

Optimális gyorsjárat közlekedési rend kialakítási lehetősége Budakeszi – Budapest között

A közforgalmú közlekedés vonzerejének növelésére az egyik legjobb lehetőség az utasok eljutási idejének mérséklése, amelynek hatékony módja lehet a járatok gyorsítása bizonyos megállóhelyek kihagyása által. Mivel azonban az így kihagyott megállóhelyek utasai számára hátrányos a szolgáltatás gyakoriságának csökkenése, a közlekedési rend módosítását részletes, számszerű vizsgálatoknak kell megelőzni.

DOI: <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2024.1.3>

Soltész Tamás

tudományos segédmunkatárs, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszék
e-mail: soltesz.tamas@kjk.bme.hu

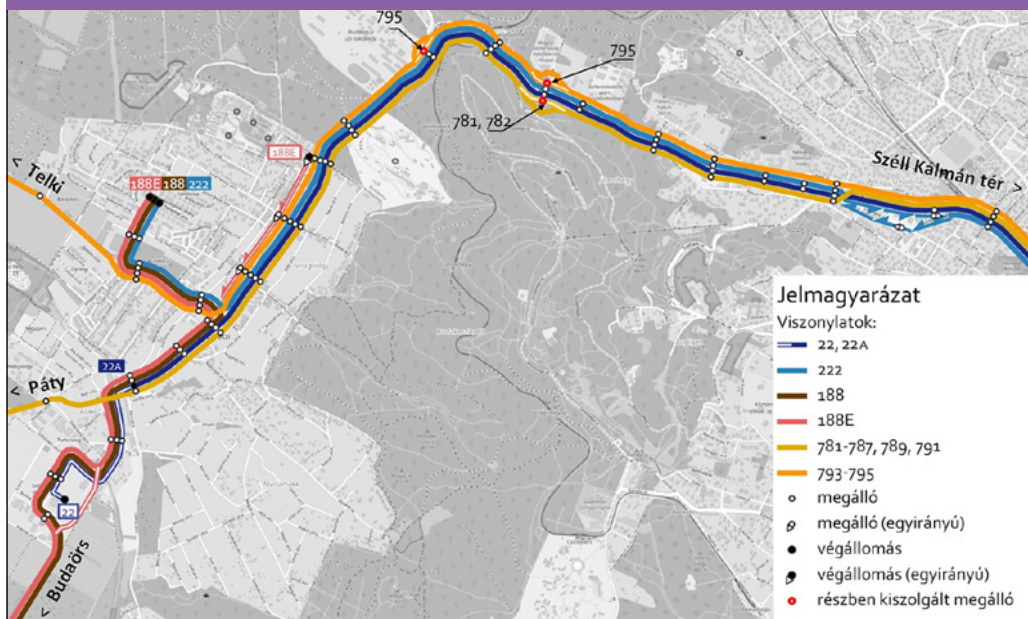
1. BEVEZETÉS

A fenntartható városi közlekedés egyik legfontosabb aktuális kérdése a közforgalmú közlekedés vonzerejének növelése a közlekedési munkamegosztáson belüli minél nagyobb részesedés érdekében. E vonzerő szempontjából – többek közt az elérhetőség, megbízhatóság, kényelem mellett – az egyik legfontosabb tényező az eljutási idő. Ennek csökkentésére számos lehetőség létezik. Az egyik leghatékonyabb eszköz a járatok gyorsítása, azaz a megállási rend és a menetrend felülvizsgálata, és ennek eredményeként egyes járatok egyes megállásainak elhagyása. Mivel ez alapvetően forgalomszervezési intézkedés, a bevezetés költségigénye minimális, sőt üzemeltetői költségmegtakarítás is lehetséges (pl. az energiafogyasztás, ill. a fordulóidő csökkenése által). Ugyanakkor egy ilyen módosítás az utazási időt olyan áron teszi rövidebbé, hogy a kihagyott megállóhelyek

szolgáltatási színvonala csökken, azok időbeli elérhetősége romlik. Ezért rendkívül fontos egy ilyen jellegű módosítást megelőzően a várható hatások körütekintő elemzése és ezek alapján az optimális közlekedési rend – azaz a viszonylatok és megállási rendjük, ill. a menetrendi struktúra és összehangolás – kidolgozása. Gyorsított közlekedési rendet csak akkor érdemes bevezetni, ha az időmegtakarítások felülmúlják az időveszteségeket.

A várhatóan a közeli jövőben megvalósuló, Zsámbéki-medence autóbuzos közlekedésének fejlesztése c. projekt [1] tervezési folyamata során – a többi tervezett intézkedésen túl – célszerű volt megvizsgálni a járatok gyorsításának lehetőségeit is a Budakeszi és Budapest közötti szakaszon. Az említettek mellett az itt közlekedő 22-es autóbuzcsaládnak (ld. 1. ábra) számos olyan utasforgalmi jellemzője van, amelyek ezt indokolják:

1. ábra: A Budakeszi jelenlegi közforgalmú közlekedési hálózata [1]. A 22-es autóbusszcsalád viszonylatai a kék különböző árnyalataival vannak ábrázolva



- az utasok jelentős része a külső szakasról (Budakeszi) végigutazik a belső végpontig (Budapest, Széll Kálmán tér);
- a középső szakaszon (Budakeszi út) számos kis forgalmú megállóhely található;
- a vonalcsoport utasforgalma jelentős (napi mintegy 24 ezer felszálló, ill. a csúcskeresztszámokban kb. 16,5 ezer utas/nap), lehetővé teszi a járatok specializációját anélkül, hogy a követési idő a kihagyott megállóhelyeken kényelmetlenül hosszúvá válna.

Ezen indokokra tekintettel korábban évtizedeken keresztül üzemelt is gyorsított viszonylat a vonalon, egészen 2012-ig. Akkor azonban a 22E viszonylatot megszüntették, teljesítményét a 22-essel összevonták. Ennek – utólag valószínűsíthető – fő indokai a következők voltak:

- az alap- és gyorsjáratokat nem hangozták, ezért rendszertelenül, megbízhatatlanul közlekedtek (az akkori hivatalos kommunikáció elsősorban ezt emeli ki [2]);

- a Budakeszi úton jellemző torlódások mellett a gyorsjáratok menetidő-csökkenése nem, vagy csak kis részben volt realizálható, nem tűnt relevánsnak a fellépő késésekhez képest.

Az említett projekt elsődleges célja az autóbussz-közlekedés előnyben részesítése, függetlenítése a közúti forgalomtól, így az utóbbi problémát várhatóan kezelni fogja. Az előbbi pedig – az előnyben részesítés mellett – összehangolt menetrend bevezetésével lehet elkerülni. Ezért a fejlesztések várható megvalósításával egy időben indokolt ismét megvizsgálni a kérdéskört.

