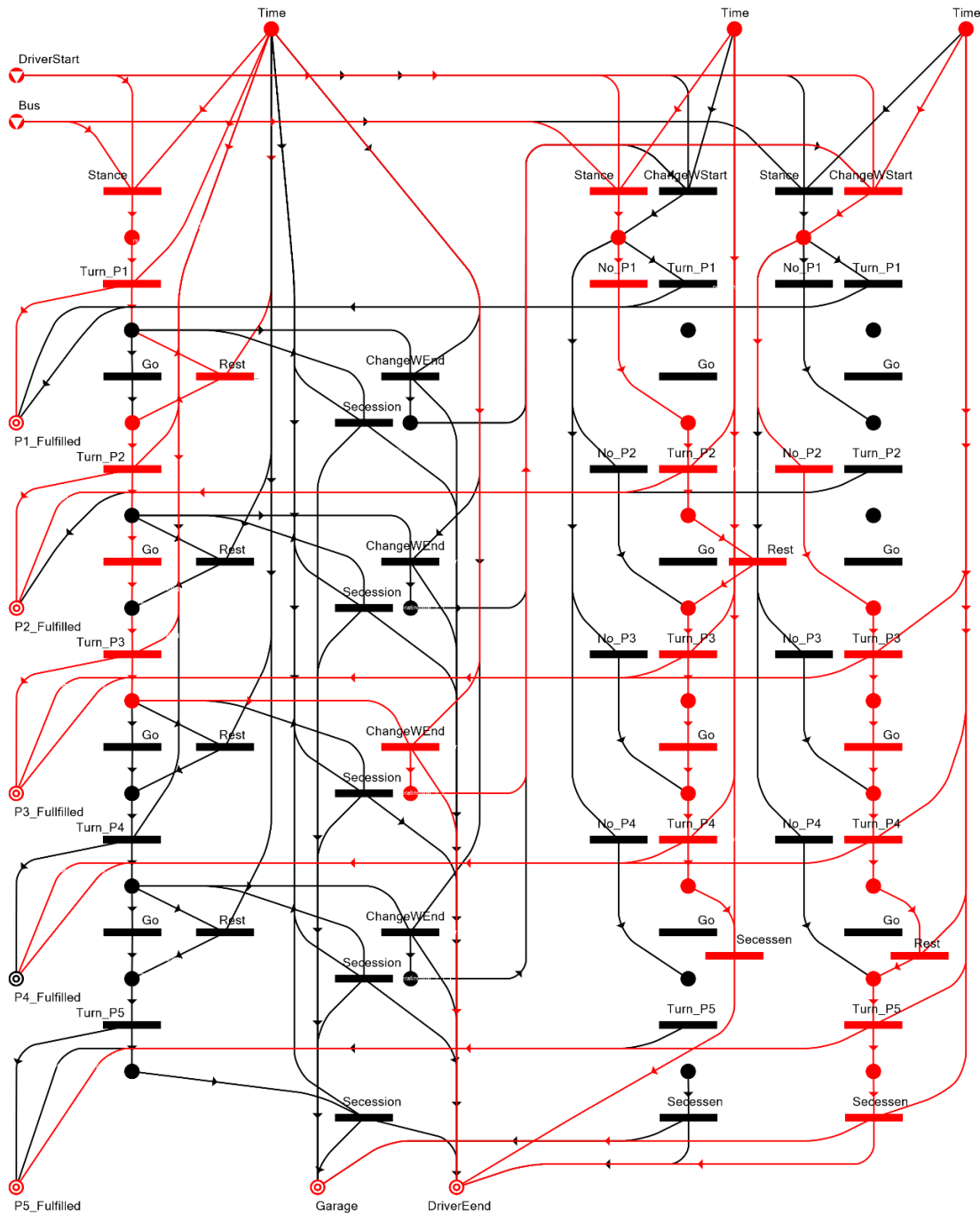
Ezt a gráfot lehet csökkenteni azzal, hogy a menetrendből meghatározhatók bizonyos lehetetlen szituációk a tevékenységekre és eseményekre, amelyeket törölhetünk a gráfról. Ilyenek lehetnek például, hogy az első járat indítását nem kezdhetjük járművezető cserével, ugyanez igaz az utolsó fordulóra is, a pihenőidőkre vonatkozó szabályok egy része strukturálisan is érvényesíthető, stb. Ezek mind csökkentik a modellek méreteit, de a megoldás eredményét természetesen nem.

Az 35. ábrán látható az 5 periódus és 3 szolgálati szám (járművezetői beosztási keret) által meghatározott úgynevezett P5_F3 maximális struktúra. A dolgozatomban a 26-os busz viszonylathoz tartozik.



35. ábra. A P5_F3 feladat maximális struktúrája
(Forrás: saját szerkesztés)

Mint korábban leírtam, a maximális struktúrának olyan részgráfjait tekintjük strukturálisan lehetséges megoldásnak, amelyekre mind az 5 axióma és az (S6) tulajdonság teljesül. Egy ilyen strukturálisan lehetséges megoldást mutat a 36. ábra piros színnel kifestett része. Vegyük észre, hogy az ábrán látható megoldást három járművezető és két busz tudja teljesíteni.



36. ábra. A P5_F3 Menetrend megvalósítási feladat egy strukturálisan lehetséges megoldása
(Forrás: saját szerkesztés)

Matematikai programozási modell

A $Turn_P_z$ műveleti egység típusú csúcsokhoz rendeljük hozzá nem negatív egészértékű x_i változókat (i az adott csúcs sorszáma), melyek jelentése, hogy az adott periódusban a járművezető mennyi fordulót teljesített.

Minden $Time$ halmazba tartozó csúcsból induló élhez (i, j) rendeljük hozzá az adott tevékenység (az él másik végpontja, j) elvégzéséhez szükséges időt t_{ij} , amelyet input paraméterként a feladat leírása tartalmaz.

Minden i műveleti egységhez rendeljünk hozzá egy e_i bináris változót, melynek jelentése, hogy az adott i csúcs szerepel a részgráfban, vagy sem. Az s_i bináris változó, jelentése, hogy az i . szolgálati szám (járművezetői beosztási keret) szerepel, vagy sem a megoldásban.

A munkaügyi szabályoknak megfelelő korlátozások

A munkaidőre és a pihenőidőre vonatkozó szabályok. Az M egy alkalmasan választott nagy szám, ebben az esetben erre alkalmas 1440, ami egy nap hossza percekben.

$$\forall i \in Time \quad \sum_{\{j | (i,j) \in E\}} e_j * t_{ij} \geq s_i \geq \frac{\sum_{\{j | (i,j) \in E\}} e_j * t_{ij}}{M} \quad (15)$$

$$\forall i \in Time \quad \sum_{\{j | (i,j) \in E\}} e_j * t_{ij} \leq XWH \quad (16a)$$

$$\forall i \in Time \quad \sum_{\{j | (i,j) \in E\}} e_j * t_{ij} \geq NWH - (1 - s_i) * M \quad (16b)$$

$$\forall i \in Rest \exists k \in Time \ (k,i) \in E \quad \sum_{\{j | (i,j) \in E \text{ és } j < k\}} e_j * t_{ij} \geq RNWH \quad (17a)$$

$$\forall i \in Rest \exists k \in Time \ (k,i) \in E \quad \sum_{\{j | (i,j) \in E \text{ és } k < j\}} e_j * t_{ij} \leq RXWH \quad (17b)$$

$$\forall i \in \{1,2,\dots,P\} \quad \sum_{z=1}^i \sum_{\{j | (j,Pz_f) \in E \text{ és } (k,j) \in E\}} (x_j * t_{kj} - t_j) \leq \sum_{z=1}^i t_z * r_z \quad (18)$$

Minden periódusban a járatszámot teljesíteni kell, a rendelkezésre álló járművek és járművezetők száma B és D .

$$\forall i \in \{1,2,\dots,P\} \quad \sum_{\{j | (j,Pi_f) \in E\}} x_j = r_i \quad (19)$$

$$\sum_{\{d | (d,i) \in E\}} e_i = \sum_{\{i | (i,r) \in E\}} e_i \leq D \quad (20a)$$

$$\sum_{\{i | (i,g) \in E\}} e_i = \sum_{\{b | (b,i) \in E\}} e_i \leq B \quad (20b)$$

Azt a célt tűzzük ki, hogy minél kevesebb járművezetővel valósítsuk meg a menetrendet és úgy, hogy a járművezetők a lehető legtöbb hasznos tevékenységet végezzenek.

$$\sum_{\{i | i \in Time\}}^F \sum_{\{j | (i,j) \in E\}} e_j * t_{ij} - \sum_{\{i | i \in Time\}}^F s_i \rightarrow max \quad (21)$$

A 7. táblázat szerint a következő felső becslés adható a MILP matematikai programozási modell méretére, amennyiben a periódusok száma P, a járművezetők száma D.

