

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM  
INFORMATIKA DOKTORI ISKOLA

# Gyakorlatorientált ütemezési problémák a közösségi buszközlekedésben

PhD értekezés tézisei

Dávid Balázs

Témavezető:  
Dr. Krész Miklós



Szeged, 2018



## 1. Bevezetés

A tömegközlekedési hálózatok nagy, összetett rendszert alkotnak, és az ezeket üzemeltető vállalatok napi szinten számos nehéz optimalizálási problémával találják szembe magukat. Rodrigue és szerzőtársai tanulmánya [13] szerint a közösségi közlekedés fogyasztói szokásai átalakulóban vannak, és ennek eredményeképpen a vállalatoknak újra kell értékelni az általuk nyújtott szolgáltatásokat, és újragondolni közlekedési hálózataik felépítését. Manapság azonban a közlekedési hálózatok kialakítási és fenntartási költségei is folyamatosan nőnek, egyre nehezebbé téve a vállalkozások számára, hogy úgy legyenek releváns alternatívái a személyi közlekedésnek, hogy közben hasznot is termelnek.

Egy vállalat kiadásainak nagy részét operatív kiadásai alkotják: járművek fenntartási és üzemeltetési költségei, valamint járművezetők bérei. Az ezekhez kapcsolódó optimalizálási problémák a közlekedési rendszer *operatív tervezéséhez* tartoznak. Ez a témakör három szorosan kapcsolódó részproblémát ölel fel: *járműütemezés, vezetőütemezés és műszakkiosztás*. A járműütemezés napi ütemezést készít egy menetrend járatai alapján. A járművezetők ütemezése az alkalmazottak napi műszakjait alakítja ki, figyelembe véve a napi munkaidőre vonatkozó szabályozásokat. Az így kapott napi műszakokat a műszakkiosztás rendeli a

társaság alkalmazottaihoz egy tervezési időszakon át. Az operatív tervezés támogatására optimalizáló keretrendszer készíthető, mely a klasszikus felépítés szerint szekvenciálisan oldja meg a fenti részfeladatokat, egy fázis eredményét a következő bemeneteként használva. Egy ilyen rendszer használata esetén létfontosságú, hogy minden részfeladat megoldására hatékony módszerek álljanak rendelkezésre.

A szerző disszertációjában a közösségi buszközlekedésben felmerülő ütemezési problémákat vizsgál. Téziseit öt csoportba rendszerezi, melyek mind a járművekhez kapcsolódó különböző részfeladatokat vizsgálnak. Minden ilyen csoportot egy-egy fejezetben tanulmányoz.

A szekció további részében röviden ismertetjük a járműütemezéshez kapcsolódó alapfogalmakat, majd a 2. szekciótól kezdve bemutatjuk a disszertáció eredményeit.

## **A járműütemezés alapfogalmai**

A járműütemezési probléma (vehicle scheduling problem, VSP) esetén adott a közlekedési társaság *járműflottája*, és egy naphoz tartozó *menetrend szerinti járatok* halmaza. A feladat célja a járművek járatokhoz való rendelése oly módon, hogy minden járatot pontosan egy jármű szolgáljon ki, minimális költségek mellett. A hozzárendelésnek ki kell elégíteni bizonyos feltételeket: egy járműnek képesnek kell lennie kiszolgálni minden kapcsolódó járatát, és

az adott járműhöz tartozó járatoknak páronként kompatibilisnek kell lenniük egymással. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy nem lehetnek átfedőek, valamint a járműnek rendelkeznie kell elegendő idővel ahhoz, hogy eljusson egy járat befejezési helyéről a következő járat indulási helyére.

A járművek *depókban* kezdik a tervezési időszakot, és ide is térnek vissza az időszak végén. Az időszak során egy jármű bármikor visszatérhet depójába, ha hosszabb ideig nincs kiszolgálandó járata. A depók általában garázsokat, parkolóhelyeket és hasonló helyszíneket jelentenek, ahol a jármű megvárhatja a következő tervezési időszak kezdetét. Kibővített értelmezésében a depók fogalma egy adott helyen lévő járművek típusait is meghatározhatja. Ha a feladatnak két, vagy több depót is figyelembe kell vennie, úgy egy *többdepós járműütemezési problémáról* beszélünk (Multi-Depot Vehicle Scheduling Problem, MDVSP), ami bizonyítottan NP-nehéz [4]. Az MDVSP problémák egy gyakori feltétele a *depó-kompatibilitás*: minden járat esetén az is pontosan meghatározott, hogy mely depókhoz tartozó járművek képesek kiszolgálni a járatot.

