

# Valós idejű forgalmi konfliktus feloldása matematikai optimalizációval

Dr. Aradi Szilárd, Lövétei István

Vasúti Vezetékvilág, 2022. május

## 1 Bevezetés

A vasúti közlekedés részarányának növelés évtizedek az egyik kiemelt célja az Európai Uniónak. Ezt tovább fokozta az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésének felgyorsítása. Azonban még ma is az utasok mindössze 7, míg az árucikkek 11 százaléka utazik vonattal, miközben a vasút a kibocsátás mindössze 0,4 százalékáért felel, és ez az egyetlen olyan közlekedési mód, ami számottevően csökkentette a kibocsátásait 1990 óta. Emellett a koronavírus járvány a vasúti közlekedésre is negatív hatással volt, a legtöbb tagországban az utasszám még most sem közelíti meg a járvány előtti szintet. Az Európai Bizottság 2021-et a "vasút európai évének" jelölte ki, hogy népszerűsítse a környezetbarát közlekedési módokat, így elősegítve a 2050-re kitűzött klímasemlegességi célt [1].

Emellett a Bizottság 2020 decemberében fogadta el legújabb, fenntartható és intelligens mobilitási stratégiáját, amely ambiciózus célokat fogalmazott meg e területen is: a vasúti áruszállítás megkétszerezését és a nagysebességű vasúti tevékenység megháromszorozását 2050-ig. Ennek érdekében törekedni kell a vasúti infrastruktúra kapacitások maximális kihasználására, az adatalapú és mesterséges intelligenciára épülő megoldások alkalmazására a vasúti problémák megoldása esetén is. Továbbá hatékony kapacitás allokációs és forgalomirányítási eljárásokra van szükség az energiafogyasztás és a CO<sub>2</sub> kibocsátás további csökkentése érdekében [2].

A fentiek adták motivációját a forgalomirányítás automatizálásával és a menetrend újratervezés optimalizációs kérdéseivel foglalkozó kutatásainknak. Emellett a Prolan Zrt. és a BME közös, jelenleg is futó 2018-1.3.1-VKE-2018-00040 „Elosztott logikájú vasúti elektronikus biztosítóberendezés fejlesztése” című pályázatának keretein belül végzett feladataink is érintik a központi forgalomirányítás és az energiahatékonyság kérdéseit. Az alábbiakban a forgalmi zavarok esetén alkalmazható módszereket és annak nemzetközi szakirodalmát járjuk körben. Valamint egy egyszerű eseten keresztül bemutatjuk a matematikai optimalizációs eljárások alkalmazhatóságát.

## 2 A MÁV forgalomirányítási rendszere

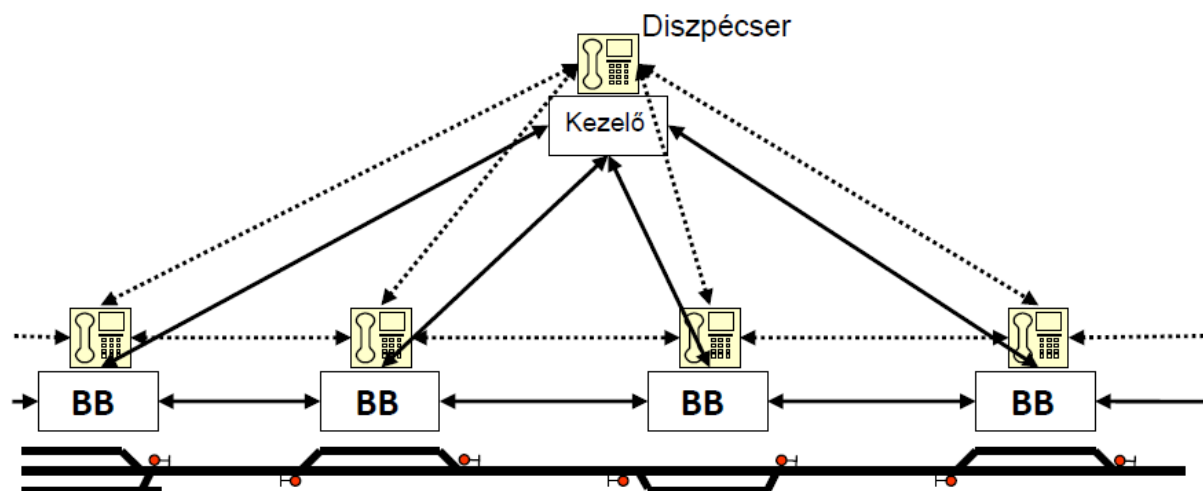
A vasúti üzemirányítás a vonatforgalom tervezésével, lebonyolításával, szabályozásával összefüggő irányítói tevékenységet jelent [3]. Másként kifejezve az üzemirányítás feladata a menetrend végrehajtása (végrehajtatása) az operatív irányítási feladatot ellátó menetirányítókön, forgalmi szolgálattevőkön keresztül. Bár az aktuálisan érvényes menetrend előre ismert, a menetrendtől való eltérések állandóan előfordulnak, nem is beszélve a havária helyzetek sokaságáról. Az operatív irányításnak éppen ezért az infrastruktúra sajátosságait figyelembe véve kell a menetrendtől való eltéréseket – késéseket, pótlásokat – kezelni, szükség esetén vonatkeresztezéseket, megelőzéseket kell az állomások között áthelyezni. Egy ilyen módosítás kihatással lehet más vonatok közlekedtetésére - például az átszállások biztosításán, vagy az infrastruktúrabeli kötöttségek okán -, ezért szükséges az operatív irányítás egységessége, azaz a menetrendtől való eltérések egységes koordinálása régiókon belül, és azok között is.

Az üzemirányításnak ezért folyamatosan tájékozódnia kell a vonatok aktuális helyzetéről és állapotáról, figyelemmel kell kísérnie az infrastruktúra állapotát, az időjárási helyzeteket, és fel kell készülnie akár a lökészerű utasforgalom kezelésére is. Ennek következtében egy olyan szervezetet kell működtetni, amely hatékonyan képes kezelni az előbb felsorolt helyzeteket, a cél az optimális döntés (amely minden esetben a késések megszüntetése, ezzel együtt a késések okozta költségek minimalizálása) meghozatala. A döntésekhez korszerű eszközök rendelkezésre állása egyre inkább elengedhetetlenné válik.

## 2.1 Korszerű KÖFI rendszerek

A vasutakon alkalmazott legkorszerűbb forgalomirányítási szint a KÖFI (Központi Forgalom Irányítás) - 1. ábra. Ezek a rendszerek alkalmasak lehetnek arra, hogy operátori közbeavatkozása nélkül, a menetrendnek megfelelően, automatikusan közlekednek a járművek, pl. zárt metróvonalak.

KÖFI irányítás során a diszpécser a rendelkezésére álló műszaki rendszereken keresztül nem csak látja a vasútvonalak forgalmát, hanem be is tud avatkozni, ő állítja be a vágányutakat, vagy ehhez automatákat használhat. Nagyon gyorsan lehet döntéseket hozni – döntéstámogató szoftverek beépítése is lehetséges – és a beavatkozási idő minimális. Ez a jelenleg alkalmazott leghatékonyabb forgalomirányítási mód. Itt az állomási forgalmi szolgálat megszűnik (erőforrás csökkenés) a hatékonyság rendkívüli mértékben nő. A rendszer hátránya, hogy korszerű és megbízható biztosítóberendezési technikai szintet (és adatátviteli rendszereket, stb.) igényel, amelyek kiépítése rendkívül költséges lehet.



