

Szimulátorral segített eljárás az optimális térközkiosztás meghatározására

© Dolhay Márk

A jelen cikkben bemutatott eljárás, illetve az azt megvalósító szoftver alkalmas egy állomásköz térközkiosztásának optimalizálására, figyelembe véve a pályaadatokat, a térközjelzők fajtáját, a vonatbefolyásoló típusát és a menetrendet.

Bevezető

A MÁV vasúti hálózatán a 2010-es évekre egyre inkább időszerűvé válik a hagyományos „autonóm”, relés technikára épülő, nyíltvonalai biztosítóberendezés kiváltása egy központosított térköz-biztosítóberendezéssel. Az új igényeknek megfelelő eszközök kifejlesztése jelentős költséggel jár, ezért indokoltá vált az új térközbiztosító berendezéssel szembeni forgalmi követelmények alapos elemzése, amely figyelembe veszi a jelenkor és a belátható jövő vasúti forgalmának volumenét és szerkezetét.

A jelen cikkben ismertetett módszer alapjait a vasút automatizálási piac egy meghatározó szereplőjének megkeresésére az Axon 6M Kft. dolgozta ki, egyeztetve a szakma számos szaktekintélyével. A „tesztprojektet” azóta további alkalmazás is követte.

A módszer egy adott állomásköz optimális térközkiosztásának meghatározását célozza, a modern szimulációs és számítástechnika alkalmazásával.

Fontos leszögezni, hogy itt **egyfajta** optimumról beszélünk, amely az átlagos követési idők minimumát jelenti. Az optimumnak mindazonáltal számos más értelmezése lehetséges.

A következő fejezet a módszer alapelvét ismerteti, ha úgy tetszik, a végrehajtó program specifikációját. Az azt követő fejezet bemutat egy konkrét megvalósítást, annak alátámasztásául, hogy a specifikáció megoldható. Végül pedig összefoglalásra kerülnek az első alkalmazás tapasztalatai.

Specifikáció

Bemenő paraméterek

Térközjelzők fajtája

A MÁV F1 utasítása a térközjelzőket a főjelzők közé sorolja, amelyek lehetnek 2-, 3- és 4-fogalmúak (a térközjelzőn indiká-

torok alkalmazása kizárható). A MÁV vonalain túlnyomó többségben levő 3-fogalmú térközjelzők egyben előjelzés is adnak a következő főjelzőre. A korlátozott számban működő 2-fogalmú térközjelzőknek önálló előjelzőjük van. A térközjelzők rendelkezhetnek önálló ismétlőjelzővel.

Vonatbefolyásoló rendszer

A MÁV középtávon az ETCS 2 rendszer használatát tervezi, mindazonáltal a hagyományos 75 Hz-es jelfeladással is még hosszú ideig számolni kell a hazai vasúti vonalakon. A jelen eljárás e kettő vonatbefolyásoló rendszert veszi figyelembe.

Távlati menetrend

Minden vasút-felújítási projekt első lépése egy az adott vonalhoz tartozó forgalmi elemzés, amelynek egyik kimenete a távlati menetrend. Ezért számolunk ennek meglétével a tárgyalat optimalizáló eljárásnál. Természetesen a térközszakasz áteresztőképességének nemcsak az optimalizált menetrendnek kell megfelelnie, hanem egy havária eset következményeként létrejövő ideiglenesen megnövekedett forgalomnak is. Kulcsszó a „minimális vonatkövetési idő”, amely nagyban függ a menetrendtől. Sokkal sűrűbben közlekedhetnek a vonatok, ha hasonló a sebességük és ugyanazonokon a megállóhelyeken, illetve állomásokon kell megállniuk, mint ha egy szakaszon együtt kell közlekedetni tehervonatokat, IC-eket és elővárosi szerelvényeket.