Egy *járműblokk* alatt páronként kompatibilis utazási tevékenységek sorozatát értjük. Egy járműblokk általában egyetlen jármű egész napi beosztását jelenti, és mindig kiállással kezdődik annak depójából, valamint beállással végződik ugyanerre a helyre. Az egy naphoz tartozó járműblokkok összességét hívjuk *járműütemezésnek*.

## 2. Gyakorlatorientált járműütemezési heurisztikák

Két gyakorlatorientált heurisztikus módszert mutatunk be az MDVSP-re. Ezek gyakorlatorientáltsága abból ered, hogy nem csak elméleti szempontból hatékonyak az általuk szolgáltatott megoldások, hanem felépítésük és gyors megoldási idejük miatt gyakorlatban is jól használhatóak.

### 2.1. Feladatok méretének csökkentése változófixálással

Első bemutatott módszerünk változófixálás segítségével oldja meg a VSP-t: olyan járatsorozatok azonosításával próbálja meg csökkenteni a probléma méretét, amik a végső megoldásban is nagy valószínűséggel egymáshoz fognak tartozni. Ezeket egyetlen, hosszú járáttá, ún. "stabil láncá" ragasztja össze. Az így kapott kisebb méretű probléma hatékonyan megoldható klasszikus IP-alapú módszerekkel, de eredményeiket a szokásosnál jelentősen rövidebb futásidővel kapjuk meg. A módszert a következő publikációinkban vizsgáltuk: [6, 8].

Három különböző megközelítést mutatunk be változófixálásra: az első egy költségfüggvényen alapszik, és minél "olcsóbb" járatokat próbál meg egy láncba lekötöni. A második módszer rugalmasabb láncokat készít azáltal, hogy

olyan járatokat köt le egymáshoz, amik azonos depókból szolgálhatóak ki. A harmadik megközelítés a feladat egy gyakorlati jellegzetességét használja ki: olyan járatokból épít láncot, amik azonos vonalhoz tartoznak. Mindhárom módszer jó minőségű megoldásokat szolgáltat rövid idő alatt. Valós és véletlenszerűen generált bemeneteken végzett alapos teszteléssel megmutattuk, hogy — bár elméleti szempontból az általánosan jól működő megközelítések vonzóbbak lehetnek — a feladat valós jellegzetességeit kihasználó módszerek jól teljesítenek gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából.

## 2.2. "Vezetőbarát" járműütemezés

Második módszerünk egy iteratív algoritmus, ami olyan járműütemezéseket készít, melyek szerkezete megfelel a vezetőütemezések legfontosabb szabályainak is. Először egy klasszikus VSP megoldására kerül sor, majd ennek eredményét különböző lépések módosítják. Ez a folyamat addig ismétlődik, amíg a bemenet összes járata járműblokkhoz nem tartozik. Ezt a módszert [1]-ben vezettük be.

A VSP eredményeként kapott járműblokkokat először egy vágás-és-ragasztás módszer segítségével módosítjuk úgy, hogy megfeleljenek a műszakok maximális hosszát korlátozó szabálynak. A blokkokat eredeti hosszuk alapján osztályokba soroljuk:

- $C_1$  blokkjait egyetlen vezető is végre tudja hajtani.
- $C_2$  blokkjaihoz két vezető szükséges, ezért ezeket egy nagyobb (teljes munkaidős műszak) és egy kisebb (részmunkaidős műszak) részre osztjuk.
- $C_3$  blokkjai két teljes műszakra bonthatóak.

A részmunkaidős műszakokat egy párosítási feladat segítségével osztott műszakokká kapcsoljuk össze. A pár nélkül maradt műszakokat vagy teljes munkaidősnek tekintjük, vagy töröljük a hozzájuk tartozó járatokat. A következő lépés a kötelező szüneteket osztja ki ezekbe a műszakokba. Ezeket előre meghatározott időablakokban kell kiadni. Ez egyes műszakoknál csak járatok eltávolításával lehetséges, amiket vagy más műszakokba illesztünk, vagy törölünk. Ha az iteráció után bármely lépésben töröltünk járatot, úgy új iteráció kezdődik, melynél a VSP bemenete már csak a törölt járatok halmaza lesz.