1. ábra KÖFI irányítás (forrás: [4])

A cél ezeknek a KÖFI rendszereknek egy üzemirányító központba történő (OCC – Operational Control Centre, németül BFZ - Betriebsführungszentralen) integrálása, ahonnan a teljes magyarországi forgalom egyszerre, hatékonyan irányítható. Ma Magyarországon a KÖFI irányítás infrastrukturálisan két módon valósul meg. Az egyik az, ahol az adott KÖFI rendszernek meg van a saját központja, pl. Dél-Balaton esetén, Fonyódon, vagy a zalai vonal esetén, Zalaszentivánon. A második, amikor nem csak egy vasútvonal, hanem egy nagyobb körzet (melyhez több vasútvonal is tartozik) irányítása valósul meg, melyek megfelelnek az OCC fogalmának. Magyarországon is vannak ilyen OCC központok, például Szegeden, Szombathelyen és Csornán - 2. ábra. (Az utóbbi két helyszínről valósul meg a GySEV teljes hálózatának irányítása.) Budapesten jelenleg részben üzem alatt van egy ilyen KÖFI központ a Kerepesi út 14. alatt, Itt a 120a, 80a és 40a vonalak irányítása zajlik azonos teremből, de a csatlakozó

vasútvonalak irányítása még elkülönül. Az OCC központok elterjedése igen előrehaladott, ilyen korszerű OCC központokból irányítják pl. Németország valamennyi vasútvonalát is, de több más ország is idesorolható.

A korszerű KÖFI rendszerekbe a biztosítóberendezési kezelő- és visszajelentő funkciókon kívül további rendszerek integrálhatóak, melyek lehetnek:

- automata utastájékoztató rendszerek, amelyek kezelő közbeavatkozása nélkül, automatikusan működnek,
- döntéstámogató, konfliktusfelismerő rendszerek, melyek képesek előre jelezni a konfliktushelyzeteket, így lehetőség van a – felkínált alternatívák mellett – gyors döntéshozatalra, amellyel a hálózaton az összkésés (másodlagos késés) minimalizálható,
- statisztikai rendszerek, automatikus menetgrafikon készítések,
- elszámolási rendszerek, amelyek a tényadatok alapján képezik a további elszámolás alapját,
- hibakezelő rendszerek, automatikus hibajelzések és a megfelelő szolgálatok riasztása,
- CCTV hálózat integrálása, pl. egy állomáson annak a peronnak a megjelenítése, amelyre a vonat érkezik – ez nem csak a biztonság szempontjából előnyös, hanem a kezelő a vonatokat meg is tudja figyelni, utas nagyság folyamatosan figyelhető,
- térvilágítási rendszerek távfelügyelete,
- váltófűtés felügyelete,
- felsővezetéki rendszerek felügyelete,
- határátlépő vonatok menedzsmentje, stb.

Az OCC központokból a helyi tolatómozgások is felügyelhetők, egyes esetekben közvetlenül vezérelhetők, de ez függ az alsó szinten található biztosítóberendezésektől is. Jelenleg az is látható, hogy azokon a nagyforgalmú állomásokon érdemes külön helyi irányítókat alkalmazni, ahol a tolatási mozgások száma nagy, ezekkel a műveletekkel nem terhelve a vonali irányítók munkáját. Ezekben az esetekben a KÖFI központ az adott állomást csak KÖFE funkcióként látja, a parancskiadás az adott állomáson történik.

Az OCC központokba nem csak döntéstámogató eszközök telepítése lehetséges, hanem forgalomirányítási automaták is szerephez jutnak. Ilyen automaták az automata vágányútbeállítási funkciótól a menetrendalapú vezérlésig terjednek, ahol a vonatok számára a vágányútbeállítási folyamat mentes a humán közbeavatkozástól, azaz a vonatok számára előírt vágányutak emberi közbeavatkozás nélkül, automatikusan beállnak. Ezek a programok kisebb zavarhelyzetekben probléma nélkül tudnak futni, de komplex forgalomirányítási helyzetekben igénylik az emberi közbeavatkozást. A hálózaton kialakuló zavarok kezelésére ezek az automaták nincsenek felkészítve, a menetrend újratervezésének megoldása jelenleg a forgalomirányító személyzet tapasztalatai alapján történik.



2. ábra Csorna KÖFI központ (saját forrás)

### 2.1.1 Az operatív irányítás szintjei KÖFI vezérelt vonalakon, a döntéshozatal

Az operatív irányítás fogalmába a ténylegesen az OCC központok forgalmi vonalirányítói tudnak beavatkozni. A döntéshozatal szintje azonban ennél bonyolultabb különösen akkor, ha a megoldást energiafelhasználás szempontjából is vizsgálni akarjuk. Zavarmentes esetben a menetrend képezi a közlekedés rendjét, ekkor operatív döntéseket nem kell hozni. Ha a menetrend tervezése valamennyire energiaoptimális (nem kell a vonatoknak feleslegesen gyorsítani és lassítani), akkor várható, hogy a realizáció is követni fogja a tervezettet. Egyes zavarhelyzetekben – pl. kis késéssel közlekedő vonatok esetén - a „rerouting” és „rescheduling” feladatot <sup>1</sup>, vagyis az újratervezést – az OCC központokban forgalomirányító személyzet is meghozhatja. A döntések során figyelembe kell venni azt, hogy a döntések hatása nem csak az adott operátor által felügyelt körzeten belül érvényesülhet, hanem tovább terjedhet a szomszédos körzetekre, vagy egyes esetekben a teljes vasúthálózatra. A döntéshozatali folyamat emiatt nagymértékben szabályozott, az egyes fellépő zavareseményektől függ, ki jogosult az újratervezési feladat megoldására, vagy ki az, aki szabályokat állíthat egy ilyen döntési helyzetben. Például egy baleset során a döntési folyamatban többen is részt vesznek, a forgalmi vonalirányító munkáját pl. különböző szakszolgálati diszpécserok is segíthetik.

A döntéshozatali folyamat során általában a cél az, hogy a zavaresemény miatt keletkező ún. elsődleges késés minél kisebb hatással legyen a többi jármű közlekedésére, vagyis az elsődleges késés okozta hatások minél kisebbek legyenek. Ez a hatás elsősorban az ún. másodlagos késést jelenti, mely nem más, mint az elsődleges késés okozta további késés a hálózaton. A hatás természetesen energiafogyasztás változással is jár, mivel felesleges gyorsítások és megállások keletkezhetnek a zavarhelyzet okozta konfliktushelyzetek következtében.

A döntés során a forgalomirányítónak különböző szabályozásokat kell figyelembe vennie, melyek szigorúan szabályozhatják és szűkíthetik a lehetséges döntési alternatívákat. Jelenleg nem áll rendelkezésre olyan döntéstámogató eszköz, mely a döntések hatását energiafelhasználási

---

<sup>1</sup> A „rerouting” és „rescheduling” fogalmak közvetlen magyar nyelvű megfelelői nem léteznek. A gyakorlatban az látható, hogy a forgalomirányító személyzet minden helyzetben újratervezi a vonatok közlekedését, ezzel egyidejűleg valósítja meg a két feladatot. Természetesen előfordulhat, hogy az újratervezés eredménye ténylegesen csak „rerouting” vagy csak „rescheduling” megoldást jelent, de ettől függetlenül ez a szóhasználat az elterjedt.

szempontból is vizsgálná. A döntés (tulajdonképpen mindig „rerouting” és/vagy „rescheduling”) eredménye minden esetben egy új tervezett menetrend, mely tartalmazza implicit módon a megváltozott vágányutakat és sebességeket, a módosult indulási és érkezési időket, az esetleges csatlakozások módosítását, stb. A döntés emiatt visszahat a tényállapotra, és tulajdonképpen egy zárt hurkot alkot.