Elméletben felmerül a lehetőség, hogy a vonalcsoponton belül a gyorsjáratok kínálatát a párhuzamosan közlekedő helyközi számozású viszonylatokkal lehetne biztosítani, ami azonban a gyakorlatban több szempont miatt nem célszerű. A 781-795 számú viszonylatok elsődleges célja a Zsámbéki-medence távolabbi települései és Budapest összekötése, a járművek ennek megfelelően helyközi kialakításúak. Napi járatszámuk 43%-a a 22-es családnak,

keresztmetszeti kapacitásuk pedig mindössze 27%-a, így kijelenthető, hogy a Budakeszi-Budapest közötti, gyorsjáratokkal lebonyolítható utazások száma önmagában is lényegesen nagyobb, mint a helyközi számozású viszonylatok kapacitása. Ráadásul csúcsidőben a Budapest-Budakeszi szakaszon ez utóbbi már nagyrészt kimerül.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Általánosságban a közforgalmú járatok gyorsításának három fő, koncepcionális típusa létezik:

- Alap- és gyorsjáratok: a meglévő, minden megállóhelyet kiszolgáló alapjáratokkal párhuzamosan közlekednek a megállóhelyek egy részét kihagyó gyorsjáratok. Ezzel a – gyakran alkalmazott – koncepcióval a forgalmasabb megállóhelyek között csökkenthető a várható utazási idő, viszont továbbra is minden utas el tud jutni a céljához átszállás nélkül. Ugyanakkor az utazási időktől és a menetrendtől függően szükséges lehet, hogy a gyorsjáratok megelőzzék az alapjáratokat, aminek infrastruktúra-oldali feltételei is vannak – ez különösen kötőtpályán jelent korlátot.
- Váltakozó megállási rend (ún. skip-stop rendszer) [3]: a mindenütt megálló alapjáratok helyett két (vagy akár több) különböző, gyorsított viszonylat közlekedik, amelyek más-más megállóhelyeket hagynak ki (de minden megállót kiszolgál legalább az egyik, ill. a megállók egy részét mindegyikük). Így az összes járat utazási ideje csökken, de egyes megállóhelyek között átszállási kényszer jön létre. Előzésre viszont általában nincs szükség, ezért főleg kötőtpályán találhatók valós példák ilyen struktúrára.
- Zónázó közlekedési rend [4][5]: az útvonal két (vagy akár több) szakaszra, zónára van felosztva, amelyeket külön-külön viszonylat szolgál ki (a határokon mindkét szomszédos zóna viszonylata megáll; ill. a vonal belső végpontján és egyes

kiemelt megállóhelyein mindegyik). Az utazási időt csak a külső zóna (zónák) felől a belső végpontba utazók számára csökkenti (ott viszont jelentősen); a belső zóna viszonylata pedig egyben betétjáratként is szolgál. Az egyes zónák közötti átszállási kényszer miatt főleg elővárosi közlekedésben alkalmazzák, ahol az utasok nagy többsége a vonal belső, minden viszonylat által kiszolgált végpontjára / szakaszára utazik.

A nemzetközi szakirodalomban a 2010-es évek eleje óta került fókuszba a járatok gyorsításának optimalizálása. A legtöbb tanulmányban olyan módszereket közölnek, amelyek a megállási rend és a követési idők egyidejű optimalizálására törekkenek. A [6]-ban különböző, előre definiált megállási rendű viszonylatok követési időit optimalizálták két lépcsőben, nemlineáris programozást és heurisztikus módszereket alkalmazva. A célfüggvény a társadalmi költség (várakozási és utazási idők, ill. üzemeltetési költségek) minimalizálása volt a kapacitáskorlátok betartása mellett. A [7]-ben hasonló optimalizációs módszert dolgoztak ki, viszont a legjobb megoldást az összes lehetőség végigpróbálásával választották ki. A [8] szerint a lehetséges követési idők összes lehetséges kombinációját vizsgálták (a járatok számának változatlanul hagyása mellett). Ezeken belül viszont heurisztikus módszerrel optimalizálták a gyorsviszonylat megállási rendjét; a célfüggvény az utasok időráfordításainak minimalizálása volt (kapacitáskorlát mellett). A kidolgozott módszert 178 valós útvonal adataira alkalmazták, végül az eredményeken alapos statisztikai elemzést végeztek. A [9]-ben kétlépcsős heurisztikus optimalizálást dolgoztak ki a társadalmi költség minimalizálására. A [10] gyorsjárat és váltakozó megállási rendű kiszolgálásra alkalmazható módszerek után egy általános optimalizációs módszert is kidolgozott, ami a megállók vonalmenti elhelyezésére is javaslatot adott; a célérték szintén a lehető legkisebb társadalmi költség volt. A [11]-ben többcélú optimalizációs módszerrel kerestek Pareto-optimális megoldásokat egyrészt az utasok költségének, másik részről a járműflotta méretének minimalizálására.

Összefoglalva elmondható, hogy alaposan kutatott területről van szó. A szolgáltatási paraméterek (elsősorban a megállási rend és a követési idők) optimalizálására számos módszert dolgoztak ki. Azonban a nemzetközi szakirodalomban olyan módszer alig lelhető fel, amely összehangolt járatokra épülő menetrendi struktúrát vizsgált volna (egyedül váltakozó megállási rendű közlekedésre található egy hangolt esetet vizsgáló példa [12]). Továbbá az ismert módszerek a hangolatlan rendszerek egyik fő hátrányát, a hosszabb várakozási időt sem veszik figyelembe: ugyanis amíg egyenletes (ill. 10 percnél rövidebb) követési idő esetén az utasok megállóhelyi várakozási ideje jó közelítéssel az átlagos követési idő fele [13][14] – jellemzően még akkor is, ha dinamikus utastájékoztatót használnak –, addig egyenetlen követési időnél ez – a szórás mértékétől függően – jelentősen megnő [15]; de ezzel a fent említett módszerek egyike sem számol.

3. A GYORSJÁRATI KÖZLEKEDÉSI REND VÁRHATÓ HATÁSAINAK ELŐREBECSLÉSE

Ahogy a bevezetőben is említésre került, bármilyen típusú gyorsított viszonylat közlekedetésének nyilvánvaló előnye az utazási idő csökkenése, ami időmegtakarítást jelent az utasoknak és az üzemeltetőnek is. Azonban egy egységes, sűrűn közlekedő alapviszonylat teljesítményének megosztása és több, specializált viszonylat közlekedtetése mindenképp többletet okoz a megállóhelyi várakozási időben (a fent említettek miatt még a gyors viszonylat utasai számára is). A hatások értékeléséhez az egyik legfontosabb szempont ezeknek az időértékeknek a minél pontosabb számszerűsítése.

A 2. fejezetben bemutatott lehetőségek közül Budakeszi – Budapest között a zónázó közlekedési rend alkalmazása azért nem célszerű, mert a vonal Budakeszi szakaszán is sokan utaznak, nincs olyan jelentős „utaslépcső”, amelyet zónahatárként lehetne alkalmazni, ill. ahol járatokat lenne célszerű visszafordítani. A váltakozó megállási rendet pedig – amellett, hogy egy Közép-Európában szokatlan, az uta-

sok számára nehezen kommunikálható módszer – a létrejövő átszállási kényszer miatt nem érdemes alkalmazni. Így a számszerű elemzés csak a hagyományos, alap- és gyorsjáratokra épülő közlekedési rendet veszi figyelembe.