Az eredmények kiértékeléséhez egy módszert adunk, mely egy menetrend járatai alapján megbecsüli a kiszolgálásukhoz szükséges munkaidő alsó korlátját. A korlát segítségével megmutatjuk, hogy valós példákon kapott megoldásaink költségei jobbak a közlekedési társaság eredeti ütemezéseihez képest. Mivel a "vezetőbarát" módszer bármilyen megközelítést használhat a VSP megoldására, így ezek az eredményeink pár perc alatt megkaphatóak.



### **3. Integrált járműütemezés és hozzárendelés**

Bevezetjük az integrált járműütemezési és hozzárendelési problémát, ami az ütemezések kialakításakor figyelembe veszi az azokat kiszolgáló járművek igényeit is: egy jármű például kifogyhat az üzemanyagból (el kell küldeni tankolni), vagy hosszabb időszakon keresztül tétlenül várhat (ilyenkor parkolóhelyre kell irányítani). Az ilyen, és hasonló követelményeket csak kevesen kutatják. Ezeket jármű-specifikus tevékenységeknek hívjuk.

Egy halmazparticionálási modellt adunk az integrált járműütemezési és hozzárendelési problémára. Célunk egy olyan általános modell tervezése, amibe a legtöbb jármű-specifikus tevékenység beilleszthető, és rugalmas keretet nyújt a gyakorlatorientált feltételek beépítésre is. A modellre oszlopgeneráláson alapuló megoldási módszert adunk, melynek hatékonyságát véletlenszerűen generált bemene-ten mutatjuk meg. Ezekben a járművek tankolását vesszük jármű-specifikus tevékenységnek, egyszerre több üzemanyag-típust is vizsgálva, ami szintén egy keveset kutatott terület. A fenti problémát [3]-ban vezettük be.

## 4. Jármű-újraütemezés zavarok kezelésére

A járműütemezések készítése tervezési szempontból fontos feladat, de egy adott nap végére a ténylegesen végrehajtott események láncolata különbözni fog az előre elkészített tervtől. Ennek oka a napi ütemezés végrehajtása közben bekövetkező váratlan eseményekben keresendő, melyeket zavaroknak hívunk. Ilyen zavarok több különböző ok miatt is bekövetkezhetnek, mint például a késések, járművek lerobbanása, vagy teljesen új végrehajtandó feladatok megjelenése. A zavarokat minél hamarabb kezelni kell ahhoz, hogy helyreálljon a közlekedés rendje, és az ütemezés újra kiszolgálható állapotba kerüljön.

### 4.1. Többdepós jármű-újraütemezés

A jármű-újraütemezési problémára (vehicle rescheduling problem, VRSP) egy többdepós hálózati modellt adunk, ami egyetlen zavart okozó helyzetet ír le. Mivel a zavarokat valós időben kezelni kell, egy hasonló modell csak más megoldási módszerek minőségének kiértékelése szempontjából lesz hasznos eszköz. Két gyors heurisztikus módszert is ismertetünk a VRSP megoldására. Az egyik egy rekurzív algoritmus, ami bejárja a probléma által meghatározott keresési fát, és szétesztja a zavar következtében nem

kiszolgálható járatokat az ütemezés többi blokkja között (vagy egyszerű beszúrással, vagy a blokkon lévő átfedő járatok törlésével). Mivel egy ilyen keresési fa mérete túl nagy a hatékony bejáráshoz, egy gyakorlati szempontból fontos megfigyelés segítségével csökkentjük annak mélységét: a fa aktuális mélysége mindig azoknak a blokkoknak a számát adja meg, amiket módosítottunk a zavar kezelése közben. Mivel egy gyakorlati szempontból jól használható megoldás esetén ez a szám biztosan alacsony lesz (teljesen újraütemezett a járműblokkok esetében nehéz lenne a sok változtatás kommunikációja), a korlát bevezetése miatt többnyire csak kevésbé hatékony megoldásokat veszünk el. Az így kapott kisebb fa már hatékonyan, rövid idő alatt bejárható, és több jó minőségű megoldási javaslatot is szolgáltatathatunk egy társaság operátorai számára. A másik módszerünk egy tabu kereső algoritmus, ami kezdetben egy nem használható járműblokkot épít a zavar miatt nem kiszolgálható járatokból. A módszer különböző szomszédsági transzformációk segítségével keres lehetséges megoldásokat. Annak elkerülése érdekében, hogy ne a problémamentes blokkokat próbálja meg újraütemezni a módszer, jutalmazzuk az olyan lépéseket, amik ezt a kezdetben nem használható blokkot javítják, vagy onnan mozgatnak el járatokat. A tabu keresés szintén rövid idő alatt szolgáltat jó minőségű eredményt, és igény esetén több megoldási javaslatot is képes visszaadni. Mivel mindkét