## 2.2 Optimális újratevezés

Ennek a megközelítésnek a célja az, hogy a jelentkező zavarok esetére kínáljon valamilyen szempontok szerint optimalizált megoldást, ami tulajdonképpen egy rtRTMP (real-time Railway Traffic Management Problem) feladat. A jelentkező zavarok minden esetben késést, így költséget is okoznak a vasúti közlekedés résztvevőinek. A járművezetőknek hagyományosan nincs információjuk a többi jármű pontos helyzetéről és a zavarokról csak akkor, ha azt a forgalomirányító személyezett külön jelzi feléjük. Ez azt jelenti, hogy csak a forgalomirányító központban lévő irányítók lehetnek azoknak az információknak a birtokában, amely egy forgalmi helyzet feloldásán optimális megoldást is adhat. Jelenleg az elsődleges cél minden esetben a késések minimalizálása, főleg a személyszállításban. A késések a csatlakozó járművekre is jelentős hatást tudnak gyakorolni, tovább növelve az egyes vonatok késését és így a közreműködők költségét. A központokban a később előálló konfliktushelyzetek is felismerhetők - általában út-idő diagram alapján – így a döntések már jó előre, a konfliktushelyzet tényleges kialakulása előtt meghozhatók. Ezek a döntések a legtöbbször a forgalomirányító tapasztalatán, illetve más, szabályozott utasítások alapján történnek (pl. vonatok közötti prioritások figyelembe vétele). A leggyakrabban alkalmazott forgalomirányítási elv az ún. FIFO (first in first out) elv, vagyis az elsőnek érkező vonatnak biztosítunk lehetőséget a továbbhaladásra az infrastrukturális adottságok figyelembe vételével. A legtöbb esetben azonban nem csak egy, hanem többféle feloldása is lehet egy forgalmi helyzetnek, és közöttük lehetnek olyan megoldások, amelyek energiafelhasználás szempontjából kedvezőbb megoldást adnak. A „rerouting” feladat megoldása során a vonatok az előre tervezett vágányutak helyett más, alternatív vágányutakon is közlekedhetnek az optimális megoldás során, a „rescheduling” feladat pedig a vonatok egymást követő sorrendjének megváltoztatását jelenti. Általában látható, hogy a késések minimalizálására adott válaszok kedvezőbbek akkor, ha a „rerouting” és a „rescheduling” lehetőség egyidejűleg kerül figyelembevételre. Az energiaigény meghatározása és az egyes megoldások közötti energiafelhasználás kiszámítása igényli a számítógépes forgalomirányítási lehetőségek kidolgozását, mivel ilyen azonnali döntést kívánó helyzetek feloldásában a humán döntési folyamat nem tud energiaszámításokat végezni. Ezek mellett további lehetőségként kínálkozik sebességek ajánlása a járművezetők részére, hiszen egy  $V_{max}$  jelzési kép nem biztos, hogy a rendszer szempontjából kedvező energiafelhasználást jelent akkor, ha a következő jelzőnél meg kell állni. E mellett, egy kisebb sebességgel való elhaladás esetén elképzelhető, hogy felesleges gyorsítások és lassulások elkerülhetők lesznek.

Az újratevezési feladat feloldható például ún. „alternate graph” módszerrel, ami felfogható egy „job-shop scheduling” problémaként [5] és [6]. Ennek a módszernek a gyakorlati alkalmazása az ún. ROMA (Railway traffic Optimization by Means of Alternative graph) valós idejű forgalomirányító rendszer [7]. Ez a módszer önmagában még nem ad energiaoptimális megoldást, de a késések minimalizálhatók a vonatok követési sorrendjének meghatározásával. Lehetőség van a zavarhelyzetek feloldására ún. „mixed integer linear programming” módszer alkalmazásával. Ez a módszer energiaoptimális megoldást is adhat, figyelembe tudja venni akár azt is, hogy egyes esetekben a vonatok megállítása egyes megállóknál elhagyható [8] és [9]. A MILP megoldás és a hagyományos irányítási módok alapján történő feloldás OpenTrack szimuláció során is igazolható [10].

A szerzők a korábbi eredményeikre alapozva az SNCF Réseau-val (francia pályahálózat-működtetővel) együttműködve empirikus elemzést végeztek annak felmérésére, hogy az optimalizáláson alapuló

döntéstámogató eszközük milyen tényleges hatással lehet a valós forgalomirányításra. Ezt az elemzést a francia PREDIT (Programme de Recherche Et d'Innovation dans les Transports terrestres) programon belül a SIGIFret (Simulation d'une Gestion Innovante des circulations Fret) kutatási projekt keretében végezték különböző esettanulmányokon a Paris-Le Havre vonalon. A projekt keretében egy 7 km-es pályaszakaszt modelleztek a Mantes-la-Jolie állomás körül és egy 27 km-es szakaszt a Rouen-Rive-Droite állomás körül az OpenTrack szimulációs eszköz felhasználásával. Ez az eszköz tehát lehetővé teszi a diszpécserek különböző választásainak hatásértékelését. Számos, valós zavarokat bemutató forgatókönyvet dolgoztak fel, amiket az SNCF-Réseau szakemberi választottak ki úgy, hogy azok a vonalon előforduló jellemző szituációkat reprezentálják.

Az optimalizálás hatásának értékeléséhez összehasonlították a vonatok késéseit a különböző stratégiák szerint meghozott forgalomirányítási döntések szimulációja után. Először a saját RECIFE-MILP (REcherche sur la Capacité des Infrastructures Ferroviaires) algoritmusukat vizsgálták meg azokban az esetekben, amikor a „rerouting” tiltott, ill. engedélyezett. Ezután szimulálták az „először érkező először kiszolgált” (FCFS/FIFO) stratégiát, amely szerint az első vonat az általa igényelt vágányszakaszon elsőnek engedhető át. Figyelembe vették továbbá azt a forgalomirányítási stratégiát, amely jelenleg Franciaországban és számos európai országban eleve elfogadott: ugyanazt a vágányszakaszt igénylő két vonat között a pontosabb vonatot részesítik előnyben, és a már késésben lévő vonatokat állítják meg, vagy lassítják le. Végül a Rouen-Rive-Droite irányítási körzetben három valós zavartatási forgatókönyv esetén foglalkoztak a diszpécser által ténylegesen meghozott döntések és az algoritmus által elért eredmények összehasonlításával.

A szimuláció valós időben tudja figyelembe venni a biztosítóberendezések korlátait és azok működését (pl. váltóállítási idő, vágányútbeállítási idő). A szimulációban szintén lehetőség van a járművezetők viselkedésének alapszintű modellezésére. Egy további forgalomirányítási algoritmus lehet az ún. mohó algoritmus [11]. Szintén lehetőség van az energioptimális megoldás keresése során a visszatáplált energia figyelembevételére is [12].

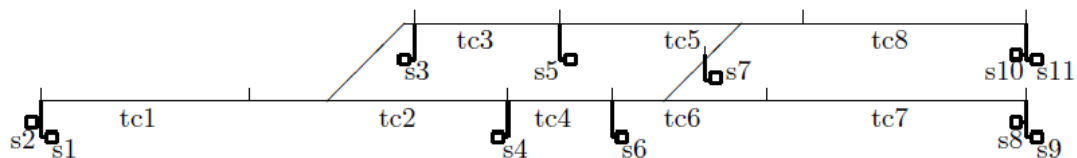
### 3 Forgalomirányítási feladatok megoldása MILP alapú algoritmusokkal

Ebben a fejezetben egy MILP (Mixed Integer Linear Programming) alapú megoldást mutatunk be, amely a forgalomirányítás problémáinak „rescheduling” és „rerouting” felhasználásával történő megoldását célozza meg. A fejlesztést az aktuális „state-of-the-art” kutatások alapján végeztük.