MILP	bináris változó	egészértékű változó	valósértékű változó	korlátozási feltétel
Általános	$5*(P-1)*D+3*D$	$P*D$	0	$2*P*D+3*D+2*P+4$
Bp. átlag P=8, D=12	456	96	0	248

7. táblázat. Felső becslés a MILP méretére

A 7. táblázatban szereplő formulák igazolása:

Mivel a Time halmaz mérete megegyezik a dolgozók számával azaz D így

(15) formula D darab korlátozás

(16a) formula D darab korlátozás

(16b) formula D darab korlátozás

(17a) formula $P*D$ darab korlátozás // a Rest halmaz elemszáma

(17b) formula $P*D$ darab korlátozás // a Rest halmaz elemszáma

(18) formula P darab korlátozás

(19) formula P darab korlátozás

(20a) formula 2 darab korlátozás

(20b) formula 2 darab korlátozás

Összesen $2*P*D+3*D+2*P+4$

6.4 3. tézis

A klasszikus PNS módszertant adaptáltam a városi buszközlekedési feladatosztályra, megadtam az anyagáramok és műveleti egységek adekvát értelmezését, valamint a lehetséges megoldás-struktúra fogalmát értelmeztem a feladatosztályra. Az adekvát értelmezéshez egy további új tulajdonságot vezettem be. Az ütemes menetrend típusokra meghatároztam az adekvát maximális struktúra szerkezeti jellemzőit, melyek alapján egy konkrét menetrend megvalósítási feladat maximális struktúráját lehet generálni.

- A városi buszközlekedés menetrend-megvalósítási feladatosztályt azonosítottam a PNS módszertan keretein belül
- Megállapítottam, hogy a strukturális vizsgálatoknak alapvető szerepe van a megoldás során.
- Megadtam a maximális struktúrához tartozó MILP matematikai programozási modellt.
- Megadtam az alapvető jellemzők függvényében a MILP méreteinek felső korlátjait, ami mutatja, hogy a modell milyen nagyságrendben reálisan megoldható.
- Megállapítottam, hogy azáltal, hogy ezen módszer alkalmazása során a strukturálisan lehetséges megoldásokra kerül felírásra az alkalmazott matematikai programozási modell, ezért a memória, számítási kapacitás és idő, mint különböző erőforrások felhasználása hatékonyabb, mint a klasszikus megoldási módszerek alkalmazása során.

Kapcsolódó publikációk

Nagy, Albert ; Ercsey, Zsolt ; Tick, Jozsef ; Kovacs, Zoltan, Bus Transport Process Network Synthesis ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 16 : 7 pp. 25-43. , 19 p. (2019), DOI WoS Scopus Folyóiratcikk/Szakkikk (Folyóiratcikk)/Tudományos[30830749] [Egyeztetett]

6.5 Optimális menetrend megvalósítás tetszőleges indítási idejű menetrendek esetén

A tetszőleges indítási idővel rendelkező menetrenden azt értjük, hogy az egyes járatok követési idejei nem mutatnak hasonlóságot, azaz egy napon belül nem határozható meg néhány időperiódus (pl. napszak, csúcsforgalmi idő stb.), amin belül a járatok követési idejei azonosak. Ennek az esetnek a modellezésére is megadok egy P-gráfot, természetesen ez szerkezetében eltérő az előző menetrendtípustól alkalmazottól, bár jellegét tekintve hasonló. Ez az eset természetesen általánosabb, mint az előző, és előfordulása is gyakoribb, megkülönböztetésüket mégis az indokolja, hogy az „ütemes indítás” tulajdonság lehetőséget biztosított a P-gráf méretének csökkentésére.

A menetrendből meghatározhatók a következő járatokra vonatkozó paraméterek:

- a járatok indítási ideje: $P1, P2, \dots, PN$
- a járatok menetideje: $t1, t2, \dots, tN$

A tevékenységekre vonatkozó paraméterek:

- pihenőidő hossza percben: RT
- átszerelés ideje percben: HT
- leszerelés ideje percben: LT
- garázsból kiállási idő percben: ST
- garázsba beállási idő percben: GT

Az erőforrásokra tartozó paraméterek:

- minimális munkaidő hossza percben: NWH
- maximális munkaidő hossza percben: XWH
- maximális munkaidő pihenés nélkül: RWH
- buszok száma: B
- járművezetők száma: D

Célként jelen esetben is a járművezetők munkaidejének hatékony kihasználtságát tűzzük ki, azaz minimalizálni fogjuk a nem vezetéssel és nem pihenéssel töltött időt.

A maximális struktúra felépítése

A tetszőleges indítási idejű menetrendek esetében a maximális struktúra tartalmazni fogja az összes szükséges járatot, illetve egy-egy adott szituációban az összes lehetséges tevékenységet. A korábbiakhoz hasonlóan a P-gráfon a járművek, a járművezetők és az idő nyersanyag típusú csúcsként (*Bus, DriverStart, Time*), míg a garázs és a járművezetők munkaidejének vége, illetve a járatok teljesítve állapotok végterméktípusú gráfcsúcsként (*Garage, DriverWend, Fulfilled*) szerepelnek. Első lépésként ezeket a csúcsokat vesszük fel.

A tervezett maximális struktúrát a 37. ábra tartalmazza. A piros színnel ábrázolt részgráf tartozik minden egyes fordulóhoz, és az eltérő színekkel ábrázolt élek mutatják a környezetéhez történő kapcsolódásokat.

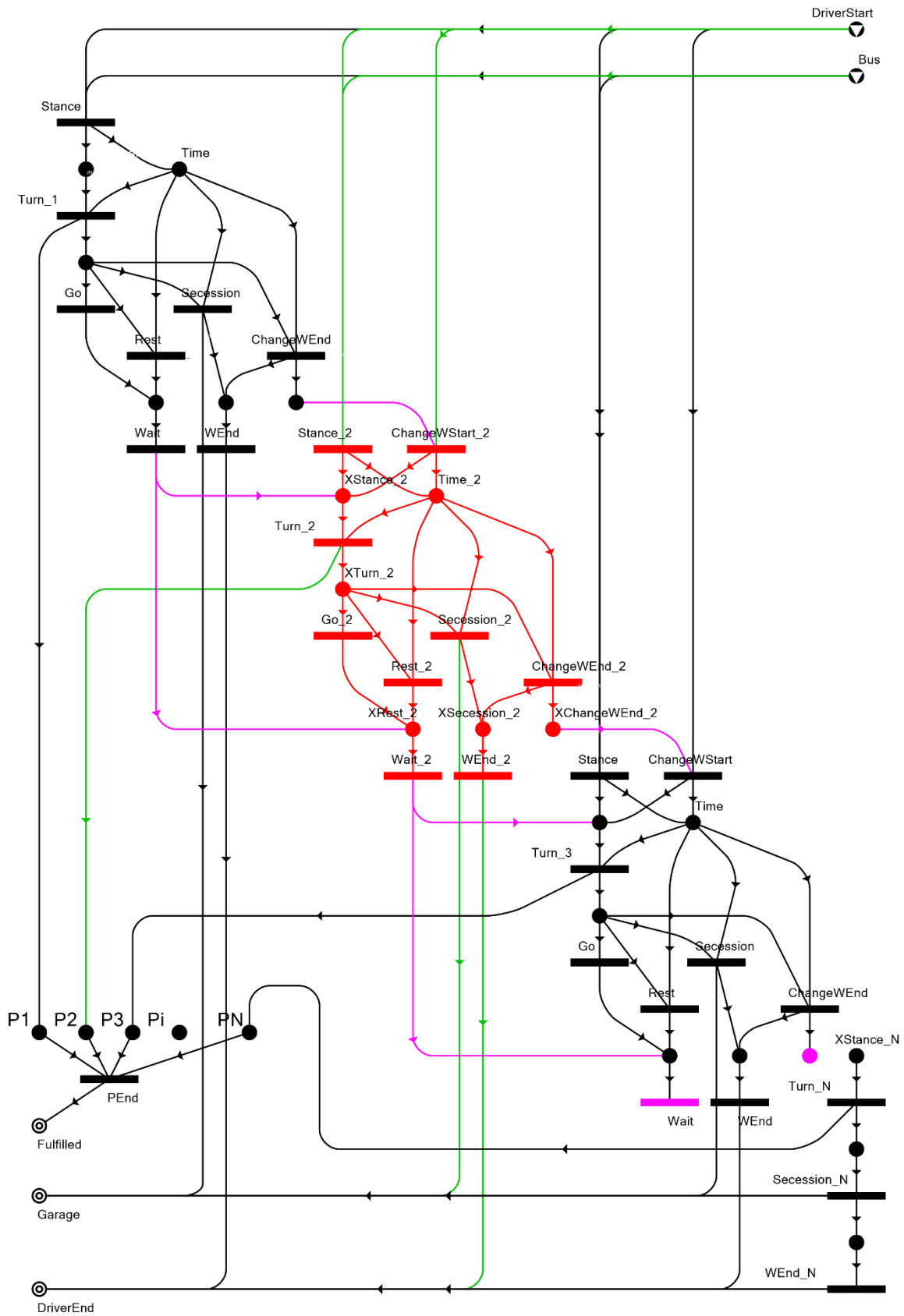
A köztes anyag típusú csúcsook valamilyen állapot, vagy feltétel bekövetkeztét azonosítják. Ezek a gráfcsúcsook egy-egy adott műveleti egység beillesztésével kerülnek a gráfba.

