

## **.fejezet**

### **Irodalmi áttekintés**

A közlekedés optimalizálásával már sokan foglalkoztak az utóbbi években, és az ehhez kapcsolódó tanulmányok is hasonló felépítésűek. Általában klasszikus matematikai módon modellezték a problémát, majd pedig vagy közvetlenül matematikai programozási módszerekkel dolgoztak vagy a kombinatorikából ismert heurisztikus módszereket alkalmazták. Amennyiben ez a folyamat optimális megoldást hoz, még akkor is nehézkes az eredményeket a gyakorlatban igazolni, mivel a kis problémák megoldásai egy összetettebb, nagyobb problémakör részei. A közlekedési társaságok nap, mint nap nagy kihívásokkal néznek szembe, mint például a változó igények, amik miatt esetenként át kell szervezni a közlekedési szolgáltatást, újra kell gondolni az üzemeltető hálózatot. Ez természetesen költségnövekedéssel is társulhat. Közlekedési rendszert tervezni elég komplex feladat, mivel elég különböző modulokat foglal magába. Ezek a következők:

- Stratégiai tervezés: vonaltervezés, járatok vonalának megalkotása
- Taktikai tervezés: menetrendkészítés
- Operatív tervezés: járművek és járművezetők ütemezése

Az utolsónak említett operatív tervezésről a buszközlekedés kapcsán Árgilán és társai [1] publikáltak egy áttekintést, melyben különböző matematikai modelleket és megoldási módszereket is tárgyalnak. Az előbbieken felsoroltak már önmagukban is összetett problémák. Nem túlzás azt mondani, hogy a valóság minden kis szeletét lehetetlen matematikailag modellezni, mert túl nagy és bonyolult struktúrát eredményezne. Ennek ellenére az elkészült modellek döntéstámogatási folyamatokban hatékony segítséget nyújthatnak a megvalósítandó megoldás eléréséhez. Szakdolgozatomban az operatív tervezéshez tartozó járműütemezéssel foglalkoztam, azon belül is elektromos buszok ütemezésével, így ebben a fejezetben a közlekedés optimalizálásának ezen részeit mutatom be kicsit részletesebben.

### **Járműütemezés**

A járműütemezési probléma (Vehicle Scheduling Problem, VSP) a közösségi közlekedésből eredő egyik legalapvetőbb probléma. Érdekes matematikai feladat elméleti síkon nézve, azonban sok megoldás mégsem illeszthető be a valós életbe, mivel csak a menetrendszerinti járatokra fókuszálnak és fontos korlátozásokat nem vesznek figyelembe. Nem mindig számítják bele a gyakorlat szempontjából szükséges paramétereket, a jármű speciális igényeit, mint például a tankolás, parkolás vagy a bizonyos üzemidő utáni karbantartás.

### **A járműütemezési feladat általános modellje**

Dávid és Krész [2] terminológiáját követem a VSP bemutatásához. A bemeneti halmazok a következők:

- $V$  a járművek halmaza (vehicles)
- $T$  a járatok halmaza (timetabled trips)

Minden járat rendelkezik indulási és érkezési idővel, kezdési és befejezési hellyel, valamint a járat által lefedett távolsággal.

Egyes járatokhoz tartozhat egy olyan speciális járműhalmaz is, ami azokat a járműveket tartalmazza, amikkel az adott járatok elvégezhetők. Például egy hosszabb úthoz egy légkondicionálással rendelkező járművet lehet csak hozzárendelni, így egy ilyen járathoz csak a megfelelő halmazból vett járművet lehet társítani.

Egy  $(t, t')$  járatpárt egymással kompatibilisnek tekintünk, amennyiben egy jármű mindkettőt képes elvégezni a  $t$  járat érkezési helye és a  $t'$  indulási helye közötti átjutási idő és távolság figyelembevételével.

Az utasszállító menetrendszerinti járatokon kívüli járatokat hívjuk rezsijáratoknak. Ezeknek is van indulási és érkezési helye, távolsága valamint időtartama.

Az előzőekben említett járatok, amik meghatározhatják azt, hogy milyen járáthalmazzal hajthatók végre, vezetnek be a depó fogalmát. A járművek depókhoz tartozhatnak. A depó az a hely ahonnan a járművek az ütemezés kezdetén elindulnak és a végén oda térnek vissza. A járatok specifikus tulajdonságaihoz kapcsolódóan is rendelhetünk buszokat depókhoz.

A VSP alapfeladata az, hogy a járműveket hozzárendelje az egyes járatokhoz úgy, hogy minden menetrendszerinti járat pontosan egyszer legyen elvégezve és az egy jármű által elvégzett járatok páronként kompatibilisek legyenek. Egy jármű több járathoz is hozzárendelhető, és minden menetrendi járathoz egy megfelelő depóhoz rendelt jármű

tartozik. (Olyan eset is lehetséges, hogy egyes járművek az adott ütemezési feladatban nem vesznek részt.)