Egyedi tervezési szempontok

Nem lehet kizárni olyan általánosan le nem írható „kényszereket”, amelyek adott esetben megkötik a tervező kezét a térközjelzők elhelyezésénél. Ezért szükséges annak biztosítása, hogy a tervező megadhasson tiltott területeket, ahova semmilyen körülmények között nem kerülhet térközhatár (pl. fázishatár, úttátjáró, egyéb elhelyezési problémák).

Érvényes előírások

Az érvényes előírásokra tekintettel kell lennie az algoritmusnak. Példaként álljanak itt az előjelzők távolságára vonatkozó MÁV-előírások, amelyek következménye, hogy a T1 szakasz maximális hossza 1800 méter, a további térközöké pedig 2500 méter lehet, feltéve hogy külön előjelzők nem kerülnek alkalmazásra.

Technikai korlátokból adódó megkötések
A térközök hosszát nemcsak forgalmi szempontok befolyásolják, hanem egyéb technikai korlátok is. Például a 75 Hz-es foglaltságérzékelés nem működtethető 2500 méternél hosszabb vágányszakaszon.

Az eljárás alapelve

Az eljárást állomásközönként végezzük, de a modellben szükség van a kapcsolódó állomásokra is. A végrehajtás után lényegében két kimenő paramétert várunk:

- N_{thmin} – az adott paraméterek mellett minimálisan szükséges térközhatárszám
- $L_n (l_1, l_2, \dots, l_n)$ – Adott térközhatárszám mellett az egyes térközjelzők optimális helyzete

Az eljárás iteratív természetű. A „külső ciklusban” a tervező beállít különböző kiinduló paramétereket (térközszám, kiinduló határok, tiltott zónák), majd azok alapján számítógéppel elvégzett optimalizálást.

A „belső ciklusban” a számítógép egy forgalmi szimulátor és egy optimumkereső algoritmus együttműködésével megkeresi a beállított paraméterek mellett legjobb térközhatár-kiosztást. Ez a továbbiakban az idevágó UIC döntvényéből ismert t_{fm} *minimális követési idők átlaga* (mj. *average of minimum train headways*) függvény minimumpontját jelenti. A t_{fm} kétfajta definíciója ismert. Az első (I) nem veszi figyelembe, mely vonatok következnek egymás után, a másik (II) ezzel szemben igen:

- I. $t_{fm} = \frac{\sum (n_i * n_j * t_{ij})}{\sum (n_i * n_j)}$
 i, j indexek az egyes vonatosztályok sorszámainak veszik fel
 n_i, n_j az i , illetve j . vonatosztályba tartozó vonatok száma
 t_{ij} két vonat egymáshoz képesti követési ideje, amennyiben az első az i , a második a j . vonatosztályba tartozik

- II. $t_{fm} = \frac{\sum (N_{ij} * t_{ij})}{\sum (N_{ij})}$
 N_{ij} azon esetek száma (pl. egy ütemben), amikor egy i . osztályú vonatot egy j . osztályú követ.

A t_{ij} értékek kiszámításához egy objektumfoglalási adatbázist (objektumfoglalási rekordok halmazát) használunk. Egy objektumfoglalási rekord a következő mezőket tartalmazza:

- vonat azonosítója,
- foglalt objektum azonosítója,
- foglalás kezdete (időbélyeg),
- foglalás vége (időbélyeg),
- foglalás típusa.

A foglalás típusa a következő lehet:

- **Fizikai foglalás** – a vonat az adott időintervallumban az adott objektum „felett” helyezkedik el.
- **Vágányúti lezárás** – az elem érintett elemként lezárásra kerül egy vágányútban.
- **Lezárás megcsúsztatási vágányútban** – megcsúsztatási vágányútban történő lezárás.
- **Térköz előfoglalás** – ez a fajta lezárás ahhoz szükséges, hogy a vonat akadálytalanul közlekedjen, kifejtése később.