A műveleti egység típusú csomópontok különféle tevékenységeket képviselnek, nevezetesen a garazsból kiállást, átállást az indulási oldalra, átszerelést, a garázsba beállást, a pihenést és a járművezetők cseréjét és természetesen egy járat teljesítését.

Ha minden fordulóra felvesszük a gráfba ezt a struktúrát és a környezethez kapcsolódó éleket behúzzuk, akkor elkészült a maximális struktúra.

A maximális struktúra algoritmikus generálásának pszeudokódja a 2. sz. mellékletben található.

A bonyolultabb járművezető ütemezési problémáknak a feladattól függően azonos, vagy eltérő maximális struktúrájuk lehet. Például amikor a járművezető váltása nem csak végállomásokon lehetséges, hanem bármely megállóban, akkor természetesen más a maximális struktúra szerkezete is. Számos egyéb feltétel vagy korlátozás viszont nincs hatással a gráf struktúrára, pl. ha egy állomáson adott a várakozó buszok maximális száma, akkor ezt a követelményt a matematikai programozási modell tartalmazza.



37. ábra. A feladathoz meghatározott maximális struktúra N járat esetén.
(Forrás: saját szerkesztés)

A matematikai programozási modell

Az előző fejezetben bemutattam, hogy a városi buszközlekedés P-gráf módszertanra alapozott modellezése során hogyan kell a maximális struktúrát meghatározni. A következő lépés pedig az, hogy e gráf alapján meg kell adnunk azt a matematikai modellt, melynek megoldása szolgáltatja a feladat optimális megoldását.

Rendeljünk minden i műveleti egység típusú csúcshoz egy e_i bináris változót, melynek jelentése, hogy egy tekintett részgráfban az i csúcs a hozzátartozó élekkel együtt szerepel-e ($e_i=1$, ha igen, $e_i=0$, ha nem). Ezek az úgynevezett strukturális változók csak akkor szükségesek, ha olyan részgráfokra is szeretnénk felírni a matematikai modellt, amelyek nem teljesítik a 6 tulajdonságot, azaz nem megoldásstruktúrák, például ha a maximális struktúrára írjuk fel a matematikai modellt. Mint említettem, ebben az alkalmazásban a maximális struktúra nem megoldás struktúra. Ez az út a hagyományos megoldási módszerekhez hasonló, hiszen egyetlen MILP matematikai programozási feladat segítségével kapjuk meg a megoldást. Továbbá szükség lehet e változók alkalmazására, ha az ABB eljárást adaptáljuk, nevezetesen a gyorsított szétválasztás és korlátozás algoritmus tervezésénél. Viszont, ha a megoldás struktúrákat algoritmikusan határozzuk meg, pl. SSG adaptáció esetén, akkor ezek a változók konstans 0, 1 értékre változnak.

Az egyetlen *Time* típusú csúcs indexe legyen s hasonlóan legyen b a *Busz*, d a *DriverStart*, f a *Fulfilled*, g a *Garage*, r a *DriverEnd* típusú csúcsok indexe.

Minden j műveleti egységhez, amely csatlakozik az s csúcshoz, rendeljük a j tevékenység elvégzéséhez szükséges konstans t_{sj} időt, melyet a feladat leírása tartalmaz. Például, ha j egy *Rest* jellegű csúcs, akkor $t_{ij} = RT$.

Minden i műveleti egység jellegű csúcsra vezessük be a K_i , w_i nem negatív valós változókat, melyek jelentése, hogy egy folyamat (*DriverStart*, *DriverEnd* közötti irányított úton) mikor kezdődött (napon belüli időpont), illetve az, hogy a folyamat elindulása óta mennyi idő telt el, műveleti egységeknél a tevékenység befejezéséig.

A strukturális változókra vonatkozó korlátozások

A megoldásstruktúrában minden köztes anyagjellegű csúcsnak a kifoka és a befoka egy.

$$\forall i \in State \quad \sum_{\{k | (k,i) \in E\}} e_k = \sum_{\{j | (i,j) \in E\}} e_j \quad (22a)$$

$$\forall i \in State \quad \sum_{\{k | (k,i) \in E\}} e_k = 1 \quad (22b)$$

A K_i és w_i változók beállítása

Legyen a $H = Stance \cup ChangeWStart$ műveleti egység-halmaz. Ezek a tevékenységek indítanak el egy „túra” folyamatot, azaz egy járművezető és egy busz itt lép munkába. Az M egy alkalmasan választott nagy konstans, lehet pl. 1440, egy nap hossza percekben.

$$\begin{aligned} \forall i \in O \quad K_i + w_i &\leq e_i * M \\ \forall i \in O - (H \cup Turn \cup PEnd) \text{ és } \exists! j \in State \quad (j,i) \in E \quad K_i &= K_j \quad \text{és} \quad w_i = w_j + t_{si} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \forall i \in Turn \exists! j \in State \text{ amire } \exists (j, i) \in E \\ K_j + w_j \leq P_i \text{ és } K_i = K_j \text{ és } w_i = K_i - P_i + t_{si} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \forall i \in H \text{ ekkor } \exists! j \in Turn \text{ amire } \exists (i, k, j) \text{ irányított út} \\ K_i = P_j - t_{si} \text{ és } w_i = t_{si} \end{aligned} \quad (25)$$

Az állapotok csupán továbbadják a kezdési időpontot, illetve az addig teljesített munkaidőt.

$$\begin{aligned} \forall i \in State \\ K_i = \sum_{\{j | (j, i) \in E\}} K_j \text{ és } w_i = \sum_{\{j | (j, i) \in E\}} w_j \end{aligned} \quad (26)$$

A munkaügyi szabályoknak megfelelő korlátozások

A járművezetők munkaidejének maximális, illetve minimális hossza adott, illetve a pihenőidő kiadásának időpontjára is van alsó és felső korlát. Az M egy alkalmasan választott nagy konstans, lehet pl. 1440, egy nap hossza percekben.

$$\forall i \in WEnd \quad NWX - (1 - e_i) * M \leq w_i \quad (27)$$

$$\forall i \in WEnd \quad w_i \leq XWH + (1 - e_i) * M \quad (28)$$

$$\forall i \in Rest \quad RNWX - (1 - e_i) * M \leq w_i \quad (29)$$

$$\forall i \in Rest \quad w_i \leq RXWH + (1 - e_j) * M \quad (30)$$

Az erőforrásokra, nyersanyag és végtermékekre vonatkozó korlátozások

Minden járatot teljesíteni kell, maximálisan B jármű áll rendelkezésre, míg járművezetők száma maximálisan D .

$$\sum_{\{i | (i, f) \in E\}} e_i = 1 \quad (31)$$

$$\sum_{\{d | (d, i) \in E\}} e_i = \sum_{\{i | (i, r) \in E\}} e_i \leq D \quad (32)$$

$$\sum_{\{i | (i, g) \in E\}} e_i = \sum_{\{b | (b, i) \in E\}} e_i \leq B \quad (33)$$

Célfüggvény

Egy lehetséges cél, amit az optimalizálásnál kitűzhetünk, a munkaidő hatékony kihasználása, azaz a járművezetők várakozással töltött idejének a minimalizálása.

$$\sum_{\{i \mid i \in WEnd\}} w_i - \sum_{\{i \mid (s, i) \in E\}} t_{si} \rightarrow \min \quad (34)$$

A MILP matematikai programozási modell méretére a következő felső becslést adhatjuk, amennyiben a járatok száma N.