A cél egy olyan modell kidolgozása volt, amely alapján egy gyorsított viszonylat bevezetése esetén becsülhetők és a jelenlegi helyzettel összevethetők az alábbi értékek:

- az utasok megosztása az alap- és gyorsjáratok között (az összes felszállószám, ill. csúcskeresztmetszet tekintetében is);
- a gyorsjáratok utasai által realizált menetidő-nyereség;
- az utasok által érzékelt megállóhelyi várakozásiidő-növekedés.

3.1. Modellparaméterek, peremfeltételek

A modell két alapfeltevésből indul ki. Az első, hogy a vonalcsoport kapacitása, ill. járatszáma nem változik, azaz a gyorsjáratok meglévő alapjáratokat váltanak ki. Ez egyrészt azért fontos, mert így a gyorsítás hatásai önállóan, bármilyen más módosítástól függetlenül számszerűsíthetők; másrészt az üzemeltetői költségek elhagyhatók az optimalizálás cél-függvényéből, ugyanis azok változása nem jelentős (pontosabban kis mértékű, a modellben nem számszerűsített csökkenésük várható, de az egyes változatok között ebben nem várható érdemi különbség).

A másik alapfeltevés, hogy a kétféle járat egymással összehangoltan közlekedik. Ez ugyanis az utasok megállóhelyi várakozási időinek mind a várható értékét, mind a szórását csökkenti a hangolatlan rendszerhez képest, így annál lényegesen megbízhatóbb szolgáltatást jelent. (Ezzel a gyakorlati tapasztalatok is összhangban vannak: a korábbi 22E viszonylat fent említett sikertelenségének fő oka is a hangolás nélküli, megbízhatatlan közlekedés volt.) Továbbá a hangolt rendszer hatásai jobban is modellezhetők: egyrészt a modellparaméterek száma csökken, mivel a követési időknek csak néhány lehetséges kombinációja hangol-

ható össze egymással; másrészt a megállóhelyi várakozási idők, ill. az utasok járatválasztása (amely relációkban lehetséges) is sokkal pontosabban becsülhető, mivel a járatok közötti (menetrend szerinti) követési idők ütemesen ismétlődnek.

Ezen kívül a modell két fő bemenő adatcsoportra támaszkodik:

- A vonal megállóhelyi le- és felszálló utasszámjai: a Volánbusz adatszolgáltatása alapján, egy pandémia előtti hétköznap egész napi adatsora 15 perces bontásban.
- Egy megállás időigénye, másként az egy megállóhely kihagyásával elérhető időnyereség; azaz a tényleges állásidő, valamint a gyorsítás és lassítás időigénye. Több budapesti gyors viszonylat (7E, 20E ill. 224E) és velük párhuzamos alapviszonylatok megállási rendjét, ill. menetidőit vizsgálva ez az érték jelentős szórást mutat (általában még egy viszonylat két irányára is), azonban a több mint 50 kihagyott megállóhely alapján átlagként kapott 28 s-os érték jó közelítésnek tekinthető. (Ez a szakirodalomban – pl. [8],[10] – általában feltételezett 30 s-mal is összhangban van.)

A szolgáltatási jellemzőket a következő három paraméter írja le:

- Közös követési idő: az alap- és gyorsjáratok együttes, átlagos követési ideje (megegyezik az eredeti, csak alapjáratos közlekedés követési idejével) a közös megállóban. A jelenlegi menetrend szerint csúcsidőben 18 járat/óra/irány közlekedik. Ez alapján e paraméter értéke a modellben 200 s volt. (Az optimalizálás első lépése a csúcsidei szolgáltatás megtervezése volt, de később a ritkább követési idők melletti működés is az elemzés része lett.)
- Megállási rend (a gyorsjáratok által kihagyott megállóhelyek): a vonal összesen 24 megállóhelye közül 8-14 közötti számú, a le-/felszálló, ill. áthaladó utas-

forgalmuk alapján manuálisan kiválasztott megálló kihagyására készültek változatok (adott számú kihagyott megállás mellett általában többféle megállóhely-kombinációra is).

- A járatok hangolása: ezt a gyors- és alapjáratok számának aránya, ill. az egyes járatok közötti követési idők írják le; erre is számos változat került vizsgálatra.

Megemlíthendő, hogy a vonalcsoponton jelenleg három viszonylat (22, 22A, ill. 222) közlekedik, amit a modellben is kezelni kellett. Ezek közül a 22-t és 22A-t a jövőben tervezetten összevonják (minden járat a külső végpontig fog közlekedni). A számítás már ezt az állapot tekinteti „jelenlegi” helyzetnek. A 222-es viszonylat, – amely a 22-esből Budakeszi területén ágazik ki – indulásai pedig mind alapjáratként jelennek meg a modellben (tehát a kapott alapjárat menetrend egyes indulásai erre közlekednek, a fő ággal összehangoltan). Mivel e viszonylat megállási rendje és indításszáma is változatlan marad, az önálló szakasza felől érkező, ill. oda tartó utasoknak érdemben nem változnak az eljutási lehetőségei, őket a számításnál nem kell külön figyelembe venni, míg a közös szakaszon az utasok az alapjáratokkal összevonva kezelhetők.

3.2. A célértékek számítási módja

A modell létrehozásának kiinduló lépése a vonalcsoport megállóhelyei közötti célforgalmi (honnan-hová) mátrix létrehozása. Ez a napi le- és felszálló utasszámokból az analitikus forgalom-előrebecslésben gyakran alkalmazott gravitációs modell [16] segítségével történt. A gravitációs modell külön-külön lett lefuttatva a vonalcsoport két irányára (azaz a mátrix főátló feletti, ill. alatti háromszögére), 8-8 iterációval; az ellenállásfüggvény pedig a megállóhelyek közötti távolság 0,6-odik hatványa volt, vagyis degresszív módon függött a távolságtól. (Ez a kitevő oly módon lett kalibrálva, hogy a modell az iteráció során minél kevesebb lépésben, minél pontosabban közelítse a tényleges érkező forgalmakat, azaz leszállószámokat. Az 1-nél kisebb értéket az indokolja, hogy a nagyon rövid utazások ese-

tén sokan más módot – pl. gyaloglás – választanak, így akik ténylegesen igénybe veszik a járatokat, jellemzően hosszabb szakaszon utaznak.) A gravitációs modell minden olyan megállópárra is kiszámol értéket, amelynek a valóságban nincs relevanciája. Azon megállóhelyek között, amelyek közelében nem található jelentős forgalomvonzó létesítmény (pl. nagyobb üzlet, közintézmény stb.), csak lakóhelyek, ezért nem reális célforgalommal számolni, ezeket érdemes lehet valamilyen korrekcióval nullává tenni. Azonban közvetlenül a gravitációs modellből kapott mátrixban az ilyen megállóhelyek egymás közötti forgalma mindössze napi 62 utazásra adódott, ami nem éri el a sarokösszeg 0,3%-át. Az ez által okozott esetleges torzítás elhanyagolhatónak tekinthető, így a mátrixon további korrekció ezek kiszűrésére nem történt.