A célfüggvény általában az ütemezésben használt járművek számának vagy a költségeknek a minimalizálása. A probléma teljes költsége általában egy egyszeri napi járművenkénti átalányköltség és az üzemeltetési költség összege a megtett távolságok függvényében.

A járműütemezés eredménye a jármű által elvégzett feladatok sorozata, láncolata, melyben minden egymást követő két menetrendi járat páronként kompatibilis egymással.

Az előbbiekben a VSP probléma általános tulajdonságait mutattam be, ám a gyakorlati szempontok és korlátozások figyelembevételével, ennek nagyon sok variációja létezik. Ezek közül néhány fontosabbat fogok bemutatni a következő fejezet részben. Általánosságban pedig elmondható, hogy ezeket a járműütemezési problémákat matematikai modellekkel szokták szemléltetni és megoldani, de léteznek alternatív modellezési módszerek, mint például a Dávid és társai [3] által írt cikkben, amiben időzített automatát használtak a buszos közlekedés ütemezésének szemléltetésére.

## **Járműütemezési feladatosztályok**

A járműütemezési feladatokat csoportosíthatjuk a felhasznált depók száma szerint, illetve meghatározhatóak az általános VSP rendszereken túlmutató, másfajta üzemanyag-felhasználású feladatosztályok. A VSP-hez kapcsolódóan néhány problémaosztály (rövidítéssel együtt) a következő:

- SDVSP (Single Depot Vehicle Scheduling Problem): egydepós járműütemezési probléma
- MDVSP (Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem): többdepós járműütemezési probléma
- AF-VSP (Alternative Fuel Vehicle Scheduling Problem): alternatív üzemanyagú járműütemezési probléma
- E-VSP (Electric Vehicle Scheduling Problem) elektromos járműütemezési probléma

A következőkben az előbb felsorolt osztályokat mutatom be kicsit részletesebben, illetve megemlítek néhány példát a témához kapcsolódó általam tanulmányozott publikációkra.

### **SDVSP és MDVSP**

A depók száma szerint beszélhetünk egydepós illetve többdepós járműütemezési feladatról. Mindegyik fajtaival sokan foglalkoztak az utóbbi néhány évtized alatt. Az egydepós VSP-ről először Saha [4] 1970-es publikációjában olvashatunk, míg a többdepós VSP-t Bodin és társai [5] publikálták 1983-ban.

Bertossi és társai [6] publikációjában olvasható SDVSP klasszikus páros gráfos modell felírható minimális költségű folyamként is, amire léteznek polinom idejű algoritmusok. Ugyanebben a cikkben vizsgálták az MDVSP feladat komplexitását is és mutatták meg, hogy a probléma NP-teljes.

Az egydepós járműütemezési feladatot többek között páros gráffal modellezték Árgilán és társai [7]. Az SDVSP egy speciális esetét vizsgálták (BVSP - Basic Vehicle Scheduling Problem) ahol a minimalizálandó költség a hozzárendelt járművek száma, vagyis a lehető legkevesebb jármű használata az ütemezés során.

A Kliwer és társai [8] által megalkotott idő-tér modell egy fontos mérföldkő volt az MDVSP modellezése terén, mivel jelentősen csökkentette a modell méretét az addigi kapcsolat alapú modellekhez képest.

Bunte és Kliwer [9] publikációjában bővebben olvashatunk különböző modellekről mind az egydepós, mind a többdepós esetben. Az SDVSP megoldását például többek között a szállítási feladat és a hozzárendelési feladat modelljével, valamint hálózati folyam modellel szemléltették. Az MDVSP eset kapcsán például idő-tér hálózati modellt és halmazparticionálási modellt is használtak az előbb említett cikkben.

Az SDVSP és MDVSP alapkoncepciójára épülő megoldási módszereket nem minden esetben lehet közvetlenül a gyakorlatba helyezni, mert csak a járatok elvégzésével foglalkoznak. A valósághoz azonban olyan jármű-specifikus szükségletek is tartoznak, amiket a megfelelő működés érdekében ki kell elégíteni. Ilyenek, mint például a tankolás, parkolás és karbantartás.

Egy általános keretrendszerként használható halmazparticionálási modellt írt fel Békési és társai [10]. Ebben a cikkben egy olyan többdepós modellről van szó, amelybe különböző járat-specifikus tevékenységet is lehet integrálni, mint például a tankolás és a parkolás. A modell megoldásához oszlopgenerálást alkalmaztak.