Amint látható, a négyfajta objektumfoglalási adatból az első három automatikusan keletkezik, ha egy megfelelő szimulátoron leköszlekedtetjük az adott vonatot. A negyedik, a térköz előfoglalás viszont logikai természetű. Jelentése, hogy az adott technikai körülmények között (értsd: vonatbefolyásoló rendszer, vonatsebesség, térközjelző típusa) mely időponttól kezdve kell egy adott térközszakasznak üressé válnia ahhoz, hogy a szóban forgó vonat akadálytalanul, azaz fékezés nélkül haladhasson. Ennek a konkrét feltételeit egy későbbi fejezet tárgyalja.

Az adott vonatosztály párokhoz tartozó t_{ij} követési idő úgy kerül meghatározásra, hogy a két vonatosztály belépőidejét a lehető legközelebbre hozzuk úgy, hogy az adott állomásköz bármely objektumára, két különböző vonat általi foglalási rekordja ne kerüljön fedésbe.

Külső ciklus: diszkrét változók meghatározása

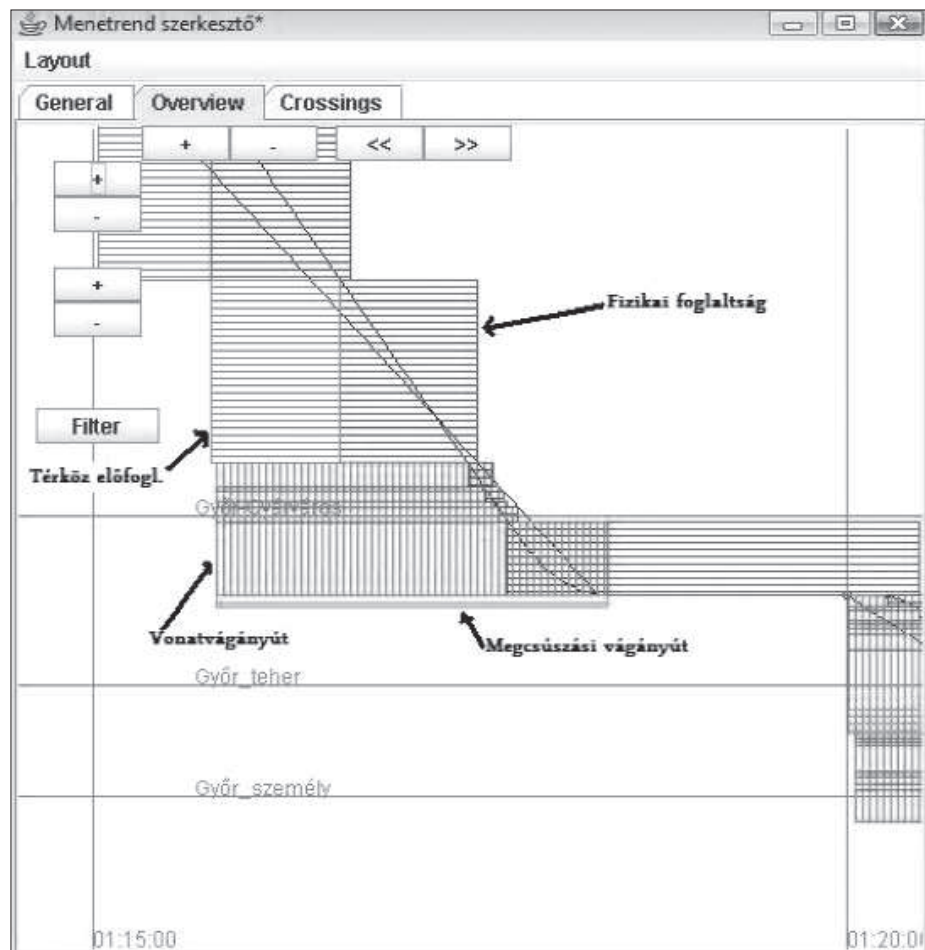
Az ismertetett módszer iteratív természetű. A szükséges számú térköz meghatározásához többször is el kell indítania az optimumkeresőt (lásd belső ciklus). Elméletileg lehetséges lenne a külső ciklust is automatikusan futtatni, de a folyamat közben tarthatósága érdekében célszerűnek látszik ezt manuálisan végezni.