Ebből a mátrixból már önmagában kiszámítható, hogy egy-egy megállási rend esetén az utasok mekkora része számára lehet megfelelő a gyorsított viszonylat. (Egy kilenc megálló kihagyásával számoló változat esetén pl. ez a két irányban 71-74%, tizenkét megálló kihagyásánál 51-57%.) Ezek az arányok azonban önmagukban nem adják meg a gyorsjáratokat igénybe vevő utasok számát, számukra ugyanis az alapjárat is megfelel, és a menetrendtől (ill. az utas megállóba érkezésének idejétől) függően gyorsabb eljutást is biztosíthat. Így az utasok járatválasztásának modellezéséhez a következő szempontokat kell figyelembe venni:

- Kiszolgálja-e a kiinduló- és a célpontot is a gyorsjárat: valódi választási lehetőség csak ebben az esetben van, különben csak az alapjárat biztosít eljutást (a vonalcsoporton belüli átszállással nem számol a modell);
- A kiinduló- és célpont között várhatóan megelőzi-e a gyorsjárat az előtte haladó alapjáratot: ettől függ, hogy érdemes-e egy utasnak megvárnia a gyorsjáratot, vagy az elsőként érkezőre érdemes felszállnia;
- Milyen követési idők vannak a járatok között az egyes megállóhelyeken (ez a

gyorsjárat rövidebb menetideje miatt a vonal mentén is változik a közös megállóhelyeken): ettől függ, hogy az utasok mekkora része melyik járatra tud felszállni hamarabb.

A járatválasztási modell azt feltételezi, hogy minden utas ismeri – akár online információrendszer segítségével – a számára leggyorsabb eljutási lehetőséget, és azt is választja. A valóságban ez valószínűleg nem történne teljes mértékben így, az azonban feltételezhető, hogy mindkét típusú viszonylatra esne valamennyi hibás (nem optimális) választás. Ezért összességében mégis az tűnik a legjobb közelítésnek, hogy az utasok az eljutási idők alapján racionálisan választanak járatot. A bemutatott szempontokat a modell a honnan-hová mátrix minden elemére külön-külön megvizsgálja, és ennek megfelelően osztja szét az utasokat:

- Ha a kiinduló- vagy a célpont bármelyikénél nem áll meg a gyorsjárat, a részesedése 0% lesz az utasszámból;
- Ha megáll,
 - de a két pont között nem előzi meg az alapjáratot, akkor – egyenletes eloszlás szerinti utasérkezést feltételezve – a követési idők arányában osztja meg az utasokat a járatok között;
 - és előz is, akkor az előtte haladó alapjáratra eső utasok is a gyorsat választják (ha járatok aránya 1:1, azaz minden alapjáratot gyors követ, akkor utóbbiak részesedése 100% lesz).

A járatválasztásból adódik a gyorsjáratok utasszáma, ebből pedig – a kezdő- és célpont figyelembevételével – számítható az általuk realizált időmegtakarítás is.

A megállóhelyi várakozási időt a modell a járatválasztásnak megfelelően többféle módon számítja. A kimondottan az egyik viszonylatra várakozók számára ez az adott viszonylat saját követési idejének 50%-a (szintén az egyenletes utasérkezés miatt, ill. mivel 10 percnél nagyobb követési idő a vizsgált esetekben nem adódott [13]). Akiknek bármelyik

járat megfelel, azok elvben a közös követési időt érzékelnék, azonban mivel a különböző járatok nem egyenletesen követik egymást, a várakozási idő számítása bonyolultabb. Ugyanis figyelembe kell venni, hogy a két járat közötti hosszabb követési idő alatt több utas is érkezik a megállóba, vagyis többen fogják a hosszabb követési időt érzékelni, mint a rövidebbet. Ezt a modellt kezeli, a számításnál a várakozási időket súlyozza az adott időközben érkezők számával. Végül a kapott várakozási időknak a jelenlegi helyzethez (sűrű alapjárat) viszonyított növekedése van figyelembe véve idővesztésként.

4. A SZOLGÁLTATÁSI PARAMÉTEREK OPTIMALIZÁLÁSA

A gyorsjáratok közlekedtetésének számos, különböző változata került elemzésre, hogy kiválasztható legyen a 22-es vonalcsoporton megvalósítható legmegfelelőbb szolgáltatás. Az optimalizáció egyik célja értelemszerűen a legkedvezőbb időmérleg elérése (amely alatt a menetidőnyereség és a várakozásiidő-vesztés előjeles összegét értjük, a megtakarítást pozitív előjelűnek tekintve). Emellett azonban fontos az utasok minél egyenletesebb eloszlása is a járatok között, különben akár utaslemaradás is előfordulhatna, ill. a járatválasztási modell sem lenne érvényes.

Elsőként a viszonylatok járatszámai közötti megoszlást kell meghatározni. A két viszonylat követési idői a hangolhatóság érdekében csak egymás egész számú többszörösei lehetnek (beleértve természetesen az egyszerű szorzót is). Azonban minél nagyobb ez a szorzószám, annál hosszabb lesz a ritkábban közlekedő viszonylat követési ideje, ami egyrészt rontja a szolgáltatás vonzerejét (különösen csúcsidőszakon kívül), másrészt az utasok egyenletes eloszlása is nehezen lesz megvalósítható. Ezek a problémák bizonyos mértékben már kétszeres szorzónál is jelentkeznek, de ekkor még kezelhető mértékűek, ennél nagyobb különbség alkalmazása viszont nem célszerű. Ugyanakkor az alap- és gyorsjáratok száma közötti 1:2 és 2:1 arányok esetén is van egy fontos eltérés

a két eset között: míg ritkább alapjáratnál (1:2 arány) a kisebb forgalmú megállóknál a követési idő a jelenlegi 3-szorosára nőne, ami nehezen felvállalható, addig sűrűbb alapjáratnál (2:1 arány) csak átlagosan másfélszeresére, ami ebből a szempontból még az azonos követési idejű esetenél (1:1 arány) is kedvezőbb. Mindezekre tekintettel az 1:2 arány már modellezés előtt elvetésre került, a számszerű elemzésbe a 2:1 és 1:1 arányú változatok lettek bevonva.