**AF - VSP és E - VSP**

Az újfajta járművek megjelenésének hatására az utóbbi években egyre nagyobb népszerűségnek örvend az alternatív üzemanyagú (földgáz, hibrid meghajtású) és elektromos járművek ütemezése. Az AF-VSP nehézsége az úgynevezett „rádiuszban” rejlik, ami azon kilométerek számát jelenti amennyit a jármű egy tankolással megtehet és ez a hagyományos üzemanyagú járművékéhez képest sokkal kevesebb. A járműveknek ezért napközben is szükségük lehet az újratöltésre és általában nagyon kevés töltőállomás áll rendelkezésükre. Fontos tényező továbbá a tankolás időtartama, ami többszöröse lehet a megszokott pár percnél.

Az elektromos járműütemezési feladathoz köthető megközelítések hasonlóak az alternatív üzemanyagúhoz, így a megoldás keresése is hasonlóképpen történik az egyes tanulmányokban. Adler disszertációjában [11] többféle optimalizációs problémát fed le az AF-VSP és E-VSP problémakörökben. Az általa bemutatott megoldási módszerek között szerepel például a korlátozás és szétválasztás módszere illetve a tabu-keresés. Az elektromos járművek ütemezéséhez akkumulátor cserét alkalmazott és főleg oszlopgenerálási algoritmust használt.

A korlátozott hatótávolságú eszközök kérdésével szintén az elsők között foglalkozott Li [12] cikke is, melyben többfajta üzemanyagtípust vizsgált, illetve különböző matematikai modellt adott a feladatra.

Chao és Xiaohong [13] az egydepós járműütemezési problémát vizsgálta elektromos buszokkal kapcsolatos attribútumok figyelembevételével. A megoldáshoz többcélú optimalizációs genetikus algoritmust használt és szintén akkumulátor cserével dolgozott.

Wen és társai [14] az E-VSP problémát a MIP (Mixed Integer Programming) módszerrel és a szomszédsági keresés algoritmussal prezentálták. Az egyik céljuk a menetrendszerinti járatokhoz szükséges buszok számának minimalizálása, a másik pedig a megtett távolságok minimalizálása volt.

Zhou és társai [15] pedig olyan egydepós buszflottát tanulmányoztak, amely hagyományos és elektromos buszokat is tartalmaz. Az algoritmusukkal a töltési költségek csökkentését célozták meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] Árgilán, V. S, Balogh, J, Békési, J, Dávid, B, Galambos, G, Krész, M, and Tóth, A. (2014). Ütemezési feladatok az autóbuszos közösségi közlekedés operatív tervezésében: Egy áttekintés. *Alkalmazott Matematikai Lapok*, 31, 1-40.
- [2] Dávid, B., and Krész, M. (2017). The dynamic vehicle rescheduling problem. *Central European Journal of Operations Research*, 25(4), 809-830.
- [3] Dávid, B., Hegyháti, M., and Krész, M. (2018, April). Linearly priced timed automata for the bus schedule assignment problem. In *2018 4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL)* , IEEE, (pp. 1-7).
- [4] Saha, J. L. (1970). An algorithm for bus scheduling problems. *Journal of the Operational Research Society*, 21(4), 463-474.
- [5] Bodin, L. (1983). Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. *Computers and Operations. Research*, 10(1), 63-211.
- [6] Bertossi, A. A., Carraresi, P., & Gallo, G. (1987). On some matching problems arising in vehicle scheduling models. *Networks*, 17(3), 271-281.
- [7] Árgilán, V, S, Balogh, J, and Tóth, A (2014). The basic problem of vehicle scheduling can be solved by maximum bipartite matching. In *Proceedings of the 9 th International Conference on Applied Informatics Eger, Hungary, Vil* (Vol. 2, pp. 209-218).
- [8] Kliewer, N., Mellouli, T., & Suhl, L. (2006). A time–space network based exact optimization model for multi-depot bus scheduling. *European journal of operational research*, 175(3), 1616-1627.
- [9] Bunte, S, and Kliewer, N, (2009). An overview on vehicle scheduling models. *Public Transport*, 1(4), 299-317.

- [10] Békési, J, Dávid, B, and Krész, M. (2018). Integrated vehicle scheduling and vehicle assignment. *Acta Cybernetica*, 23(3), 783-800.
- [11] Adler, J, D. (2014). *Routing and scheduling of electric and alternative-fuel vehicles* (Doctoral dissertation, Arizona State University).
- [12] Li, J. Q. (2014). Transit bus scheduling with limited energy. *Transportation Science*, 48(4), 521-539.
- [13] Chao, Z, & Xiaohong, C. (2013). Optimizing battery electric bus transit vehicle scheduling with battery exchanging: Model and case study. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96, 2725-2736.
- [14] Wen, M, Linde, E, Ropke, S, Mirchandani, P, and Larsen, A. (2016). An adaptive large neighborhood search heuristic for the electric vehicle scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 76, 73-83.
- [15] Zhou, G, J, Xie, D, F, Zhao, X, M, and Lu, C. (2020). Collaborative Optimization of Vehicle and Charging Scheduling for a Bus Fleet Mixed With Electric and Traditional Buses. *IEEE Access*, 8, 8056-8072.