A tervezőnek a következő bemenő paramétereket kell meghatározni:

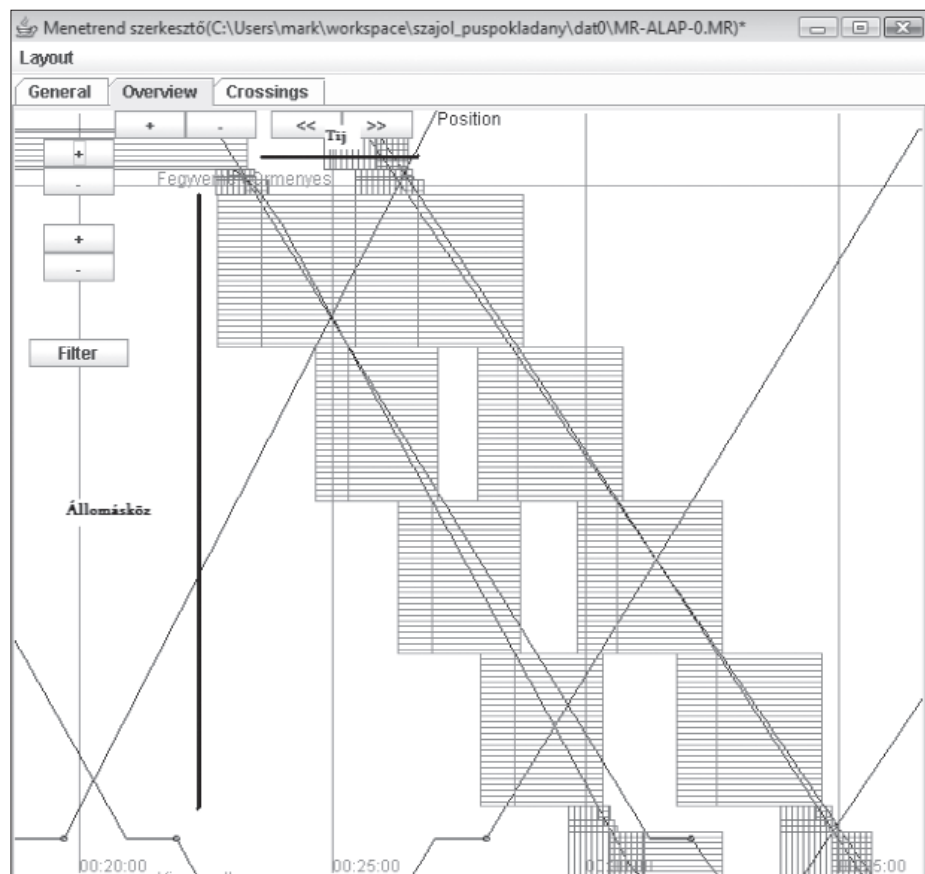
- térközszakaszok száma,
- egyes térközök maximális, illetve minimális hossza (opcionális),
- tiltott zónák, ahova nem kerülhetnek térközhatárok (opcionális),
- a térközhatárok egy kezdeti kiosztása, amely megfelel a fenti peremfeltételeknek.

Belső ciklus: valós változók meghatározása

A belső ciklus már számítógéppel végezhető. Matematikai értelemben egy n dimenziós, egyértékű folytonos függvény minimumhely kereséséről beszélünk. Az ilyen probléma megoldására számos módszer létezik. Egy lehetséges megoldás ismertetésre kerül a továbbiakban.