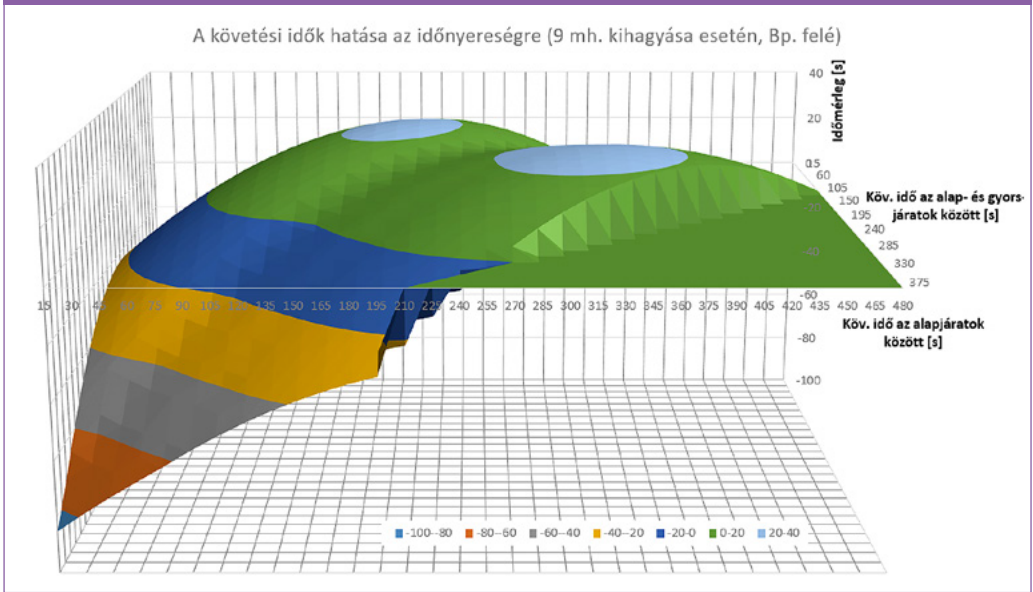
A 2:1 arányú, |; alap – gyors – alap :| ütem esetén annak hossza a három járatonkénti ismétlődés miatt $3 \cdot 200 = 600$ s (csúcsidőben). Ekkor a hangolás két követési idő-értékkel írható le (a harmadik idő az ütem hosszából adódik). Így ennek optimalizálása több dimenzióban szükséges. A modell számos változatra le lett futtatva, az előre definiált megállási rendek mellett mindkét időértékeket 15 s-onként léptetve. Ezek eredményét szemlélteti kilenc kihagyott megállóhely esetén a 2. ábra.

Az ábrán a legszembevetőbb, hogy az időmérlegnek két lokális maximuma van, amelyeket egy mélyebb „völgy” választ el. Ennek magyarázata a modell működésénél leírt előzési kérdéskör, az utasok ugyanis egészen másképp választanak járatot, ha van, ill. ha nincs előzés a járatok között. A „völgy” azon a határon húzódik, ahol éppen utol tudja érni a gyorsjárat az alapjáratot; e fölött, ill. alatt két különböző optimum adódik. (Ezen kívül a diagram azon része, ahol a két időérték összege meghaladja a teljes ütem hosszát, nem értelmezhető, az ábrán 0 értéket vesz fel.)

Többféle megállási rendnél is megvizsgálva a követési idők lehetséges kombinációit, nem adódott az 1:1 arányú változatoknál kedvezőbb időmérlegű megoldás. Így – a már korábban is említett üzemeltetési nehézségeket (csúcson kívüli ritka követés, utasok eloszlása) is tekintve – a 2:1 járatszám arány is elvetésre került.

Ebből következően minden második buszjáratot célszerű gyorsjáratként közlekedtetni, az ütem így |; alap – gyors :|; hossza $2 \cdot 200 = 400$ s. Ekkor a modellben adott megállási rend mellett egyetlen követési idő marad pa-

2. ábra: A modell alapján becsült időmérték 2:1 (alap:gyors) járatszámarány és kilenc kihagyott megállóhely esetén a követési idők lehetséges kombinációira, Budapest felé



raméterként. Ebben az esetben is kiszámításra kerültek a célértékek többféle megállási rend mellett a lehetséges követési időkre (5 s-os lépésközzel), ennek néhány eredményét a 3. és 4. ábra mutatja be. Az ábrákon az időmértéken (folytonos vonalak, bal függőleges tengely) kívül fel van tüntetve a gyorsjáratok becsült részesedése is a teljes utasszámból (szaggatott, ill. pontozott vonalak, jobb tengely), mind a vonal csúcskeresztmetszete – amely a kihasználtság miatt fontos –, mind pedig a teljes felszállószám tekintetében.

Az előző ábrához hasonlóan az időmérték-függvényekben itt is található egy ugrás, ill. annak mindkét oldalán egy-egy lokális optimum, aminek magyarázata ez esetben is az előzés hatása. Megfigyelhető emellett az is, hogy a függvények meredeksége a maximumhelyek közelében igen kicsi, vagyis a követési idők ezek körüli változásával az időmérték csak kis mértékben romlik.

Számos eset vizsgálata után két olyan változat adódott, amelyek csúcsidőben kiemelkedően jó eredményeket adtak, ugyanakkor egymástól lényegesen különböztek:

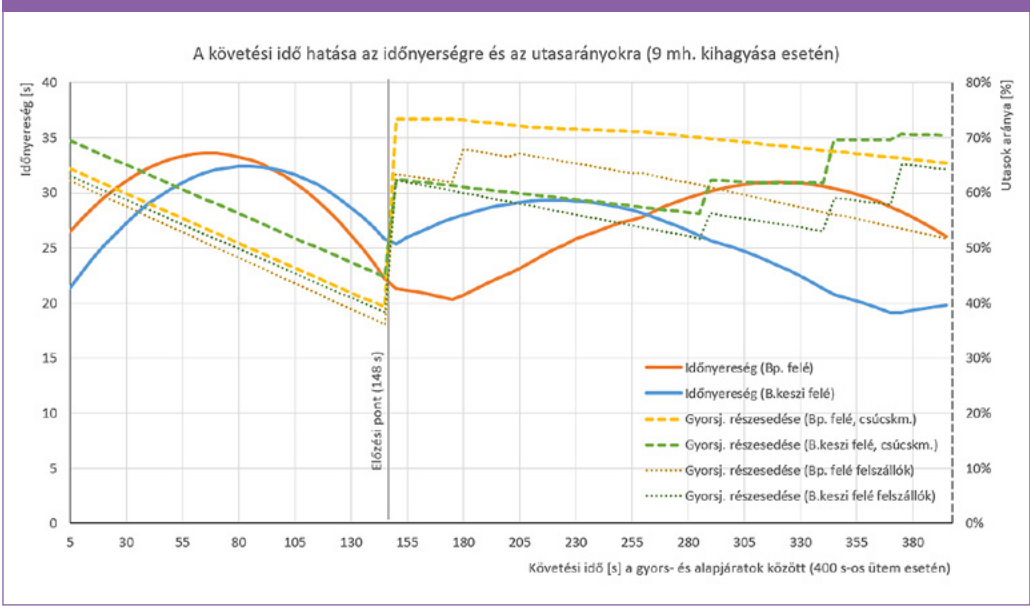
A. kilenc kihagyott megállóhely, előzés nélkül (egy ütemen belül a gyors kb. 1 perccel az alapjárat előtt indul a végállomásról, így az előtte haladó alapjáratot nem éri utol, mivel a menetideje 4,2 perccel rövidebb);

B. tizenkét kihagyott megállóhely, előzéssel (ütemen belül a gyors kb. 3 perccel az alapjárat után indul a végállomásról, menetideje pedig 5,6 perccel rövidebb).