#### 3.1.1 Az infrastruktúra modellezése

Az optimalizáció legfontosabb és legbonyolultabb bemenete az infrastruktúra modellje. A korábban említett publikációkat követve az infrastruktúra modell alapját a sínáramkörök képezték. A sínáramkörök a vasúti hálózat olyan egymással nem átfedő elemi egységei, amelyekben az ott tartózkodó járművek detektálása automatikusan történik. Az infrastruktúra egyes pontjait sínáramkörök meghatározott sorrendű halmaza köti össze, melyet a vasút útvonalának tekintünk. Fontos megjegyezni, hogy a legtöbb esetben a bejárt pálya kiinduló- és végpontját több lehetséges útvonal is összeköti, ami az optimalizáció lehetőségét kínálja fel. A sínáramkörök bizonyos (meghatározott sorrendű) csoportjai vágányutakat alkotnak, amelyeket egy adott iránynak megfelelő jelzők határolják. A jelzők teszik lehetővé a járművek késéseinek ütemezését. A 3. ábra szemlélteti egy infrastruktúra sematikus modelljét.

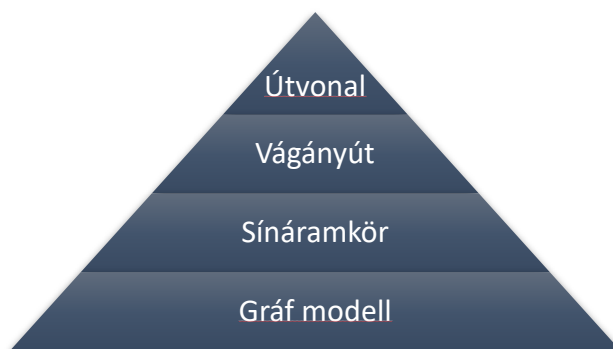




3. ábra Infrastruktúra modell az MILP problémához (forrás: [13])

A 3. ábraán tc1, tc2, stb. jelöli a sínáramköröket, míg s1, s2, ... szemléltetik a járművek irányítására szolgáló jelzőket. Többféle jelzőt használnak az irányítás során, melyek a lehetséges állapotaik számában különböznek. A leggyakoribb típusok a két- (vörös, zöld) és a háromállapotúak (vörös, sárga, zöld). A kutatás során a kétállapotú jelző rendszer került modellezésre. A 3. ábraán szereplő infrastruktúrában három be-, illetve kilépőpont van: s2, s1; s8, s9; és s10, s11 jelzőknél. Feltételezve, hogy az infrastruktúra nem tartalmaz peront, három útvonalat tartalmaz: az s2-s10 a tc3, vagy tc6 érintésével és az s2-s8 útvonal. Természetesen megjegyzendő, hogy ezek az útvonalak kétirányúak, amelyekhez tartozó vágányutak nem identikusok. Például az s2-s10 tc3-at érintő útvonal két vágányútból áll: az s2-s3 és s3-s10-ból. Azonban, ugyanez az útvonal ellentétes irányban s11-s5 és s5-s1 vágányutakat érint.

Bár az optimalizáció csak sínáramkörök tulajdonságait veszi figyelembe, az egyes sínáramkörök egymáshoz kapcsolódásának leírására egy alacsonyabb absztrakciós szinttel bíró leírás is szükséges. A kutatásunk során az infrastruktúra modell alapját egy gráf alapú leíró adta. Így alakult ki az infrastruktúra végső modellje, mely négy fő absztrakciós szintet állít elő, melyeket a 4. ábra szemléltet.



4. ábra Az infrastruktúra modell absztrakció szintjei

A gráf alapú modell csomópontokból és az azokat összekötő élekből áll, mely így lehetővé teszi a sínek egymáshoz kapcsolódásának és a váltóknak a modellezését is. A gráf élei, mint sínek a következő tulajdonságokkal bírnak:

- fizikai leírás:
  - hossz,
  - maximális sebesség,
- peron indikátor.

A sínáramkörök gráf élek halmazából épülnek fel, az egy adott irányba álló jelzők közti sínáramkörök pedig vágányutakat alkotnak. A vágányutak meghatározott sorrendje útvonalat alkot. Az útvonalak két végpontot kötnek össze, melyek lehetnek az infrastruktúra be- és kilépő pontjai, illetve peronok. A gráf élek, a sínáramkörök és az útvonalon lévő vágányutak megfelelő sorrendje az útvonal megadásakor az útvonal virtuális bejárásával kerül meghatározásra.

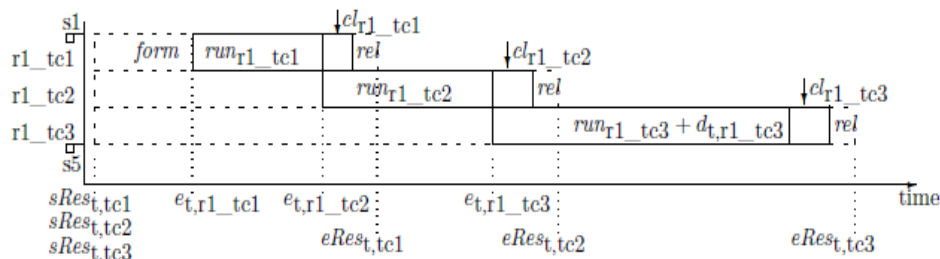
### 3.1.1.1 Járművek modellezése

Az optimalizáció másik fontos bemenetét képezik az infrastruktúrán közlekedő járművek. A járművek mozgása fix sebességprofillal került modellezésre. Ez azt jelenti, hogy a járművek vagy konstans haladási sebességgel közlekednek, vagy pedig állnak. Továbbá a jármű modell végtelen gyorsulást és lassulást feltételez, vagyis a gyorsulásra vonatkozó dinamikai korlátokat figyelmen kívül hagyja. A járművek a következő tulajdonságokkal rendelkeznek:

- mozgásirány (haladó/tolató),
- peron indikátorok:
  - kiindulási,
  - végállomási,
- maximális sebesség,
- szerelvény hossz,
- tervezett belépési idő,
- tervezett kilépési idő,
- kapcsolódó vonatok:
  - megforduló vonat, szétváló, egyesülő vonat,
  - azonos szerelvény,
  - csatlakozó vonat,
- kiinduló pont,
- célpont.

Minden járműnek a megadott kiinduló- célpontja között kell közlekednie. Alaphelyzetben a kiinduló és célpontok az infrastruktúra végpontjai lehetnek. Amennyiben a peron indikátorok átkapcsolása megtörténik, a hozzájuk tartozó kiinduló- vagy célpontok csak peronok lehetnek. Amennyiben a tervezett kilépési idő értékét, negatív alapértéken hagyja a felhasználó, az a késések nélküli haladási sebességből kerül kiszámításra a szoftver által.

A biztonságos üzemeltetés érdekében a járművek előbb lefoglalják a vágányút összes sínáramkörét, minthogy arra belépnének, melyet bejelentkezési időnek (*Formation time*) nevez a szakirodalom. Továbbá, miután egy jármű elhagyott egy sínáramkört, azt egy ideig még továbbra is lefoglalja, mely időt oldási időnek (*Release time*) nevezünk. A kapcsolódó vonatok érkezése és indulása között szükséges egy minimális elkülönítési időt (*Minimum separation time*) biztosítani a szerelvény konfiguráció-csere lebonyolításának vagy az utasok ki- és beszállásának biztosítása érdekében. Ezek alapján, az r1 útvonalon, r1\_tc1, r1\_tc2 és r1\_tc3 három nominális sínáramkörből álló s1-s5 vágányút lefoglalásának ütemezését szemlélteti az 5. ábra.