módszer képes arra, hogy rövid idő alatt több megoldási javaslatot is szolgáltatson, ezért ideális jelöltek egy olyan döntéstámogató rendszer számára, ami a társaságok operatív forgalomirányításán dolgozó alkalmazottaknak segít meghozni a döntéseiket a különböző valós időben felmerülő problémák esetén. A VRSP-re adott modellt és heurisztikus módszereket [9]-ben publikáltuk.

## 4.2. Dinamikus jármű-újraütemezés

A fent bemutatott problémával párhuzamosan bevezetjük a dinamikus jármű-újraütemezés problémakörét (dynamic vehicle rescheduling problem, DVRSP). Míg az újraütemezésről megjelent publikációk szinte kivétel nélkül egyetlen zavar kezelését tekintik a fő megoldandó problémának, a mi célunk az volt, hogy egy másfajta kiértékelési szemléletmódot javasoljunk a zavarok kezelésére. Mivel egy nap folyamán zavarok sorozata következik be egy közlekedési hálózat működésében, ezek megoldásait nem különálló problémaként kell tekinteni. Míg a VRSP célja, hogy egyetlen zavart kezeljen a lehető legnagyobb hatékonysággal, addig a DVRSP a nap végéig ténylegesen végrehajtott ütemezésre vizsgálja azt, hogy az mennyiben tér el a nap kezdeti tervtől a nap során végrehajtott újraütemezések hatására. A probléma dinamikus mivolta miatt, illetve mert a bejelent (a zavarok listája) online módon érkezik, felírjuk a

feladat 'kvázi-statikus' változatát is, ami a DVRSP olyan 'offline' megfelelője, ahol minden zavar előre ismert már a nap elején. Ezzel a modellel mérhetőek a DVRSP-re adott módszerek hatékonyságai.

A DVRSP problémák megoldását mindkét fent bemutatott heurisztikával megvizsgáljuk, és ezek ebben az esetben is jó eredményeket szolgáltatnak. Egymástól függetlenül is használjuk őket DVRSP megoldására, illetve bemutatunk egy olyan kombinált esetet, ahol mindkét módszerrel kezeljük az aktuális zavart, és a jobb minőségű kapott megoldást választjuk. Ez a szemléletmód hasonlít az operatív forgalomirányítást végző alkalmazottak döntéshozási folyamataihoz, ahol minden zavar estén több különböző lehetőségből választja ki a helyzetnek megfelelőt. A DVRSP koncepcióját [10]-ben vezettük be.

## **5. Ütemezéskiosztás tervezési időszakra**

Míg az eddig bemutatott módszerek mind egy napi ütemezéshez kapcsolódnak, fontos megjegyezni, hogy a társaságok hosszú távú tervei heteket, vagy akár hónapokat figyelembe véve készülnek el. A tervezési időszakra történő ütemezéskiosztási problémát ennek a feladatnak a megoldására vezetjük be. Célja, hogy az előre elkészített napi

ütemezések blokkjait hozzárendelje a társaság járműveihez egy hosszabb időszakon keresztül. Ennek a beosztásnak a járművekhez kapcsolódó olyan igényeket is figyelembe kell vennie, mint a parkolás minden nap végén, vagy a rendszeres időközönként elvégzett műszaki karbantartás.

A feladatot egy állapot-kiterjesztett többtermékes hálózati folyamproblémaként írjuk fel, majd MIP megoldó segítségével oldjuk meg. A modell hatékonyságát valós és véletlenszerű bemeneteken is bemutatjuk. Jó minőségű eredményeket kaptunk mind több járműtípus, különböző karbantartási korlátok és változó méretű időszakok esetén is. Míg hasonló módszerek általában szekvenciálisan dolgozzák fel az időszak egyes napjait, a modellünk az összes nap minden feltételét egyszerre kezeli. A modell egy kezdeti verzióját [7]-ben, annak állapot-kiterjesztését [11]-ben adtuk meg, és itt vezettük be a karbantartáshoz kapcsolódó feltételeket is.