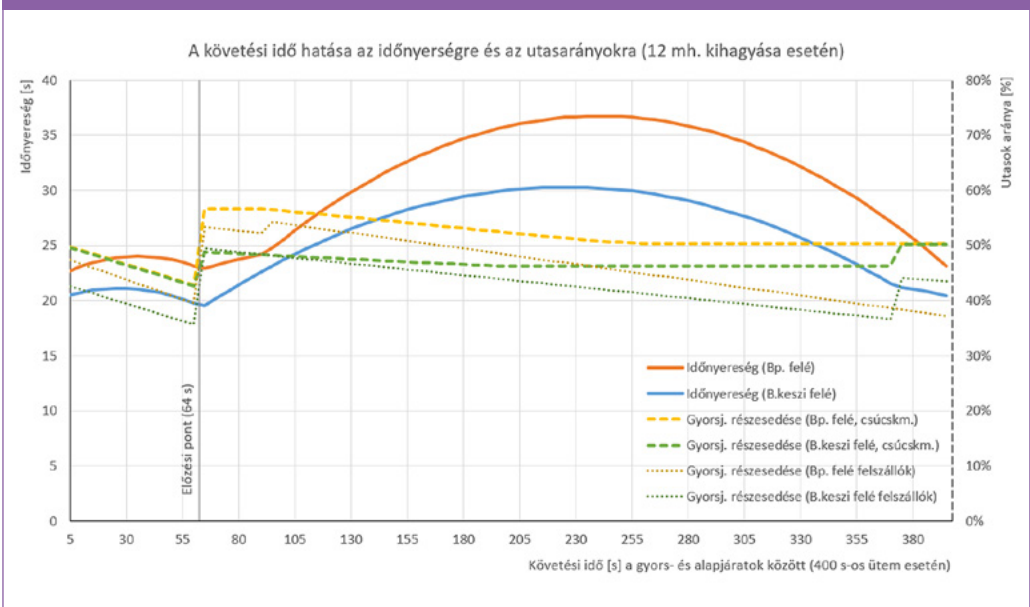
A fenti két változatban egyaránt kb. 50-50%-ban oszlanak meg az utasok a két viszonylat között a vonal csúcskeresztmetszetében, így megvalósításra alkalmasak, időmértékük pedig utasonként (az vonal összes utasára átlagolva) 30 s felett van. (A B változat mindkét szempontból néhány százalékkal kedvezőbb eredményeket ad.)

Mivel az elért eredmények nagyon hasonlóak, a vizsgálatot érdemes volt kiterjeszteni nagyobb követési időkre is, a csúcsidőn kívüli időszakokat modellezve. Ezekben az esetekben mindkét változat időmértéke romlott, hiszen így – a menetidők változatlansága mellett – a várakozási idők megnöttek. Viszont ez a

3. ábra: A modell eredménye 1:1 alap:gyors járatszámarány és kilenc kihagyott megállóhely esetén a lehetséges követési időkre



4. ábra: A modell eredménye 1:1 alap:gyors járatszámarány és tizenkét kihagyott megállóhely esetén a lehetséges követési időkre



hatás a két változatnál különböző mértékű, az A változat időmérlege jóval kevésbé csökkent: még 5 perces közös követési időnél is 10 s feletti időmérleget adott, míg a B változat ekkor már határozottan negatívát.

Az előzést tartalmazó, ill. anélküli változatokat összehasonlítva néhány általános megállapítást is meg lehet fogalmazni:

- Míg előzés nélküli esetben az utasszám érzékeny a hangolásra, előzéses esetben ez alig jelentkezik (hiszen ekkor az utasok jelentős része ettől függetlenül választ járatot). Ez mindkét esetben lehet előny és hátrány is: pl. az előzéses esetben késés esetén sem változik jelentősen az utasok aránya, ugyanakkor ezt szándékosan, a menetrend módosításával sem lehet jelentősen befolyásolni.
- Az előzéses változat nagyon érzékeny a közös követési időre (ennek egyik oka, hogy ha ütemen belül arányosan nőnének a járatok közötti követési idők, akkor egy érték felett már nem történne meg az előzés, amire a többi paraméter, pl. a megállási rend optimalizálva volt).
- A modell eredményeitől függetlenül, üzemeltetési szempontból az előzés lebonyolítása jelenthet nehézséget, hiszen az autóbuszoknak ki kell kerülniük egymást, így pl. buszsáv esetén is szükség van autóbuszöblökre, vagy ki kell sorolni a normál közúti sávba.

5. EREDMÉNYEK

Az összes szempontot figyelembe véve az A változatot célszerű megvalósítani. Ennek javasolt szolgáltatási jellemzői a következők szerint foglalhatók össze:

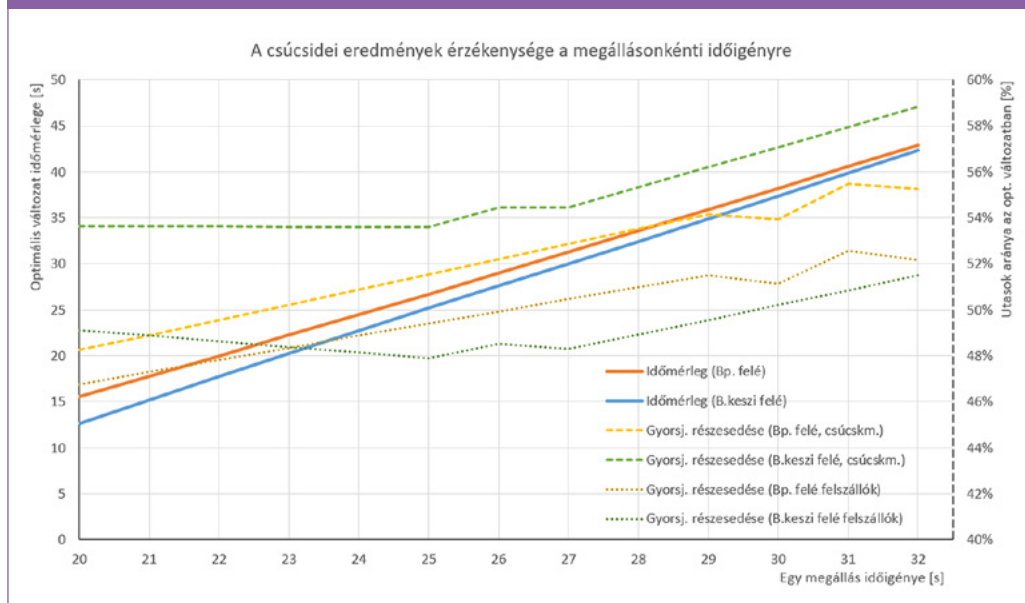
- A gyors viszonylat üzemideje hétköznap 6-tól 20 óráig tart, amikor a közös követési idő maximum 5 perc. (A hétfélig közlekedés ennél ritkább, ekkor gyorsjáratok közlekedése nem javasolt).
- A vonalcsoponton minden második autóbusz gyorsjárat. A gyorsjáratok az alapjárat előtt napszaktól függően 1-3 perccel indulnak a végállomásról, így nem érik utol az előző alapjáratot.
- Megállási rend: a gyorsjáratok a budakeszi végállomástól a városhatáráig (Szanatórium u.) minden megállóhelyen megállnak, onnan tovább csak az alábbiakban: Országos Korányi Intézet (OKI), Vízművek, Kuruclesi út, Budagyöngye, Szent János kórház, Széll Kálmán tér; így 9 budapesti megállóhelyen haladnak át megállás nélkül (5. ábra).