5. ábra Sínáramkörök lefoglalásának ütemezése (forrás: [13])



A 5. ábraán szereplő  $sRes_{t, tci}$ ,  $eRes_{t, tci}$  jelöli a  $t$  vonat  $i$ -dik sínáramkörének lefoglalását és feloldását, míg a bejelentkezési és oldási időt  $form$  és  $rel$  jelölik. Az  $rj$  útvonalon közlekedő  $t$  vonat  $tci$  sínáramkörre történő belépését pedig  $e_{t, rj, tci}$  indikálja. Fontos bemenetét képezi még az ütemezésnek a  $run_{rj, tci}$  és  $cl_{rj, tci}$  haladási és kilépési idők. Bár a forrásként szolgáló kutatás a  $tci$  sínáramkörön történő tartózkodás idejét (haladási idő) csak az  $rj$  útvonal függvényében határozta meg, jelen tanulmány a  $t$  vonat haladási sebességét vette alapul, figyelembe véve ezzel a jármű dinamikai határait. A haladási sebesség a járműre jellemző maximális sebesség és a pályából adódó maximális sebesség minimumaként számítható. Az így megkapott haladási sebességből pedig egyenes vonalú egyenletes mozgást feltételezve kiszámítható a haladási és a kilépési idő a sínáramkör és a járműszerelvény hosszának ismeretében. Az útvonal alapú számítás lehetőséget nyújtana a pálya domborzati viszonyainak figyelembevételére, így a kutatás folytatásában ez is a vizsgálat tárgyát képezi. Fontos ismét kiemelni, hogy a jármű modell az infrastruktúrához kizárólag a kiindulási- és a célponttal kapcsolódik fenntartva ezzel az optimális útvonal kiválasztásának lehetőségét.

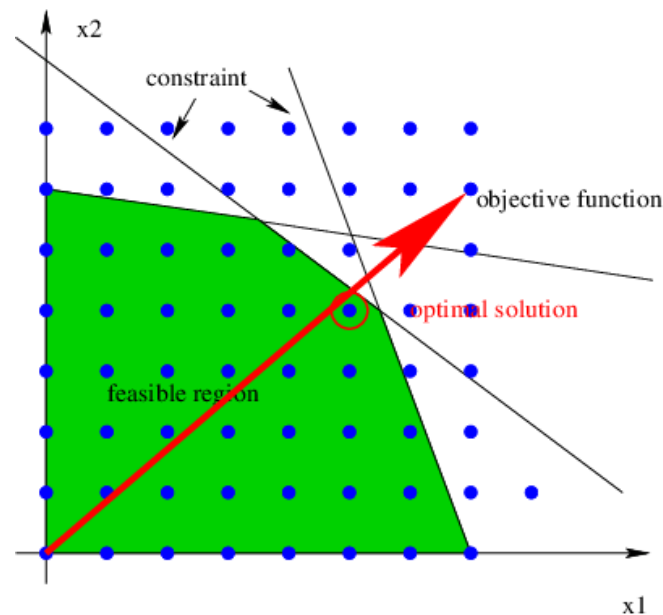
Az MILP optimalizációs megoldások esetén megszorításokat kell definiálnunk a fizikai korlátozások és a vasútüzem szabályainak figyelembe vételéhez. Ezek lehetnek idővel kapcsolatos megszorítások (pl.: egy vonat nem léphet be korábban az irányítási körzetbe, mint a menetrend érkezési ideje). A késések kezeléséhez kapcsolódó megszorítások, amelyek esetében három eset lehetséges: nincs megszorítás, bármely jelzőnél megengedett késés, vagy késés csak az irányítási körzeten kívül megengedett. Megszorítások hiányában a késés bárhová rendelhető az irányítási körzeten belül; ebben az esetben az előfeltételezés az, hogy a diszpécser bármely sínáramkör felett megállíthatja a vonatot az útvonal során. Ha bármely jelzőnél megengedett késés alkalmazása, akkor ebben az esetben az az előfeltételezés, hogy a vonatoknak a jelzők előtt meg kell állniuk. Ha késést csak az irányítási körzeten kívül lehet megadni, akkor nincs különbség az állandó, és a változó sebességű modellek között, azonban az irányítási körzetek között összetett koordinációs problémák merülhetnek fel. Megszorítások szükségesek még a gördülőállomány konfigurációjának megváltoztatása miatt: a vonatok irányváltásának, összekapcsolásának és oszlatásának eredményeként létrejövő vonatok érkezési és indulási időinek koherensnek kell lennie. Végül megszorításokat kell definiálnunk a kapacitással kapcsolatosan: egy szakaszt egyidejűleg csak egy vonat foglalhat el. Szintén modellezhetők a megcsúszási szakaszok kezelése is (pl. céloldás időzítés kényszerrel). A szakaszhoz tartozó összes sínáramkörnek foglaltnak kell lennie egy vonat által, mielőtt a következő vonat belépne a szakaszba. A menetrendek megtervezésekor figyelembe veszik a „blocking time” elvet az egymást követő vonatok közötti időbeli szétválasztáshoz, amely lehetővé teszi, hogy a mozdonyvezetők mindig csak szabad jelzést adó jelzőkkel találkozzanak. Ha a „blocking time” elvet alkalmazzuk az rtRTMP-re, akkor a problémát olyan megszorítások halmazává transzformáljuk, amelyek hatása az lesz, hogy a sínáramkör lefoglalása megkezdődik amint a vonat foglalttá teszi az előző szakasz első sínáramkörét.

Az rtRTMP célja a vonatra gyakorolt maximális másodlagos késés minimalizálása, azaz a célfüggvény:

$$\min D \quad (1)$$

A lineáris programozás a szélsőérték keresési eljárások olyan speciális fajtája, melyben az  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  célfüggvény és a szélsőérték keresési tartományát leíró kényszerek lineáris függvények. Az egészértékű lineáris programozás esetén további megkötés, hogy az állapotter elemei egész számok lehetnek. Az egészértékű lineáris programozás menetét a 6. ábra szemlélteti. A vasúti közlekedésszervezés optimalizációjára felhasznált MILP-alapú megoldás, egy olyan eljárás, amely során állapotter állapotváltozóinak csak egy részhalmazára érvényes az egészértékű megkötés, míg a többi folytonos állapotváltozó. Általánosságban az egészértékű lineáris programozás kisebb számítás kapacitás igényrel oldja meg az azonos dimenziójú szélsőérték keresési problémákat, mint a hagyományos

numerikus eljárások. Ez megfelelő alapot biztosít a valós-idejű optimalizációra komplex infrastruktúra esetén is.



6. ábra Egészértékű lineáris programozás

A lineáris programozás során használt kényszerek típusait a (2)-(4) összefüggések írják le az  $x$  állapotvektor függvényében.

$$A \cdot x \leq b \quad (2)$$

$$A_{eq} \cdot x = b_{eq} \quad (3)$$

$$l_b \leq x \leq u_b \quad (4)$$

A fent leírtak alapján megszorításokat vezettünk be, melyeket az alábbiakban részletezünk.