MILP	bináris	egészértékű	valósértékű	korlátozás
Általános	9*N	0	18*N	62*N+5
Bp átlagos N=200	1800	0	3600	12405

8. táblázat. Felső becslés a MILP méretére

A 8. táblázatban szereplő formulák igazolása:

Mivel minden műveleti egységhez rendelünk egy bináris változót, ezért a műveleti egységeket kell megszámlálnunk. Minden járhoz tartozik egy, a járhoz rendelt részgráf, ami az első és utolsó járatokat kivéve kilenc műveleti egységet tartalmaz és az első és utolsó járhoz rendelt részgráf is legfeljebb ennyit műveleti egységet tartalmaz, tehát így a műveleti egységek számát, illetve a bináris változók számát $9*N$ értékkel biztosan felülről korlátozzuk. A PEnd műveleti egység még jelentene +1 műveleti egységet, de az első járatnál viszont ChangeWStart_1 hiányzik, így ezt nem kell figyelembe venni a számolásnál.

Mivel minden műveleti egységhez rendelünk két valós változót - az előző számolást felhasználva - a valós értékű változók száma $18*N$ értékkel felülről korlátozható.

Az egyenlőtlenségek számának felső becslését a következőképpen határozzuk meg:

(22) formula $12*N$ korlátozás

Mivel az utolsó járat kivételével - ahol kevesebb állapot van - minden járhoz 6 darab állapot tartozik, ezért ha a (22) formulát részletesen kifejtjük, látjuk, hogy

(22a) egyenlőségből legfeljebb $6*N$ darab van

(22b) egyenlőtlenségből legfeljebb $6*N$ darab van

(23) formula $27*N$ korlátozás

Mivel a műveleti egységek számának felső korlátja $9*N$, így a (23) formula legfeljebb $9*N$ egyenlőtlenséget és legfeljebb $18*N$ egyenlőtlenséget határoz meg.

(24) formula $3*N$ korlátozás

Mivel Turn elemszáma nyilván N, a (24) formula legfeljebb N egyenlőtlenséget és $2*N$ egyenlőséget határoz meg.

(25) formula $4*N$ korlátozás

Mivel H elemszáma legfeljebb $2*N$, így a (24) formula legfeljebb $4*N$ egyenlőséget határoz meg

(26) formula $12*N$ korlátozás

Az állapotok felső korlátja $6*N$, így a (26) formula legfeljebb $12*N$ egyenletet határoz meg.

(27) formula N korlátozás

(28) formula N korlátozás

(29) formula N korlátozás

(30) formula N korlátozás

Mivel mind a WEnd mint, Rest műveletből N darab van, így a (27), (28), (29), (30) formulák mind N darab egyenlőtlenséget határoznak meg.

(31) formula 1 korlátozás

(32) formula 2 korlátozás

(33) formula 2 korlátozás

Mindösszesen $62*N+5$ korlátozás.

6.6 4. tézis

A városi buszközlekedés esetén a tetszőleges járatindítású menetrend típusok P-gráf módszertanra alapozott magvalósítását tanulmányoztam és a következő eredményeket értem el:

- Megadtam az említett feladatosztályhoz az adekvát maximális struktúrát.
- Meghatároztam annak szerkezeti jellemzőit, melyek alapján egy konkrét menetrend-megvalósítási feladat maximális struktúráját generálni lehet.
- Megadtam az alapvető jellemzők függvényében a maximális struktúra (P-gráf) méretét, a csúcsok és az élek darabszámát típusonként.
- Megadtam a maximális struktúrához tartozó MILP matematikai programozási modellt.
- Megadtam az alapvető jellemzők függvényében a MILP méretét, külön a korlátozási feltételek darabszámát, valamint a változók darabszámát bináris, egész és valós típusonként.

Kapcsolódó publikációk

Zsolt, Ercsey ; Albert, Nagy ; József, Tick ; Zoltán, Kovács, Bus Transport Process Networks with Arbitrary Launching Times, ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 2021 pp. 1-17. , 17 p. (2021)
Folyóiratcikk/Szaccikk (Folyóiratcikk)/Tudományos[31921669] [Nyilvános]

7 Összefoglalás

A városi buszközlekedést vizsgálva megállapítottam, hogy a gyakorlati menetrend megvalósítás területén komoly kihívást jelent az erőforrások leghatékonyabb felhasználása. Már néhány százezer fős városok esetén is nehezen kezelhető, összetett feladattal állunk szemben, amely tovább bonyolódhat, ha a jogszabályokat, munkaügyi szabályokat, az érdekképviselési és egyéni igényeket is figyelembe vesszük. A kutatásom során arra is figyelemmel kellett lenni, hogy a buszközlekedési szolgáltatók elvárása sok esetben nem csak az optimális megoldás megtalálása, hanem egy viszonylag rövid idő alatt kiszámítható és megvalósítható módszer alkalmazása legyen.

Tanulmányoztam az informatikai rendszerekből származó adatokat és adatbányászati eszközök segítségével megvizsgáltam, hogy a működési hatékonyságot hogyan befolyásolja a járművezetők munkaideje és a járművek műszaki állapota. Bár megállapítottam, hogy a járműállomány műszaki állapota hatással van a működési hatékonyságra, azonban ennek további vizsgálata túlmutatott a kutatási irányaimon. A vizsgálatom középpontjába a járművezetők munkaidejének kihasználtságára irányuló célzott optimalizációs eljárások kidolgozását és bevezetését helyeztem.

A kutatásom során kialakítottam egy olyan menetrend megvalósítási módszert, amely alkalmas a rendelkezésre álló erőforrások hatékonyabb felhasználására, figyelembe veszi azok mennyiségi és minőségi paramétereit. Kimutattam, hogy a munkaidő optimális kihasználása révén az üzemi tervezés hatékonyabbá tehető. Az általam javasolt munkaidő-optimalizálási módszer jobban megfelel a gyakorlati alkalmazásoknak, mint a szakirodalomban található elméleti megoldások. Két valós példán keresztül megvizsgáltam a főbb menetrendi mutatószámokat, úgymint a szolgálatok idejét, a tartózkodási időt, a jármű üzemórát és a menetrendkészítés idejét. Ezekkel igazoltam a kutatási eredményeket. A számítási eredmények alapján a mutatók mindegyike csökkent az eljárás alkalmazásával. A módszernek köszönhetően több mint tíz százalék csökkenést sikerült elérni a tartózkodási időben, és ezzel együtt sikerült hatékonyabbá tenni a járművek üzemórát is, ami igazolta, hogy a módszer alkalmas a hatékony erőforrás-gazdálkodás megvalósítására. A járművezetők tartózkodási idejéből a nem vezetéssel és nem pihenéssel töltött idő tekintetében társasági szinten akár évi több tízmillió forintos nagyságrendű megtakarítás prognosztizálható. Az eszközrendszer bevezetése konkrét gazdasági előnyt jelent a közlekedési szolgáltató számára.

Vizsgálattal igazoltam az általam alkalmazott módszert, azonban ipari szintű alkalmazása egy Budapest nagyságrendű városra komoly számítási kapacitási nehézségeket vet fel a matematikai modellel generált magas változószámok miatt. A további kutatásom középpontjába ezért egy olyan folyamathálózat szintézis alapú modell vizsgálata került, melynek a matematikai háttere megalapozott. Eddig nem volt olyan elérhető módszer, amely garantáltan optimális feladatmegoldáshoz vezetne. Mivel a P-gráf módszert számos alkalmazási területre sikeresen felhasználták, ezért az eddig alkalmazottaktól eltérően, újszerű megközelítéssel a PNS módszertant adaptáltam a városi buszközlekedési feladatosztályra.

Egy átlagos budapesti járatszám mellett a P-gráf módszeren alapuló modell becsült változószáma mintegy ötödére csökkent, ezáltal kisebb kapacitás szükségletet igényel a számítási infrastruktúrán. Míg a szakirodalomban megismert módszerek esetében a feladat megoldására egyetlen nagyméretű matematikai modell került felírásra, addig a P-gráf módszer alkalmazásával lehetőségünk van több lépésben, több kisebb méretű matematikai modell megoldásán keresztül eljutni az optimális megoldáshoz, továbbá lehetőség van másodlagos optimalizálási szempontokat is figyelembe venni.