Az optimális paraméterek mellett az utasszámok becsült megoszlása a modell szerint minden napszakban és mindkét irány csúcskeresztmetszetében legfeljebb $\pm 2,5\%$ -kal tér el az ideális 50-50%-os értéktől, így egyik viszonylat sem lesz túlterhelt. Az elérhető időmegtakarítás (a vonalcsoport összes utasára, így az alapjáratokkal utazókra is átlagolva) utasonként kb. 23,5 másodperc, ami összesítve naponta kb. 144 utasóra időmegtakarítást jelent; ez a vonal utasai teljes időráfordításának (az utazási és várakozási idő összegének) 2,78%-a. Ez az érték a szakirodalomban közölt eredményekhez (pl. [8]) képest jónak mondható, 2%-nál jobb várható eredményt csak kevés útvonalon sikerült kimutatni (ráadásul utóbbi érték csúcsidőszakra vonatkozik, amelyet önmagában tekintve a 22-es vonalcsoponton még nagyobb, 3,92%-os az időnyereség).

5. ábra: A gyors viszonylat megállási rendje a javasolt A változatban (a fontosabb megállóhelyek elnevezéseivel)



6. ábra: Érzékenységvizsgálat a megállásonkénti időigény változására



A modellből kapott elméleti eredményekkel kapcsolatban azonban szükséges néhány dolgot megjegyezni. Az első, hogy a gyakorlatban elérhető eredmények a fentieknél valamivel kedvezőtlenebbek lehetnek, ugyanis a hazai gyakorlatban a menetrendek egyperces pontosságúak. Ezzel az elméleti optimumok nem érhetők el pontosan, a gyakorlatban is elérhető időnyereség így napi 100 utasóra (2%) körüli értékre becsülhető.

Emellett kiemelendő, hogy a modell érzékeny a bemenő időértékekre. A közös követési idő hatása már a csúcsidőn kívüli időszakokban is látható volt, de ehhez hasonlóan, nagyobb befogadóképességű (pl. csuklós) autóbuszok esetleges üzembe állítása is ritkább követési időket jelentene. Ezért utóbbi esetben szintén jelentősen változhatnak az eredmények, az időmegtakarítások csökkenhetnek, ill. a gyorsjáratok közlekedtetése is rövidebb üzemidőben lehet célszerű.

A modell megállásonkénti időigényre való érzékenységét érdemes volt részletesebben is megvizsgálni. Ennek során a paraméter kü-

lönböző értékei (ill. a fent javasolt megállási rend) mellett adódó optimális, előzés nélküli változatok időmérlege, ill. utasarányai álltak elő.

A csúcsidei eredményeket bemutató diagramon (6. ábra) látható, hogy a megállásonkénti időigény változásával az időmérleg közel lineárisan változik. Ha pl. a számításnál figyelembe vett 28 s helyett a gyakorlatban csak 24 s adódna, azzal az időmérleg kb. 25-30%-kal romlana, az optimális követési idő 10-20 s-os változása mellett. (Ugyanezt az összehasonlítást csúcsidőn kívül, 5 perces közös követési időre elvégezve az időmérleg még nagyobb arányban, 50-60%-kal csökken, viszont még így is pozitív marad.) Vagyis, ha a gyakorlatban a gyorsjáratok menetideje a becsülttől jelentősen eltérne, annak érdemi hatása lenne a menetidő-nyereségre, amit ez esetben célszerű lenne újra vizsgálni. Ugyanakkor ez a járatok tényleges hangolását valószínűleg nem befolyásolná, mivel a menetrend egyperces felbontásánál kisebb mértékben változna az optimális követési idő, tehát a szolgáltató részéről nem feltétlenül volna szükség menetrendi módosításra.

6. KÖVETKEZTETÉSEK

Bár a fent bemutatott időmegtakarítások nem kiemelkedők a vonalcsoportha jellemző teljes eljutási időkhöz képest, a bemutatott számítási modell azt egyértelműen igazolta, hogy az utasok számára időben kedvezőbb a gyorsjáratú szolgáltatás bevezetése a jelenlegi állapothoz (kb. 2-3%-os időnyereség érhető el). Ez ráadásul további, a modellben nem számszerűsített előnyökkel is járna, például:

- Gyorsjárat attraktivitása, utasvonzó hatása: a rövidebb menetidő jól kommunikálható, általában jobban felkelti a figyelmet, mint az emiatt növekvő követési idők. Mindez egy esetleges jövőbeni P+R rendszer sikeressége szempontjából is kiemelten előnyös lehet. A szakirodalomban is alkalmazott érzékelt eljutási idő gyorsjáratok esetében valószínűleg kisebb lesz, mint a valós eljutási idő, mivel az utas a gyors haladást kedvezőbbnek érzékeli.
- A modell az utasok véletlenszerű, egyenletes megállóba érkezésével számol, azonban a gyakorlatban ez várhatóan kedvezőbb lesz, ha az utasok egy része figyelni a dinamikus utastájékoztatót, ill. jobban alkalmazkodik a menetrendhez. Ezáltal az ő várakozási idejük csökken, míg gyorsjáratokkal utazók aránya és időnyeresége nőhet. (Igaz, utóbbi esetben a gyorsjáratok zsúfoltsága is nagyobb lehet, de ez bizonyos mértékig önmagát szabályozó folyamat.)
- Üzemeltetői előnyök: bár a vonalcsoportha járműkilométer teljesítménye nem változna, a rövidebb fordulódő az üzemeltető számára is előnyös, akár járműmegtakarítást is lehetővé tesz. (A javasolt változatban a gyors viszonylat menetideje a két irányban összesen kb. 8,4 perccel rövidebb lenne; ami az üzemidő jelentős részében a saját követési idejénél nagyobb, így elméletileg egy jármű megtakarítható ezekben az időszakokban.) Emellett a csökkenő megállásszám várhatóan mérsékli az energiafelhasználást is.

A gyorsított viszonylattal kapcsolatban – mivel a javasolt változat menet közbeni előzéssel nem számol – többlet infrastruktúra-igény csak a végállomáson merül fel, ahol vizsgálandó külön álláshely biztosítása. Ugyan a jelenlegi, gyorsjárat nélkül közlekedési rend megbonthatása hátrányokkal is jár (többféle viszonylat, melyek érzékenyek a hangolásra; bonyolultabb utastájékoztatás), a bemutatott előnyökre tekintettel a gyorsjáratú szolgáltatás bevezetése Budakeszi – Budapest között egyértelműen javasolható.