Időbeli megszorítások:

- A vonatok nem léphetnek be az irányítási körzetbe korábban, mint az irányítási körzetbe való menetrend szerinti érkezési időpontjuk.
- A névleges sínáramkörök belépési időpontját 0-ra kell állítani, ha nem használt az az útvonal, amelyhez a sínáramkör tartozik. Erre egy korábbi előfeltételezésünk miatt van szükség: minden névleges sínáramkör csak egy útvonalhoz tartozhat.
- A vonat nem léphet az adott sínáramkörre, ha az előző sínáramkör hatókörében nem töltötte el legalább a foglaltsági idejét.
- Minden vonat pontosan egy útvonalat használjon.
- Ha az irányítási körzet tartalmaz állomást és a vonatok menetrend szerint közlekednek, akkor meg kell adni a vonatok érkezése és indulása között biztosítani kell minimális elválasztás idejét.
- A térbeli koherenciát a vonatok számára a rendelkezésre álló útvonalak biztosítják: az érkező vonat számára elérhető bármely útvonal egy peronnal ér véget és az induló vonat számára elérhető útvonal egy peronról indul.

A késésekhez kapcsolódó megszorítások:

- Minden egyes névleges sínáramkörre – amely a saját szakaszának záró sínáramköre, és ami az adott vonat által használt – a késési változó értéke megegyezik azzal az értékkel, amely abban

pillanatban tapasztalhatunk, amikor a vonat rálép a sínáramkört követő névleges sínáramkörre, mínusz az a pillanat, amikor a vonat rálép a sínáramkörre, mínusz a foglaltsági idő.

- A vonatok nem késhetnek mielőtt az irányítási körzet hatókörébe lépnek, kivéve, ha egy peronról indulnak, vagy ha tolatási mozgást valósítanak meg, vagyis a vonat pontosan egy megadott időpontnál lép rá az első névleges sínáramkörre a kiválasztott útvonal mentén.

A gördülőállomány konfigurációjának megváltoztatása miatti megszorítások:

- Biztosítani kell a minimális elválasztást az új vonat érkezése és indulása között, ha az előző vonat(ok)ból új vonat(ok) lesz(nek) irányváltásból, összekapcsolásból vagy oszlatásból eredően.
- Az irányváltás, összekapcsolás, oszlatás helyén lévő valódi sínáramkör fenn legyen tartva az új vonat által egészen addig, amíg az új vonat megérkezik a peronra, beleértve az oldási időt is.
- Az összekapcsolással megkapott új vonat lefoglalása (igény az adott sínáramkörre) az előtte érkező vonat lefoglalásának (igényének) megszűnését követően kezdődhet.
- Azokat a kapacitásproblémákat, amikor két vonat egyidejűleg igényt tart egy valódi sínáramkörre, a kapacitás megszorításoknál leírtak szerint kezeltük.
- A vonat időbeli koherenciája mellett biztosítani kell a vonatkozó térbeli koherenciát is: az azonos gördülőállományt használó vonatoknak ugyanazt a peront tartalmazó útvonalakat kell használniuk. Természetesen, ha két vonat számára egyidejűleg rendelkezésre álló útvonalak ugyanazt a peront érintik és a diszpécsernek nem engedélyezett a peron megváltoztatása, akkor ez a megszorítás triviálisan teljesül.

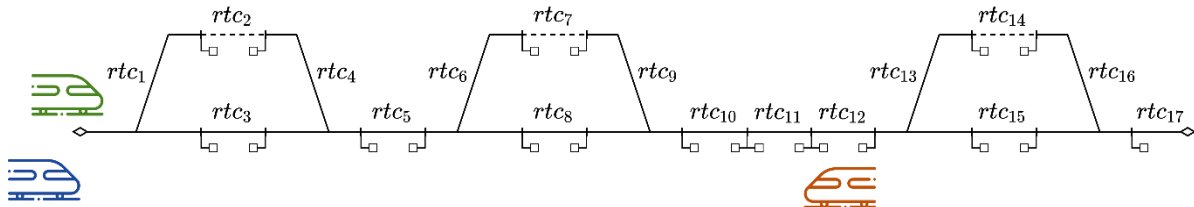
Kapacitás megszorítások:

- A vonat által a valódi sínáramkör lefoglalása azonnal megkezdődik, amint a vonat belép a névleges sínáramkör hatókörébe, mínusz az útvonal kialakulási ideje.
- A lefoglalás (ill. a sínáramkör fenntartása) akkor ér véget, amikor a vonat rálépett a következő sínáramkörre plusz a felszabadulási és oldási idők összege.
- A valós sínáramkör lefoglalások nem fedhetik egymást, azaz legfeljebb egy vonat foglalhat le egyidejűleg egy sínáramkört figyelembe véve a kapacitás megszorításokat.
- Egy adott valós sínáramkör előző vonat által okozott lefoglalásnak véget kell érnie, mielőtt az új vonat lefoglalása megjelenne a sínáramkörön. Emellett az adott valós sínáramkör új vonat által okozott lefoglalásnak véget kell érnie mielőtt az előző vonat általi lefoglalás megkezdődne.

A megcsúszások kezelése egy fontos biztonsági szempont, amely azt hivatott figyelembe venni, hogy a jármű nem biztos, hogy képes a jelző előtt megállni. Az MILP alapú vasúti forgalom-menedzsment optimalizáció nem stratégiai döntést hoz a járművek késleltetéséről, ezért a jármű időben történő megállítása mindig feltételezett. Azonban, a megcsúszásokhoz köthető biztonsági előírásokat figyelembe tudjuk venni az optimalizáció során. A megcsúszásokból adódó balesetek elkerülése érdekében, a jelzőhöz közeledő jármű nem csak a vágányút sínáramköreit foglalja le, hanem a megcsúszási távolságban érintett, követő sínáramkört/sínáramköröket is (a menettervi kizárások beépíthetők).

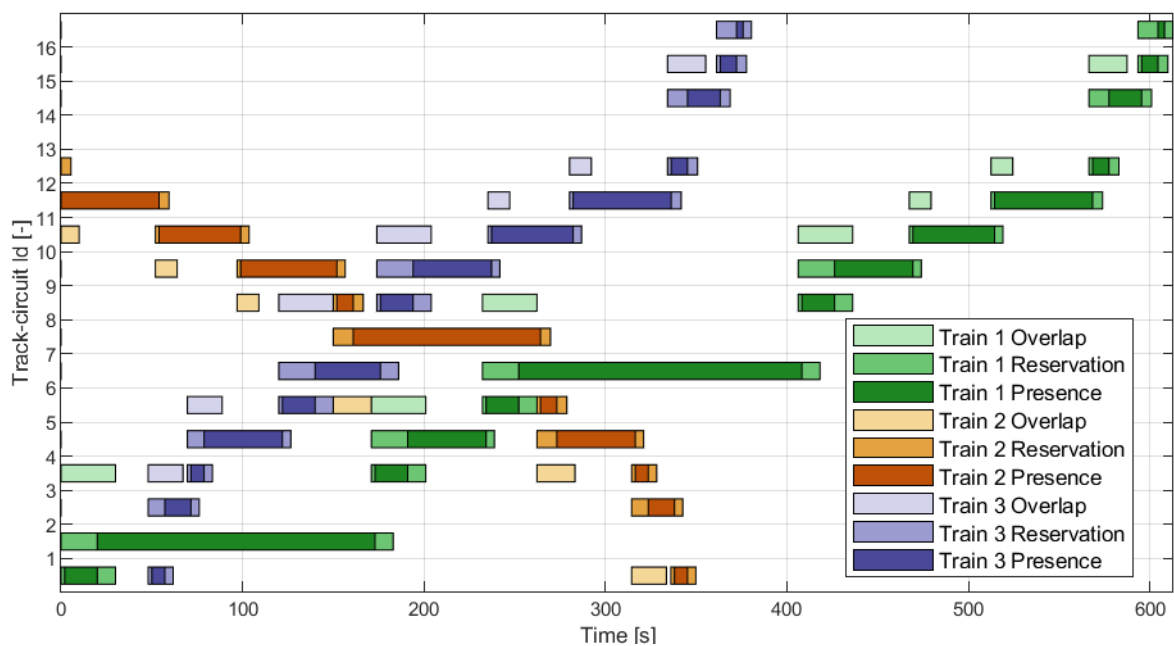
Az eredményeket egy három állomást összekötő infrastruktúra modellen értékeltük, mely sematikus rajzát a 7. ábra szemlélteti. A modellezett felügyelt hálózat 17 sínáramkört tartalmaz, melyek 8 útvonalat alkotnak, így a nominális sínáramkörök száma 226. Az ábrán a sínáramkörökhöz rendelt azonosító számon kívül feltüntetésre kerültek a jelzők, melyeket a sínáramkörök végén található