A munkaidő-optimalizálási módszer kutatási eredményei igazolták az algoritmikus menetrend megvalósítás előnyeit a jelenleg alkalmazott kézi megoldásokhoz képest. Ugyanakkor a klasszikus matematikai megoldási módszerekkel szemben a folyamathálózat szintézis alapú modell, mind az alkalmazhatóság, mind pedig az erőforrások felhasználása tekintetében hatékonyabbnak bizonyult.

8 Továbbfejlesztési lehetőségek

A menetrend megvalósítási feladat P-gráf alapú modellezésének eddigi elméleti eredményei alapján folytatni tervezem a kutatást.

A további vizsgálatok arra irányulnak, hogy egy ipari méretű alkalmazás során a kidolgozott modell a szükséges és elvárt szempontokkal kiegészítve valós ütemezési feladatokat oldjon meg. További specifikus feltételeket tervezek beépíteni a modellbe, amelyek valós alkalmazási környezetből származnak.

A célom egy olyan termékszintű szoftver előállítása, amely képes támogatni egy Budapest méretű városban a buszközlekedés valós idejű, napi szintű menetrend megvalósítási feladatait. Távlati célom a modell kiterjesztése a közösségi közlekedésben előforduló más járműtípusokra is.

9 Új tudományos eredmények

1. tézis

Kialakítottam a BKV informatikai rendszeréhez releváns olyan információs technológiai modellt, amely képes összekapcsolni az adott üzleti rendszereket, és azokból valós időben naprakész adatokat szolgáltat.

Igazoltam, hogy az üzemi menetrend hatékonyabb megvalósítása, annak algoritmikus támogatása nem valósítható meg a Big data jellegű megközelítés nélkül a forrásrendszerekből származó nagy adatmennyiség és a komplexitás miatt.

Big data alapú módszerrel elemeztem a BKV-nál rendelkezésre álló adatokat, melynek eredményeképpen rámutattam a buszközlekedés üzemi menetrend-megvalósítás területén az egzakt optimalizáltság hiányára.

Meghatároztam, hogy a jármű oldali hatékonyságjavítási törekvések jelen kutatás szempontjából nem reálisak, ugyanakkor a munkaidő jobb szervezésével jelentős hatékonyságnövekedést lehet elérni.

Vizsgálattal kimutattam, hogy a munkaidő hatékonyabb kihasználása révén az üzemi tervezés tovább javítható.

Ezen belül:

- Azonosítottam a BKV-nál rendelkezésre álló adatvagyonból a vizsgálatba bevont forrás rendszereket, az érintett adatok halmazát, szükséges eszköztárat és megvizsgáltam a kapcsolódásaikat.
- Az elemzési célok elérése érdekében meghatároztam a forrás rendszerek adatköreit, amely alapján az adekvát adatmodell felépíthető.
- Elkészítettem a BKV forgalmi alaprendszerének tevékenység szintű adataira, valamint a forgalmi összesítő adataira vonatkozó megfelelő részletezettségű adatmodellt.
- Az adatmodell felhasználásával a vizsgálatom szempontjából releváns elemzéseket elvégeztem.
- Felderítettem a menetrendi eltérések függőségeit.
- A Big data analízis során felderítettem az adatok mögött húzódó összefüggéseket.
- Megterveztem a BI lekérdező eszköz segítségével előállított eredmények vizualizációját.
- Kutatásaim révén összefüggést találtam a munkaidőn belüli tartózkodási idő kihasználatlanságára és megállapítottam a működési hatékonyságra vonatkozó eljárások beavatkozási pontjait.

2. tézis

A Huisman és munkatársai által kidolgozott és publikált, klasszikus VCSP modellt kiterjesztettem az üzemanyag fogyasztás és a parkolási korlátozások kezelésére, szem előtt tartva az integrált megközelítést és a gyakorlati alkalmazhatóságot, nevezetesen a BKV specifikus elvárásokat és adottságokat.

Bevezettem egy úgynevezett járatösszevonási eljárást, amely a feladat méretének a csökkenését eredményezte.

Esettanulmányban meghatároztam a szolgálati számokat és megállapítottam, hogy a menetrend költségelemei, a járműüzemóra, az összes munkaóra mindegyike csökkent. A módszernek köszönhetően

az eddigi gyakorlati működéshez képest több mint 10% csökkentést sikerült elérni a tartózkodási idő tekintetében, és ezzel együtt sikerült hatékonyabbá tenni a járművek üzemidejét is.

Igazoltam, hogy a módszer alkalmas a hatékony erőforrás-gazdálkodás tervezésére a rendelkezésre álló mennyiségi és minőségi paraméterek figyelembevételével.

- A gyakorlati menetrend megvalósítás folyamatainak ismeretében kidolgoztam ennek az elméleti módszernek az alkalmazásba vételének lépéseit.
- Meghatároztam a kombinált jármű- és személyzet ütemezés optimalizáló modell legfontosabb elemeit, a modellt leíró gráf jellemzőit, amelyen a matematikai programozási modell alapul.
- Definiáltam az eljárás főbb lépéseit.
- Meghatároztam az előfeltételeket, bemenő paramétereket, kiemelt figyelemmel a tartózkodási időre, illetve a munkaugyi szabályokra.
- Felépítettem a matematikai programozási modellt, ami a Huisman által részletesen leírt VCSP modell adaptált változata.
- Az algoritmust kiterjesztettem egyrészt az üzemanyag fogyasztás, másrészt a parkolási korlátozások kezelésére.
- A feladat méretének a csökkentése érdekében járatösszevonási technikát dolgoztam ki.
- Elvégeztem a matematikai modell formális leírását.
- A BKV gyakorlatában előforduló példák közül konkrét eseteken keresztül bemutattam a számítási eredményeket.

3. tézis

A klasszikus PNS módszertant adaptáltam a városi buszközlekedési feladatosztályra, megadtam az anyagáramok és műveleti egységek adekvát értelmezését, valamint a lehetséges megoldás-struktúra fogalmát értelmeztem a feladatosztályra. Az adekvát értelmezéshez egy további új tulajdonságot vezettem be. Az ütemes menetrend típusokra meghatároztam az adekvát maximális struktúra szerkezeti jellemzőit, melyek alapján egy konkrét menetrend megvalósítási feladat maximális struktúráját lehet generálni.

- A városi buszközlekedés menetrend-megvalósítási feladatosztályt azonosítottam a PNS módszertan keretein belül
- Megállapítottam, hogy a strukturális vizsgálatoknak alapvető szerepe van a megoldás során.
- Megadtam a maximális struktúrához tartozó MILP matematikai programozási modellt.
- Megadtam az alapvető jellemzők függvényében a MILP méreteinek felső korlátjait, ami mutatja, hogy a modell milyen nagyságrendben reálisan megoldható.
- Megállapítottam, hogy azáltal, hogy ezen módszer alkalmazása során a strukturálisan lehetséges megoldásokra kerül felírásra az alkalmazott matematikai programozási modell, ezért a memória, számítási kapacitás és idő, mint különböző erőforrások felhasználása hatékonyabb, mint a klasszikus megoldási módszerek alkalmazása során.

4. tézis

A városi buszközlekedés esetén a tetszőleges járatindítású menetrend típusok P-gráf módszertanra alapozott magvalósítását tanulmányoztam és a következő eredményeket értem el:

- Megadtam az említett feladatosztályhoz az adekvát maximális struktúrát.
- Meghatároztam annak szerkezeti jellemzőit, melyek alapján egy konkrét menetrend-megvalósítási feladat maximális struktúráját generálni lehet.

- Megadtam az alapvető jellemzők függvényében a maximális struktúra (P-gráf) méretét, a csúcsok és az élek darabszámát típusonként.
- Megadtam a maximális struktúrához tartozó MILP matematikai programozási modellt.
- Megadtam az alapvető jellemzők függvényében a MILP méretét, külön a korlátozási feltételek darabszámát, valamint a változók darabszámát bináris, egész és valós típusonként.