A 22-es autóbuszcsalád példáján bemutatott módszert a jövőben célszerű más, sűrű követési idejű közforgalmú útvonalakra is alkalmazni; ennek segítségével további helyszínek azonosíthatók, ahol érdemes lehet a járatok gyorsításával vonzóbbá tenni a szolgáltatást. Mivel a modell figyelembe veszi a járatok hangolását, ezért egyrészt az eddig ismert módszereknél pontosabb becslést ad az utasok időmértékére, másrészt képes azonosítani az előzés nélküli menetrendi struktúrákat, amelyek akár kötőpályás vonalak esetében is alkalmazhatók, ezzel a módszer alkalmazási területe tovább bővíthető.

A számítási modell a jövőben három fő irányba fejleszthető tovább:

- Ha nem csak az egyik, hanem mindkét viszonylat megállási rendje módosítható (a mostani változatban az alapviszonylat minden megállót kiszolgál), akkor modellezhetővé válnak egyéb gyorsítási koncepciók is, mint a zónázó közlekedés vagy a váltakozó megállási rend.
- A előzőekkel összefüggésben figyelembe veendő az egyes viszonylatok közötti átszállások lehetősége is. (Zónázó, ill. váltakozó megállási rendeknél ez bizonyos relációkban szükséges is, de előzéses gyorsjáratú közlekedésnél is jelenthet gyorsabb eljutási lehetőséget.)
- A módszer jelenleg előre definiált megállási rendeket vizsgál, amelyek az elhagyandó megállóhelyek utasforgalmai alapján számos változatban, de ma-

nuálisan lettek kiválasztva elemzésre. A jövőben célszerű ezek optimalizálását is bevonni a modellbe; a nagyszámú lehetséges kombináció miatt valamilyen heurisztikus módszer (pl. evolúciós algoritmusok) alkalmazásával.

E fejlesztések eredményeként a modell alkalmassá válna valamennyi gyorsítási módszer egységes vizsgálatára és optimalizálására; ill. ezek hatásai még pontosabban előre jelezhetők lennének.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Zsámbéki-medence autóbuszos közlekedésének fejlesztése. Javaslati dokumentáció – Bírálati terv, 2022. (megrendelő: BFK Zrt., generál tervező: UVATERV Zrt.); Községi közlekedési javaslatok fejezet (BME Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszék)
- [2] Változások Budakeszi közlekedésében. BKK, 2012. május 9. (<https://budapest.hu/Lapok/Változások-Budakeszi-közlekedésében.aspx>; 2023. szept. 28.)
- [3] Vuchic, V.R.: Urban Transit System and Technology. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007. ISBN: 978-0-471-75823-5
- [4] Borza V.: Lehet nyereséges a vasúti közszolgáltatás – az integrált ütemes menetrend gazdasági alapjai. Közlekedéstudományi Szemle 2007/10. p. 362-372.
- [5] Földiák J. – Kormányos L.: Zónázó struktúrájú menetrendek a Budapest–Esztergom vasútvonalon, a villamosítást követően. VII. Közlekedéstudományi Konferencia, Győr, 2017. ISBN: 978-615-5298-95-0, p. 177-189.
- [6] Leiva, C. – Muñoz, J. – Giesen, R. – Larrain, H.: Design of limited-stop services for an urban bus corridor with capacity constraints. Transportation Research, Part B, Methodology 44 (10), 2010.: p. 1186–1201., DOI: <https://doi.org/d7dzdn>
- [7] Ulusoy, Y. Y. – Chien, S. I.-J. – Wei, C.-H.: Optimal All-Stop, Short-Turn, and Express Transit Services under Heterogeneous Demand. Transportation Research Record, 2197 (1), 2010.: p. 8–18., DOI: <https://doi.org/dhhmk5>
- [8] Chiraphadhanakul, V. – Barnhart, C.: Incremental bus service design: combining limited-stop and local bus services. Public Transport 5, 2013.: p. 53–78. DOI: <https://doi.org/mbnm>
- [9] Larrain, H. – Muñoz, J.C. – Giesen, R.: Generation and design heuristics for zonal express services. Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Rev. 79, 2015.: p. 201-212 DOI: <https://doi.org/f7gwzw>
- [10] Mei, Y.: Optimal design of skip-stop transit service in a corridor under heterogeneous demand. PhD thesis, The Hong Kong Polytechnic University Department of Electrical Engineering 2019.
- [11] Liang, M. – Zhang H. M. – Rui M. – Wang, W. – Dong, C.: Cooperatively coevolutionary optimization design of limited-stop services and operating frequencies for transit networks. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies 125, 2021.: p. 103038 DOI: <https://doi.org/gn3srq>
- [12] Fan, W. Ran, Y.: Planning skip-stop services with schedule coordination. Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Rev. 145, 2021.: p. 102119 DOI: <https://doi.org/gn3sr2>
- [13] Nagy E. – Szabó D. (szerk.): Városi közlekedési kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, 1984. ISBN: 963 10 4921 3, p. 107.
- [14] Kózel M. – Soltész T.: A menetidő törvényszerűségei eloszlásminták alapján a közösségi közlekedésben. Nemzeti Közlekedési Napok konferencia, 2013. nov. 7.
- [15] Hertel, G.; Lehmann, G.; Mittag, M.; Woda, A. (Hrsg.): Verkehrsentwicklung und Verkehrssystemtechnik, EIPOS - Nachschlagewerk, Europäisches Institut für postgraduale Bildung (EIPOS e.V.), Dresden, 1994.
- [16] Horváth Balázs: Tömegközlekedési ráterhelési modellek értékelő elemzése és fejlesztése. PhD doktori értekezés. BME Közlekedésüzemi Tanszék 2005.



A possible establishment of the optimal express bus service between Budakeszi and Budapest

One of the best ways to increase the attractiveness of public transport is to reduce travel time for passengers, which can be achieved by speeding up vehicle trips by skipping certain stops. However, since reducing traffic frequency is detrimental to passengers of missed stops, any change to the service must be preceded by detailed, quantitative research. In contrast to other methods known from the literature, the model considers the coordination of trips and the effects of uneven headways.



Eine Möglichkeit für die Gestaltung des optimal Schnellbus-Verkehrsplans zwischen Budakeszi und Budapest

Eine der besten Möglichkeiten, die Attraktivität des öffentlichen Verkehrs zu steigern, besteht darin, die Reisezeit für Passagiere zu verkürzen, was durch die Beschleunigung von Fahrten durch das Überspringen bestimmter Haltestellen erreicht werden kann. Da die Reduzierung der Verkehrsfrequenz jedoch für die Fahrgäste der verpassten Haltestellen nachteilig ist, es müssen jeder Änderung des Verkehrsplans detaillierte, quantitative Untersuchungen vorausgehen. Im Gegensatz zu anderen aus der Literatur bekannten Methoden berücksichtigt das Modell die Koordination von Fahrten, bzw. auch die Auswirkungen ungleichmäßiger Folgezeiten.