négyzetek szimbolizálnak és az irányítottságuk hordozza a jelentést, hogy mely irányból jövő járművekre érvényesek. A szaggatott vonallal jelölt szakaszok a peront tartalmazó sínáramköröket szimbolizálják. Az ábra szemléletesen továbbá, a kiindulási forgalmi helyzetet, amely 3 járműből áll. A zölddel jelzett vonat  $t=2$  másodpercnél lép be a hálózatra, és az az  $rtc_7$  sínáramkörön tervezetten megáll utascserre céljából. Az az öt követő kézzel jelzett vonat 48 másodperccel később. A pirossal kiemelt vonat velük ellentétesirányú mozgást végző jármű, iniciális, vagyis az optimalizáció kezdetekor már az  $rtc_{12}$  sínáramkörön tartózkodik.

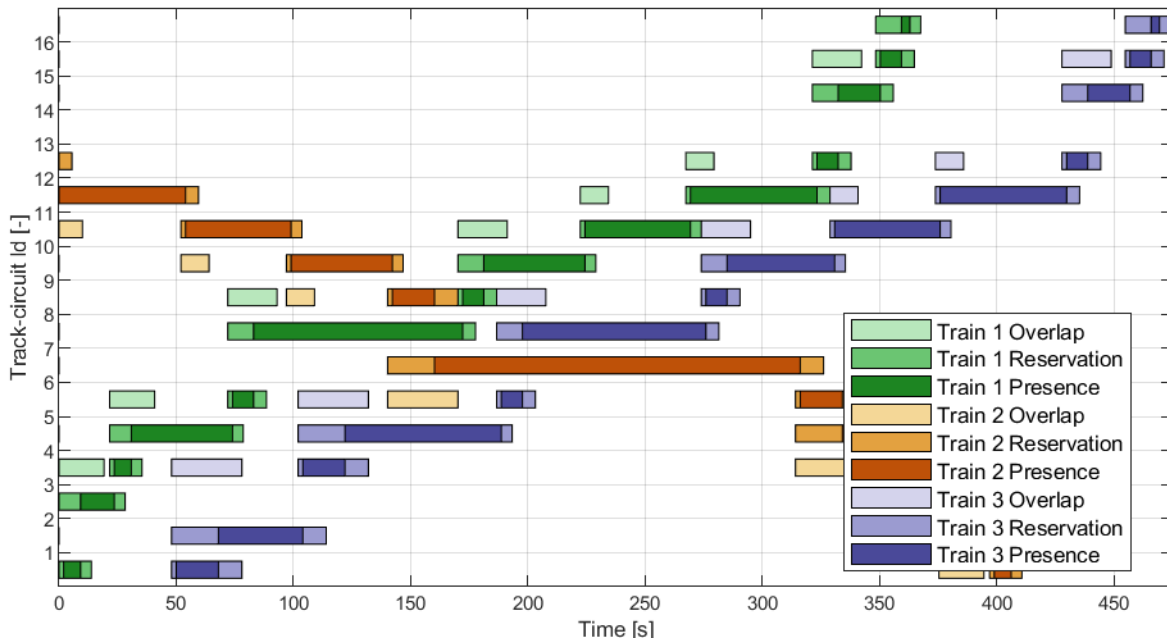


7. ábra A kiértékeléshez használt infrastruktúra modell és a kiindulási forgalmi helyzet

A 7. ábra által szemléltetett kiindulási forgalmi probléma optimális megoldását kétféle jármű prioritással vizsgáltuk. Ezen kívül vizsgáltuk a megcsúszások és az iniciális jármű hatását, továbbá a személyvonat (mindkét esetben más) tervezett várakozását az  $rtc_7$  sínáramkörön. A 8. ábra által mutatott út-idő diagramok a kiindulási forgalmi helyzet optimális megoldását mutatják be.



(a)



(b)

8. ábra: A kiindulási vasúti forgalmi helyzet optimális megoldásának út-idő diagramja  
 (a) zöld – személyvonat, kék – gyorsvonat, narancs – tehervonat (b) zöld – gyorsvonat, kék – tehervonat,  
 narancs – személyvonat

A 8. ábra a) része annak az optimalizációs problémának megoldását szemlélteti, amely során a zöld jármű, mint személyvonat késleltetése  $w_t = 33,31\%$ -os, a kék  $66,62\%$ -os, míg a narancssárgával jelzett tehervonat  $0,07\%$ -os prioritással került figyelembevételre. Látható, hogy a másik két járművel ellentétesirányba közlekedő tehervonat nem az infrastruktúra egyik szélső ( $rtc_1, rtc_{17}$ ), hanem az  $rtc_{12}$  sínáramkörét használja először. Azonban, feltételezve, hogy éppen az optimalizáció kezdetekor lépett be, az  $rtc_{12}$ -t megelőző  $rtc_{11}$  sínáramkört kezdetben még foglalja. Az ábra szemlélteti, hogy a zölddel jelzett személyvonat az  $rtc_7$  sínáramkörön sok időt tartózkodik, annak ellenére, hogy ott nem áll konfliktusban másik járművel, amelynek oka, hogy ott tölti a tervezett 2 perces várakozási idejét. Látható továbbá, hogy a késsel jelzett gyorsvonat prioritását figyelembevéve az optimális megoldás során, az megelőzi a személyvonatot az  $rtc_4$  sínáramkörön. Majd ezután a tehervonat még a személyvonatot is megvárva, csak utána lép be az  $rtc_6$  sínáramkörre miután az szabadabbá válik. Ez alapján elmondható, hogy a különböző járművek prioritását megfelelően vette figyelembe az optimalizációs eljárás.

A 8. ábra b) része által szemléltetett megoldás során a zölddel jelzett jármű kapja a legmagasabb prioritást, a kék jármű a legalacsonyabbat, míg az  $rtc_7$  sínáramkörön található peronon várakozó személyvonatot a pirossal jelzett jármű jelképezi. Az út-idő diagram alapján látható, hogy ebben az esetben a zöld jelzésű jármű szinte késleltetés nélkül, a leghamarabb lép ki a felügyelt hálózatról tekintve a magas prioritását. Ezzel szemben a késsel jelzett tehervonat, aki később lép be az infrastruktúrára, mindkét járműnek elsőbbséget adva a legkésőbb hagyja el a hálózatot, annak ellenére, hogy a piros jelzésű személyvonat a tervezett várakozását is letölti. Mindkét ábrán feltüntetésre kerültek a normál haladásból adódó és a megcsúszásokat figyelembe vevő sínáramkör foglaltságok. Látható, hogy a leghalványabb színnel jelölt megcsúszásokat figyelembe vevő foglaltságok sem fednek át egyetlen másik jármű normál haladásából és megcsúszásából adódó foglaltsággal. Így kijelenthető, hogy mind a megcsúszásokat figyelembe vevő, mind pedig a járműmodellt érintő fejlesztések a várt eredményt produkálták.