Publikációk

A PhD dolgozat témakörében megjelent publikációim

Lektorált nemzetközi folyóiratcikkek

1. [Nagy, Albert ; Ercsey, Zsolt ; Tick, Jozsef ; Kovacs, Zoltan](#)
[Bus Transport Process Network Synthesis](#)
ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 16 : 7 pp. 25-43. , 19 p. (2019)
[DOI WoS Scopus](#)
Folyóiratcikk/Szakcikk (Folyóiratcikk)/Tudományos [30830749]
2. [Békési, József ; Nagy, Albert](#)
[Combined Vehicle and Driver Scheduling with Fuel Consumption and Parking Constraints: a Case Study](#)
ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 17 : 7 pp. 45-65. , 21 p. (2020)
[DOI WoS Egyéb URL](#)
Folyóiratcikk/Szakcikk (Folyóiratcikk)/Tudományos [31649321]
3. [Zsolt, Ercsey ; Albert, Nagy ; József, Tick ; Kovacs, Zoltan](#)
[Bus Transport Process Networks with Arbitrary Launching Times](#)
ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 2021 pp. 1-17. , 17 p. (2021)
Folyóiratcikk/Szakcikk (Folyóiratcikk)/Tudományos [31921669]

Lektorált nemzetközi konferencia kiadványokban megjelent cikkek

1. [Albert, Nagy ; József, Tick](#)
[Improving Transport Management with Big Data Analytics](#)
In: Szakál, A (szerk.) [2016 IEEE 14TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT SYSTEMS AND INFORMATICS \(SISY\)](#)
New York (NY), Amerikai Egyesült Államok : IEEE (2016) 278 p. pp. 199-203. , 5 p.
Könyvrészlet/Konferenciaközlemény (Könyvrészlet)/Tudományos [3167624]
2. [Albert, Nagy ; József, Tick](#)
[Review of Predictive Analytics Vendors for Transport Management Systems](#)
In: Szakál, Anikó (szerk.) [2017 IEEE 15th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics \(SISY\) : 15th IEEE International Symposium on Intelligent Systems and Informatics](#)
New York (NY), Amerikai Egyesült Államok : IEEE, (2017) pp. 225-230. , 6 p.
[DOI IEEE Xplore WoS](#)
Könyvrészlet/Konferenciaközlemény (Könyvrészlet)/Tudományos [3295022]
3. [Albert, Nagy ; József, Tick](#)
[Modeling of operative planning solution for transport management systems](#)

In: Szakál, Anikó (szerk.) [Proceedings of 22nd IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems 2018 \(INES 2018\)](#)

Budapest, Magyarország : IEEE Hungary Section (2018) 441 p. pp. 401-406. , 6 p.
Könyvrészlet/Konferenciaközlemény (Könyvrészlet)/Tudományos [3412084]

4. [Albert, Nagy ; József, Tick](#)

[Tasks of operative planning for transport management systems](#)

In: Szakál, Anikó (szerk.) [2019 IEEE 17TH WORLD SYMPOSIUM ON APPLIED MACHINE INTELLIGENCE AND INFORMATICS \(SAMI 2019\)](#)

Herlany, Szlovákia : IEEE (2019) pp. 199-204. , 5 p.

Könyvrészlet/Konferenciaközlemény (Könyvrészlet)/Tudományos [30430073]

5. [Albert, Nagy ; József, Tick](#)

[Modeling of bus transport operative planning tasks](#)

In: Szakál, A (szerk.) [IEEE 18th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics \(SAMI 2020\)](#)

Piscataway (NJ), Amerikai Egyesült Államok : IEEE (2020) pp. 89-94. , 6 p.

[DOI Egyéb URL](#)

Könyvrészlet/Konferenciaközlemény (Könyvrészlet)/Tudományos [31183610]

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Fülöp Gábor, Dr. Horváth Balázs, Dr. László György, Dr. Prileszky István és Szabó Lajos, Közforgalmú Közlekedés I-II., Széchenyi István Egyetem: közlekedésmérnök szak, Jegyzetek.
- [2] Az Európai Közösségek Bizottsága, A Bizottság közleménye az Európai Parlamentnek, a Tanácsnak, az Európai Gazdasági és Szociális Bizottságnak és a Régiók Bizottságának, A városi mobilitás cselekvési terve, Brüsszel, 2009.09.30. com (2009) 490.
- [3] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Dynamics. Lekérdezés: 2020. május. <https://population.un.org/wup/Download/>.
- [4] Zöld Könyv, A városi mobilitás új kultúrája felé, Brüsszel, 2007.09.25., COM (2007) 551.
- [5] G. B. Dantzig és J. H. Ramser, The truck dispatching problem. *Management Science*, 6:80-91, 1959.
- [6] Clarke G. és Wright J. R., Scheduling of Vehicle Routing Problem from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, 12, 568-581.,1964.
- [7] D. L. Applegate, R. E. Bixby, V. Chvátal és W. J. Cook, *The Traveling Salesman Problem : A Computational Study*, Seattle: ThriftBooks, 2007.
- [8] P. Toth és D. Vigo, An overview of vehicle routing problems. *The Vehicle Routing Problem*, Society of Industrial and Applied Mathematics, 2002.
- [9] Barany Mate, Modeling Vehicle Routing Problems as Process-Network Synthesis Problems, Industrial Applications of the P-Graph Framework, PhD dissertation, University of Pannonia, 2015.
- [10] M. Frits, Algoritmusok és informatikai rendszerek kidolgozása ipari folyamatok ütemezésének és kapacitás elosztásának együttes optimalizálására, doktori értekezés, 2020.
- [11] L. Bodin, B. Golden, A. Assad és M. Ball, Routing and Scheduling of Vehicles and Crews: The State of the Art, *Computers and Operations Research*, 10, 63-211, 1983.
- [12] N. Kliewer, T. Mellouli és L. Suhl, A time-space network based exact optimization model for multi-depot bus scheduling, *European Journal of Operational Research*, 175, 1616-1627, 2006.
- [13] A. Löbel, Optimal Vehicle Scheduling in Public Transit, PhD. thesis, Technische Univesitaet at Berlin, 1997.
- [14] C. Ribeiro és F. Soumis, A Column Generation Approach to the Multiple-Depot Vehicle Scheduling Problem, *Operations Research*, 41-52, 1994.
- [15] A. Hadjar, O. Marcotte és F. Soumis, A Branch-and-Cut Algorithm for the Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem, Montreal: Les Cahiers du Gerard, 2001.
- [16] B. Dávid és M. Krész, Application Oriented Variable Fixing Methods for the Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem, *Acta Cybernetica*, 21(1), 53-73, 2013.

- [17] J. L. Saha, An algorithm for bus scheduling problems, *Operational Research Quarterly*, 21(4), 463-474, 1972.
- [18] A. Bertossi, P. Carraresi és G. Gallo, On Some Matching Problems Arising in Vehicle Scheduling Models, *Networks*, 17, 271-281, 1987.
- [19] J. Békési, B. Dávid és M. Krész, Integrated Vehicle Scheduling and Vehicle Assignment, *Acta Cybernetica*, 23, 783-800, 2018.
- [20] J. Adler és P. Mirchandani, The vehicle scheduling problem for fleets with alternative-fuel vehicles, *Transportation Science*, 51, 441-456, 2016.
- [21] J. Li, Transit bus scheduling with limited energy, *Transportation Science*, 521-539, 2013.
- [22] J. Li, Battery-electric transit bus developments and operations: A review, *International Journal of Sustainable Transportation*, 10(3), 157-169, 2016.
- [23] J.-Q. Li és K. Head, Sustainability provisions in the bus-scheduling problem, *Transportation Research Part D.*, 49, 50-60, 2009.
- [24] A. Rabl, „Environmental benefits of natural gas for buses, *Transportation Research Part D.*, 7, 391-405,” 2002.
- [25] B. Dávid és M. Krész, Multi-depot bus schedule assignment with parking and maintenance constraints for intercity transportation over a planning period, *Transportation Letters*, 12(1), 66-75, 2020.
- [26] B. Dávid és M. Krész, The dynamic vehicle rescheduling problem, *Central European Journal of Operations Research*, 25(4), 809-830, 2017.
- [27] A. Haghani és Y. Shafahi, „Bus maintenance systems and maintenance scheduling: model formulations and solution, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36(5), 453-482,” 2002.
- [28] R. Kwan, A. Kwan és A. Wren, Evolutionary Driver Scheduling with Relief Chains, *Evolutionary Computation*, 9, 445-460, 2001.
- [29] J. Li, A Self-Adjusting Algorithm for Driver Scheduling, *Journal of Heuristics*, 351-367, 2005.
- [30] A. Wren, S. Fores, A. Kwan, R. Kwan, M. Parker és L. Proll, A flexible system for scheduling drivers, *Journal of Scheduling*, 6(5), 437-455, 2003.
- [31] M. Garey és D. Johnson, *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, San Fransisco: Freeman, 1979.
- [32] A. Tóth és M. Krész, A flexible framework for driver scheduling, In *Proceedings of the 11th International Symposium on Operational Research, Slovenia.*, 2011.
- [33] A. Tóth és M. Krész, An efficient solution approach for real-world scheduling problems in urban bus transportation, *Central European Journal of Operations Research*, 21, 75-94, 2013.