## **6. Témák döntéstámogató rendszerekhez**

Egy közlekedésoptimalizáló rendszer megtervezése nehéz feladat, mivel sok különböző részből áll, melyeknek mind együtt kell működni ahhoz, hogy jó minőségű megoldást kapjunk. Egy ilyen rendszer járművekhez kapcsolódó fel-

adatai három fő modulra bonthatóak: tervezés, operatív forgalomirányítás és kiértékelés. Míg a tervezési fázis feladatait a szakirodalom számos publikációja tárgyalja, a másik két modult ritkán vizsgálják egy döntéstámogató rendszer részeként. Több olyan témát is bemutatunk, ami ez utóbbi két fázishoz kapcsolódik, de a szakirodalomban ritkán tárgyalják gyakorlati alkalmazhatóságukat. Az operatív forgalomirányítást egy újraütemező keretrendszeren keresztül vizsgáljuk, valamint olyan időzített automatákon alapuló modellt, és véletlen példagenerátort ismertetünk, amik jól használhatóak a rendszer egyes moduljainak kiértékelésére.

Mint azt bemutattuk, a jármű-újraütemezés egy fontos része az operatív forgalomirányítás mindennapjainak. Emiatt egy olyan keretrendszert ismertetünk, ami párhuzamosan több megoldási módszert is képes kezelni a probléma megoldására, elemzi az eredményeiket, és kiválasztja közülük a legmegfelelőbbeket, melyeket javaslatként kínál a rendszert működtető operátor számára. Egy ilyen rendszer nagyszámú változtatható paraméterrel kell, hogy rendelkezzen, melyek módosításával mindig az aktuális helyzethez legjobban megfelelő megoldások készíthetőek. Ennek a rendszernek a felépítését [2]-ben ismertettük.

Egy új modellezési technikát is bemutatunk, ami időzített automaták segítségével adja meg az időszakra történő ütemezéskiosztási feladatot. A közösségi közlekedés

feladataihoz kapcsolódóan olyan modellezési módszert kerestünk, ahol egy megoldás lépései könnyen követhetőek, és a modell felépítése a bemenet minden fontos strukturális tulajdonságát visszaadja. A kapott rendszer hatékonyan alkalmazható a probléma felépítésének vizualizációjára, valamint a bemenettel kapcsolatos különböző kérdések validációjára. A fenti ötletet [12]-ben vezettük be.

Végül egy véletlenszerű bemeneteket generáló módszert ismertetünk, ami olyan példafeladatok készítésére alkalmas, melyek felépítése több szempontból is hasonlít a valós életből vett problémákéra. A közlekedési rendszerekhez készített módszereket alaposan kell tesztelni, ám a gyakorlatban ehhez nem áll rendelkezésre a megfelelő mennyiségű tesztadat. Módszerünket alternatívaként kínáljuk a szakirodalom leggyakrabban használt megközelítéséhez [5], mivel úgy érezzük, hogy az általa generált feladatok szerkezete több fontos pontban is különbözött Szeged városának valós példáitól. A módszer képes több depót és több járműtípust is kezelni, valamint tankolási események generálására is használható. Ezt a módszert [8]-ben vezettük be.



## 7. Tézisek összefoglalása

A szerző öt problémacsoportba rendszerezi téziseit:

**I** Bevezettünk több gyakorlatorientált heurisztikus módszert az MDVSP-re.

**I/1** Három megközelítést adtunk a változófixálásos heurisztikára. Eredményeik azt mutatták, hogy gyakorlati felépítésből adódó tulajdonság (járatvonalak használata) segítségével jó minőségű eredményt kapunk, melyek szerkezete is közelebb van a valós ütemezésekhez.

**I/2** Bevezettünk egy "vezetőbarát" iteratív módszert, ami olyan ütemezéseket készít az MDVSP-hez, melyek kielégítik a legfontosabb vezetőkhöz kapcsolódó szabályokat is.

**II** Bevezettük az integrált játműütemezési és hozzárendelési feladatot, melynek célja olyan ütemezések kialakítása, amik figyelembe veszik a jármű-specifikus tevékenységeket is (pl. tankolás, parkolás). A problémát halmazparticionálási feladatként modellezzük és oldjuk meg.