A döntési folyamatokban az egyik legnagyobb kérdés az, hogy az algoritmus milyen gyorsan képes választ adni a problémára, hiszen a mai irányítói döntések legtöbbször másodpercek alatt megszülethetnek. Az a) forgalmi helyzet feloldása 0,10, míg a b) forgalmi helyzet megoldása 0,18 másodpercig tartott. Itt az eredmény megoldása kétféleképpen történt.

## 4 Összefoglalás

Az automatizált döntéshozatali lehetőségek növelhetik a vasúti közlekedés hatékonyságát és a kapacitás korlátos infrastruktúra jobb kihasználását jelentős költségnövekedés nélkül, és az energiafelhasználásra is kedvező hatással lehet. A döntéshozatali algoritmusok kifejlesztése az egyik legfontosabb kutatási terület Európában. Az MILP alapú megoldásokkal már régebb óta foglalkoznak több kutatóintézetben és egyetemen is.

Az MILP megoldás megadja azt, hogy az egyes vonatoknak mikor kell a sínáramköröket elfoglalni, és azokon mennyi időt kell eltölteni. A szimuláció jelenleg ezeken a szakaszokon a be- és kilépési időket és a szakaszok hosszát figyelembe véve, azokon átlagsebességgel közlekedtetni le a járműveket. Ez azt jelenti, hogy meg lehet mondani előre, hogy a járműveknek mikor és hol kell tartózkodniuk ahhoz, hogy a másodlagos késés minimalizálható legyen. Erre egy következő lépésben valós szimuláció ültethető, mely figyelembe veszi a járművek pontos menetdinamikai tulajdonságait, illetve e vizsgálat során egy energiaoptimális dinamikus sebességprofil is megállapítható, mely során a vágányúti feltételek folyamatosan betartásra kerülnek.

A jövőben várható, hogy olyan, gyakorlatban is alkalmazható eszközök jelennek meg, amelyek a teljes közeledési folyamatban képesek az aktuális információk alapján döntéshozatalra. Az MILP alapú megoldások mellett a mesterséges intelligencia alapú algoritmusok is megjelenhetnek a közeljövőben.

Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-21-5 kódszámú Új Nemzeti Kiválósági Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával, valamint a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

## 5 Hivatkozások

- [1] Európai Bizottság Tanulmányok: Mobility Strategy, On-line: [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy_en), megtekintve: 2022. május 27.
- [2] Európai Parlament Hírek: 2021 a vasút európai éve, On-line: <https://www.europarl.europa.eu/news/hu/headlines/eu-affairs/20210107STO95106/2021-a-vasut-europai-eve>, megtekintve: 2022. május 27.
- [3] Magyar Államvasutak ZRt. UTASÍTÁS az üzemirányítási és az operatív irányítási szolgálat ellátására (F.3.sz.) 1982/3/2006
- [4] Tarnai G., Sághi B., Ábri F., Cseh A., Földes L., Kukk L., Lövétei I., Melles K. A központi vasúti forgalomirányítás műszaki, technológiai és gazdaságossági feltételrendszerének innovatív vizsgálata BME Közlekedésautomatikai Tanszék, 2011
- [5] Hansen Ingo Arne and Jörn Pachl, Railway Timetabling and Operations, Eurailpress, 2008
- [6] A. D’Ariano and T. Albrecht. Running time re-optimization during real-time timetable perturbations, WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering, 40:147–156, 2010
- [7] Andrea D’Ariano, Francesco Corman, Dario Pacciarelli, and Marco Pranzo, Reordering and local rerouting strategies to manage train traffic in realtime, Transportation Science, 42(4):405–419, 2008.



- [8] Johanna Tornquist Krasemann, Computational decision-support for railway traffic management and associated configuration challenges: An experimental study, *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 5(3):95–109, nov 2015
- [9] Paola Pellegrini, Gregory Marliere, Raffaele Pesenti, and Joaquin Rodriguez, RECIFE-MILP: An Effective MILP-Based Heuristic for the Real-Time Railway Traffic Management Problem, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(5):2609–2619, 2015
- [10] Paola Pellegrini, Gregory Marliere and Joaquin Rodriguez, A detailed analysis of the actual impact of real-time railway traffic management optimization, *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 6(1):13–31, jun 2016
- [11] J. T. Krasemann, Greedy algorithm for railway traffic rescheduling during disturbances: A Swedish case, *IET Intelligent Transport Systems*, 4(4):375–386, 2010.
- [12] Silvia Umiliacchi, Gemma Nicholson, Ning Zhao, Felix Schmid, and Clive Roberts. Delay management and energy consumption minimisation on a single-track railway. *IET Intelligent Transport Systems*, 10(1):50–57, 2016.
- [13] Paola Pellegrini, Gregory Marliere and Joaquin Rodriguez, Real Time Railway Traffic Management Modeling Track-Circuits. *OpenAccess Series in Informatics*. 25. 10.4230/OASICS.ATMOS.2012.23.

## Absztrakt

A korszerű forgalomirányítási központok nagymértékben képesek a vasúti közlekedés hatékonyságát és kapacitását növelni. A konfliktusok felismerésére ugyan léteznek már automatizált megoldások (pl. út-idő diagram alapján), de a konfliktushelyzetben adott válasz ma jellemzően emberi döntésen alapul. Döntéstámogató rendszerek segítségével nem csak a másodlagos késés minimalizálása lehetséges, hanem egyéb – pl. energiahatékonysági – szempontok is felmerülhetnek. Az MILP (Mixed Integer Linear Programming) alapú algoritmusokkal lehetőség nyílik a döntéshozatal támogatására, amely során a biztosítóberendezési kizárások (pl. menettervi kizárások, megcsúszások) is figyelembe vehetők. A cikkben egy háromállomásos hálózat kerül bemutatásra, ahol látható a megoldáskeresés gyorsasága. Erre a megoldásra később energiahatékony dinamikus sebességprofil tervezhető.

Solve an rtRTMP (real-time traffic management problem) with mathematical optimization

Modern OCCs (Operational Control Centers) may help increase the capacity and efficiency of rail transport. Already exists automated conflict recognition systems (like those based on time-distance), but finding the solution is generally based on human decisions. With the aim of decision support systems, it is possible to minimize the secondary delay, and also other aspects - like energy efficiency - can be taken into account. MILP (Mixed Integer Linear Programming) based algorithms may support the decision-making process, during which it is possible to take into account interlocking exclusions (like locking table or overlaps) too. This article presents a three-station network and shows how fast is the speed of finding the solution. Based on this solution, it is possible to design an energy-efficient speed profile for each train.

Lösung eines Echtzeitverkehrskonfliktes durch mathematische Optimierung

Moderne Betriebszentrale ermöglichen eine deutliche Erhöhung an der Effektivität und Kapazität des Eisenbahnverkehrs. Automatisierte Lösungen (z. B. nach Weg-Zeit Diagrammen) stehen schon für Konflikterkennung zur Verfügung, aber die Antwort wird typisch nach menschlichen Entscheidung gegeben. Mit der Hilfe von Entscheidungsunterstützungssystemen kann nicht nur die sekundäre Verspätung minimalisiert werden, sondern auch Energieeffektivitätsaspekte können betrachtet werden. Mit MILP (Mixed Integer Linear Programming) basierenden Algorithmen ist das Entscheidungsprozess auch mit der Berücksichtigung von Stellwerksabhängigkeiten (z. B. konfliktierende Fahrstraßen, Durchrutschwege) unterstützbar geworden. In diesem Artikel wird ein Netz mit drei Bahnhöfen vorgestellt, auf dem die Geschwindigkeit der Lösungssuche ist nachvollziehbar. Auf der Basis dieses Ergebnis kann später energieeffizientes Geschwindigkeitsprofil gerechnet werden.