- [34] O. Ibarra-Rojas, R. Giesen és Y. Rios-Solis, An integrated approach for timetabling and vehicle scheduling problems to analyze the trade-off between level of service and operating costs of transit networks, *Transportation Research Part B*, 70, 35-46, 2014.
- [35] K. Haase és C. Friberg, An exact branch and cut algorithm for the vehicle and crew scheduling problem, In *Computer-Aided Transit Scheduling*, Berlin: Springer, 1999.
- [36] M. Desrochers és F. Soumis, A column generation approach to the urban transit crew scheduling problem, *Transportation Science*, 23(1), 1-13, 1989.
- [37] A. Gaffi és M. Nonato, An integrated approach to the extra-urban crew and vehicle scheduling problem, In *Computer-Aided Transit Scheduling*, (ed. N.H.M. Wilson), Berlin: Springer, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems.
- [38] D. Huisman, R. Freling és A. Wagelmans, Multiple-depot integrated vehicle and crew scheduling, *Transportation Science*, 39, 491-502, 2005.
- [39] D. Huisman, Thesis - Integrated and Dynamic Vehicle and Crew Scheduling, 2004.
- [40] R. Freling, D. Huisman és A. Wagelmans, Models and algorithms for integration of vehicle and crew scheduling, *Journal of Scheduling*, 6, 63-85, 2003.
- [41] K. Haase, G. Desaulniers és J. Desrosiers, Simultaneous vehicle and crew scheduling in urban mass transit systems, *Transportation Science*, 35(3), 286-303, 2001.
- [42] M. Mesquita és A. Paias, Set partitioning/covering-based approaches for the integrated vehicle and crew scheduling problem, *Computers and Operations Research*, 35, 1562-1575, 2008.
- [43] M. Horváth és T. Kis, Computing strong lower and upper bounds for the integrated multiple-depot vehicle and crew scheduling problem with branch-and-price, *Central European Journal of Operations Research*, 27, 39-67, 2019.
- [44] I. Steinzen, V. Gintner, L. Suhl és Kliewer, A Time-Space Network Approach for the Integrated Vehicle- and Crew-Scheduling Problem with Multiple Depots, *Transportation Science*, 4(3), 367-382, 2010.
- [45] F. Friedler, K. Tarjan, Y. Huang és L. Fan, Graph-theoretic approach to process synthesis: axioms and theorems, *Chemical Engineering Science*, 47(8): 1973-1988, 1992.
- [46] F. Friedler, K. Tarjan, Y. Huang és L. Fan., Combinatorial Algorithms for Process Synthesis, *Computers Chemical Engineering*, 16, 313-320, 1992.
- [47] Z. Kovacs, Z. Ercsey, F. Friedler és L. Fan., Exact super-structure for the synthesis of separation-networks with multiple feed-streams and sharp separators, *Computers and Chemical Engineering*, 1007-1010, 1999.
- [48] Z. Kovacs, Z. Ercsey, F. Friedler és L. Fan., Separation-network synthesis: global optimum through rigorous super-structure, *Computers and Chemical Engineering*, 24:(8) pp.1881-1900, 2000.
- [49] B. Bertok, R. Adonyi és F. Friedler, Optimal Design of Supply Chains by the P-Graph Framework, *Computer-Aided Chemical Engineering*, 25:pp 1445-1450, 2009.

- [50] M. Barany, B. Bertók, Z. Kovacs, F. Friedler és L. Fan., Solving vehicle assignment problems by process-network synthesis to minimize cost and environmental impact of transportation, 2011.
- [51] J. Garcia-Ojeda, B. Bertok és F. Friedler, Planning evacuation routes with the P-graph framework, *Chemical Engineering Transactions*, 29, 1531-1536, 2012.
- [52] H. Lam, J. Klemes, P. Varbanov és Z. Kravanja, P-graph synthesis of open-structure biomass networks, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 172-180, 2012.
- [53] J. Tick, P-Graph-based Workflow Modelling, *Acta Polytechnica Hungarica*, 4:1 pp. 75-88, 2007.
- [54] J. Tick, C. Imreh és Z. Kovács, Business Process Modeling and the Robust PNS Problem, *Acta Polytechnica Hungarica*, Volume 10, Issue Number 6, 193-204, 2013.
- [55] D. Almási, I. Cs. T és J. Tick, Heuristic Algorithms for the Robust PNS Problem, *Acta Polytechnica Hungarica*, 11:4 pp. 169-181, 2014.
- [56] J. García-Ojeda, B. Bertok, F. Friedler, A. Argoti és L. Fan, A preliminary study of the application of the P- graph methodology for organization-based multiagent system designs: Assessment, *Acta Polytechnica Hungarica*, 12:2 pp. 103-122, 2015.
- [57] I. Heckl, L. Halász, A. Szlama, H. Cabezas és F. Friedler, Process synthesis involving multi-period operations by the P-graphframework, *Computers and Chemical Engineering*, 83 pp. 157-164, 2015.
- [58] M. Atkins, Walmsley, T.G., Ong, B.H.Y., Walmsley, M.R.W., Neale és J.R., Application of P-graph techniques for efficient use of wood processing residues in biorefineries, *Chemical Engineering Transactions*, 52, 499-504, 2016.
- [59] N. Vincze, Z. Ercsey, T. Kovács , J. Tick és Z. Kovács, Process network solution of extended CPM problems with alternatives, *Acta Polytechnica Hungarica*, 13:3 pp. 101-117, 2016.
- [60] Ercsey Zsolt, Process network solution of a clothing manufacturer's problem, *Pollack Periodica*, 12:(1) pp. 59-67, 2017.
- [61] Benjamin, M.F.D., C. Cayamanda, R. Tan és L. Razon, P-graph approach to criticality analysis in integrated bioenergy systems, *Clean Techn Environ Policy*, 19: 1841-1854, 2017.
- [62] Aviso, K.B., J.-Y. Lee, J. Dulatre, V. Madria, J. Okusa és R. Tan, A P-graph model for multi-period optimization of sustainable energy systems, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 161, pp. 1338-1351, 2017.
- [63] Z. Kovacs, Z. Ercsey, F. Friedler és L. Fan, Redundancy in a separation-network, *Hungarian journal of industry and chemistry*, 26:3 pp. 213-219, 1998.
- [64] A. Bartos és B. Bertok, Production line balancing by P-graphs, 2019.
- [65] B. Bertók és A. Bartos , Renewable energy storage and distribution scheduling for microgrids by exploiting recent developments in process network synthesis, *Journal of Cleaner Production*, Volume 244., 118520, January 2020.