**III** Két fő területet vizsgáltunk a jármű-újraütemezés témájában.

- III/1** Többdepós jármű-újräutemezési modellt adtunk a VRSP-re, valamint két olyan heurisztikus módszert terveztünk, amik rövid idő alatt több jó minőségű megoldást is képesek szolgáltatni.
- III/2** Bevezettük a dinamikus jármű-újräutemezési problémát, ami zavarok sorozatának kezelése után vizsgálja a módszerek hatékonyságát a nap végéig végrehajtott tényleges ütemezés alapján.
- IV** Bevezettük az időszakra történő ütemezés kiosztás problémát, ami egy társaság hosszabb időszakra kialakított napi ütemezéseihez rendel járműveket. Egy állapot-kiterjesztett többtermékes hálózati modellt adtunk a feladatra, ami figyelembe veszi a parkolások és karbantartások feltételeit az egész időszakban.
- V** Három különböző témakört vizsgáltunk, amik beilleszthetők egy társaság közlekedés optimalizáló rendszerébe.
- V/1** Egy döntéstámogató keretrendszert adtunk a jármű-újräutemezéshez. A rendszer egyszerre több megoldási módszert képes kezelni, és több megoldási javaslatot ajánl fel a vállalat operátorai számára.





# Irodalomjegyzék

- [1] Viktor Árgilán, János Balogh, József Békési, Balázs Dávid, Miklós Krész, and Attila Tóth. Driver scheduling based on „driver-friendly” vehicle schedules. In *Operations Research Proceedings 2011*, pages 323–328. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 978-3-642-29210-1.
- [2] János Balogh and Balázs Dávid. An algorithmic framework for real-time rescheduling in public bus transportation. In *Proceedings of the 2013 Mini-Conference on Applied Theoretical Computer Science (MATCOS)*, pages 29–33, 2016. ISBN 978-961-6984-21-8.
- [3] József Békési, Balázs Dávid, and Miklós Krész. Integrated vehicle scheduling and vehicle assignment. *Acta Cybernetica*, 2017. 18 pages, submitted.
- [4] Alan A Bertossi, Paolo Carraresi, and Giorgio Gallo. On some matching problems arising in vehicle scheduling models. *Networks*, 17(1): 271–281, 1987.
- [5] G. Carpaneto, M. Dell’amico, M. Fischetti, and P. Toth. A branch and bound algorithm for the multiple depot vehicle scheduling problem. *Networks*, 19(5):531–548, 1989. ISSN 1097-0037. doi: 10.1002/net.3230190505.

- [6] Balázs Dávid. Heuristics for the multiple-depot vehicle scheduling problem. In *Proceedings of the 2010 Mini-Conference on Applied Theoretical Computer Science (MATCOS)*, pages 23–28, 2011. ISBN 978-961-6832-10-6.
- [7] Balázs Dávid. Schedule assignment for vehicles in inter-city bus transportation over a planning period. In *Middle-European Conference on Applied Theoretical Computer Science (MATCOS 2016): Proceedings of the 19th International Multiconference INFORMATION SOCIETY - IS 2016*, pages 9–12, 2016. ISBN 978-961-264-104-7.
- [8] Balázs Dávid and Miklós Krész. Application oriented variable fixing methods for the multiple depot vehicle scheduling problem. *Acta Cybernetica*, 21(1):53–73, 2013. ISSN 0324-721X. doi: 10.14232/actacyb.21.1.2013.5.
- [9] Balázs Dávid and Miklós Krész. A model and fast heuristics for the multiple depot bus rescheduling problem. In *PATAT 2014: Proceedings of the 10th International Conference of the Practice and Theory of Automated Timetabling*, pages 128–141, 2014. ISBN 978-0-9929984-0-0.
- [10] Balázs Dávid and Miklós Krész. The dynamic vehicle rescheduling problem. *Central European Journal of Operations Research*, 25(4): 809–830, 2017. ISSN 1613-9178. doi: 10.1007/s10100-017-0478-7.
- [11] Balázs Dávid and Miklós Krész. Multi-depot bus schedule assignment with parking and maintenance constraints for intercity transportation over a planning period. *Transportation Letters*, 2017. 16 pages, submitted.
- [12] Balázs Dávid, Máté Hegyháti, and Miklós Krész. Linearly priced timed automata for the bus schedule assignment problem. In *Proceedings of the 4th International Conference on Logistic Operations Management - GOL'2018*, 2018. 7 pages, accepted.
- [13] Jean-Paul Rodrigue, Claude Comtois, and Brian Slack. *The geography of transport systems*. Routledge, 2009. ISBN 978-0415483247.