- [66] E. Sanmarti, L. Puigjaner, T. Holczinger és F. Friedler, Combinatorial framework for effective scheduling of multipurpose batch plants, *Aiche Journal*, 48:11 pp. 2557-2570, 2002.
- [67] Z. Sule, B. Bertok, F. Friedler és L. Fan, Optimal design of supply chains by P-graph framework under uncertainties, *Chem Eng* 25: 453-458, 2011.
- [68] H. Cabezas, A. Argoti, F. Friedler, P. Mizsey és J. Pimentel, Design and Engineering of Sustainable Process Systems and Supply Chains by the P-Graph Framework, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 37. No. 2., 624-636, 2018.
- [69] R. Tan, K. Aviso és D. Foo, P-graph and Monte Carlo simulation Approach to planning carbon management networks, *Computers & Chemical Engineering*, 106, 872-882, 2017.
- [70] É. König és B. Bertók, Process graph approach for two-stage decision making: Transportation contracts, *Computers and Chemical Engineering*, 121, 1-11, 2019.
- [71] Y. Fan, J. Klemeš, T. Walmsley és B. Bertók, Implementing Circular Economy in municipal solid waste treatment system using P-graph, *Science of the Total Environment*, 701, 134652, 2020.
- [72] R. Tan és K. Aviso, An extended P-graph approach to process network synthesis for multi-period operations, *Comput Chem Eng*, 85:40, 2016.
- [73] M. Meilton, Selecting and implementing a computer aided scheduling system for a large bus company, *Algorithms: Combinatorial Analysis*. In *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, Berlin: Springer-Verlag, 2001.
- [74] G. Desaulniers és M. Hickman, Public transit, *Handbooks in operations research and management science*, Vol.14. Chapter 2, Elsevier B.V., 2007.
- [75] A. Ceder, *Public Transit Planning and Operation: Theory Modeling and Practice*, Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2007.
- [76] Tan, P.-N., Steinbach, M., Kumar és V., *Adatbányászat (Alapvetés)*, Budapest: Taramix Kft., 2012.
- [77] Chu és Wesley W., *Data Mining and Knowledge Discovery for Big data Methodologies, Challenge and Opportunities*, Springer, 2014.
- [78] Mayer-Schönberger, V., Cukier és K., *Big Data (Forradalmi módszer, amely megváltoztatja munkánkat, gondolkodásunkat és egész életünket)*, Budapest: HVG Kiadó Zrt., 2014.
- [79] Bógel György, *A BIG DATA ökoszisztémája*, Budapest: Typotex Kiadó, 2016.
- [80] Yu, S. and Guo és S., *Big Data Concepts, Theories, and Applications*, Springer, 2016.
- [81] A. Gandomi és M. Haider, Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics, *International Journal of Information Management*, 137-144, 2015.
- [82] Z. Blázsik és B. Imreh, A Note on Connection between PNS and Set Covering Problems, *Acta Cybernetica*, 309-312, 1996.

- [83] J. Fülöp, B. Imreh és F. Friedler, On the reformulation of some classes of PNS problems as set covering problems, *Acta Cybernetica*, 329-337, 1998.
- [84] B. Imreh, J. Fülöp és Friedler F., A note on the equivalence of the set covering and Process Network Synthesis problems, *Acta Cybernetica*, 497-501, 2000.

1. sz. melléklet
Számítási eredmények

Vizsgált eset száma	Járatok száma (u)	Járművek száma (k)	Járműtípusok száma	Telephelyek száma (d)	Gráfjellemzői		Matematikai modell		Számítási eredmények	
					Csúcsok száma	Élek száma	Oszlopok	Sorok	Szolgáltatások száma	Futási idő (sec)
1	162	10	1	1	164	3698	10394	5720	6448	8
2	193	10	2	2	108	11023	138947	27977	127432	998
3	87	6	2	1	91	4164	51038	9595	46608	138
4	444	11	1	1	157	4427	1057822	10600	1053086	11364
5	95	3	1	1	99	1604	48701	3978	46947	543
6	201	7	2	2	209	22850	534540	57263	510926	5199
7	329	21	5	2	349	10459	97909	26709	85869	49
8	134	6	2	2	142	5808	17712	14249	11495	134
9	229	6	2	1	233	8330	511724	20834	502702	4467
10	116	5	1	1	118	781	92720	1997	91756	42
11	134	6	2	2	142	5808	17712	14249	11495	27
12	167	9	5	1	177	4309	62791	10771	57875	35
13	196	15	2	4	212	22612	42940	48478	19337	679
14	98	7	1	2	102	9836	129443	24910	119306	1212
15	245	9	1	1	247	4374	165221	9488	160352	6432
16	811	20	2	2	216	12734	278084	29791	264298	17570
17	123	5	1	1	133	9032	288527	21386	279244	1506
18	811	20	1	1	216	12499	382253	31219	369327	25170
19	162	10	1	1	166	3763	32065	9869	27973	1512
20	149	7	1	1	153	6440	98304	16010	91561	1531

2. sz. melléklet

A maximális struktúra algoritmikus generálásának pszeudo kódja

A maximális struktúra algoritmikus generálásának pszeudo kódja a következő fő lépésekből áll:

Első lépésként felvesszük a nyersanyagokat, végtermékeket, valamint az egyetlen speciális PEnd műveletet.

Majd minden járatra felvesszük az ábra szerinti piros részgráfot, de az első és utolsó járatához tartozót - speciális helyzetük miatt – csökkentett terjedelemben tesszük meg.

A MaxStr egy $G(M,O,E)$ páros, irányított gráf

$M = R \cup P \cup I$ nyersanyagok, végtermékek, köztes anyagok halmazai

$O =$ műveleti egységek halmaza

$E =$ a gráf éleinek halmaza

Create_MaxStr(N)

```
{      MaxNum = 0          M=R=P=I=O=E=∅
      Insert_Vertex(R, Bus )
      Insert_Vertex(R, DriverStart )
      Insert_Vertex(P,FulFilled)
      Insert_Vertex(P,Garage )
      Insert_Vertex(P,DriverEnd)
      Insert_PEnd()          // a PEnd műveleti egység felvétele
      for i=1 to N
      {
          Insert_Turn(i)      // az i. járat részgráfja az ábrán PIROS szín
      }
}
Insert_Turn(i)
{
    // műveleti egységek
    Insert_Vertex( O, Stance_i )
    Insert_Vertex( O, Turn_i )
    Insert_Vertex( O, Seccession_i )
    Insert_Vertex( O, WEnd_i )
```

```
Insert_Vertex( I, Time_i )
Insert_Vertex( I, XStance_i )
Insert_Vertex( I, XTurn_i )
Insert_Vertex( I, XSeccession_i )
```

```
// a csúcsokhoz kapcsolódó élek
```

```
Insert_Arc(DriverStart, Stance_i)
Insert_Arc(Bus, Stance_i)
Insert_Arc(Stance_i, XStance_i)
Insert_Arc(Stance_i, Time_i)
Insert_Arc(XStance_i, Turn_i)
Insert_Arc(Time_i, Turn_i)
Insert_Arc(Time_i, Seccession_i)
Insert_Arc(Turn_i, Xturn_i)
Insert_Arc(Turn_i, P_i)
Insert_Arc(XTurn_i, Seccession_i)
Insert_Arc(Seccession_i, Garage)
Insert_Arc(Seccession_i, XSeccession_i)
Insert_Arc(XSeccession_i, WEnd_i)
Insert_Arc(WEnd_i, DriverEnd)
```

```
if i>1 {
```

```
    // ami az első járatnál nem történhet meg
```

```
    Insert_Vertex( O, ChangeWStart_i )
    Insert_Arc(DriverStart, ChangeWstart_i)
    Insert_Arc(Wait_i-1, XStance_i)
    Insert_Arc(XChangeWEnd_i-1, ChangeWStart_i)
    Insert_Arc(ChangeWstart_i, XStance_i)
    Insert_Arc(ChangeWstart_i, Time_i)
```

```
}
```

```
if i<N {
```

// ami az utolsó járatnál nem történhet meg

Insert_Vertex(O, Go_i)

Insert_Vertex(O, Rest_i)

Insert_Vertex(O, ChangeWEnd_i)

Insert_Vertex(O, Wait_i)

Insert_Vertex(I, XRest_i)

Insert_Vertex(I, XChangeWEnd_i)

Insert_Arc(Time_i, ChangeWend_i)

Insert_Arc(Time_i, Rest_i)

Insert_Arc(XTurn_i, Go_i)

Insert_Arc(XTurn_i, Rest_i)

Insert_Arc(XTurn_i, ChangeWEnd_i)

Insert_Arc(Go_i, XRest_i)

Insert_Arc(Rest_i, XRest_i)

Insert_Arc(ChangeWend_i, XSeccession_i)

Insert_Arc(ChangeWend_i, XChangeWEnd_i)

Insert_Arc(XRest_i, Wait_i)

if i>1 {

// ami az első és utolsó járatnál sem történhet meg

Insert_Arc(Wait_i-1, XRest_i)

}

}

}

Insert_Vertex(H, Str)

{ H = H \cup { MaxNum+1 }

Str \Leftrightarrow MaxNum+1 *// hozzárendelés azaz Val(Str) = MaxNum+1 lesz*

MaxNum = MaxNum+1

}

Insert_Arc(Str1, Str2)

```
{      E=E ∪ {(Val(Str1), Val(Str2))}
}
```

Insert_PEnd()

```
{      Insert_Vertex( O, PEnd)
      for i= to N
      {      Insert_Vertex( I, P_i)
            Insert_Arc( P_i, PEnd)
      }
      Insert_Arc( PEnd, FulFilled)
}
```