1. ábra Az objektumfoglaltsági rekordok grafikus ábrázolása



2. ábra T_{ij} számítása

A bemenő paraméterek figyelembevétele – a „térköz előfoglaltság” meghatározása

Az állomási vonatvágányút állítás virtuális ÖJÜ behatási pontok vonat általi meghaladására történik meg. A behatási pontok helyzetét a tervezőnek a szakma szabályai alapján kell kijelölnie. A térközben ezzel szemben nem számolunk vágányúttal, hanem abból indulunk ki, hogy a térközjelzők a rákövetkező térköz/térközök foglaltságának megfelelő állapotot vesznek fel. Mindazonáltal úgy gondoljuk, hogy a jelen eljárás eredményei azon biztosítóberendezés típusoknál is alkalmazhatók, ahol a térközjelzőket „egyszerű főjelzőként” az állomási biztosítóberendezés által vágányutasán vezérlik, ilyen módon oldva meg a centralizációt.

A térköz előfoglaltság meghatározására a következő szabályokat kell betartani.

- A vonat által közelített előjelzést adó jelzőnek általános esetben akkor kell a következő jelzőnél $V_{\max}$ sebességgel történő elhaladásra előjelzést adnia, ha az előjelzést adó közelített jelzőt legfeljebb $10 V_{\max}/3$ méterre (de max. 400 méter és min. 200 méter) közelítette meg.
- Ha a vonat a közelített előjelzést adó jelző előtti szakaszból indul, akkor megengedhető, hogy Megállj! állásra előjelzést adó jelző mellett haladjon el a vonat, ha a pillanatnyi sebessége nem haladja meg az előjelzést adó jelző mögötti jelző várható legkisebb távolságából számolt riasztási görbével korlátozott sebesség értéket (illetve a csak 75 Hz-es jelfeladással működő vonat üzemi fékgörbéje által korlátozott értéket). A következő főjelzőnek a $V_{\max}$ -szal meghaladható állásáról olyan időben információt kell kapnia a vonatnak (a vonatbefolyásolás útján), hogy az előjelzést adó jelző mellett elhaladva üzemszerűen a menetrendi sebességére gyorsítás esetén se ütközzön bele a fenti határoló görbékbe.
- ETCS2 vonatbefolyásolót esetén az előjelzést adó közelített jelzőnek a következő jelzőnél $V_{\max}$ sebességgel történő elhaladásra előjelzést kell adnia, mielőtt a fedélzeti automatika riasztást kezdeményezne (figyelembe véve a 9 másodperces kommunikációs időt).
- Állomási vágányutak esetében a vágányút startjelzőjének szabadra állásához a vágányút hosszának plusz a megcsúszási vágányút hosszának felszabadulása és a vágányút beállítási, illetve ellenőrzési idejének letelte szükséges. A startjelző szabadra állásának ETCS2 szintű információként az RBC-ben történő megjelenéséhez szükséges időt az előző pontban jelzett kommunikációs időben figyelembe vettük.

- A térköz előfoglaltság a fizikai foglaltság kezdetével szűnik meg.
- Egy térköz (illetve két főjelző közötti távolság) sem lehet 2500 méternél hosszabb, és a bejárat (vagy további bejárat) jelzőre előjelzést adó jelző és a bejárat jelző között nem lehet nagyobb távolság 1800 méternél.

Ellenőrzés

Az eredményt célszerű forgalmi szimulátorral verifikálni. Javasolt az adott vonalon várható havária eseteket elpróbálni. Ezek lehetnek:

- Egyvágányú közlekedés – esetleg csak a személyvonatokkal.
- Egyik vágány kiesése 2 órára baleset miatt.
- Párhuzamos vonal kiesése vagy korábbi forgalmi zavaret miatt átmeneti forgalomnövekedés meghatározott vonatszámmal óránként.
- Sebességkorlátozás szélsőséges időjárás miatt.
- Stb.

Egy konkrét megvalósítás

Egy megvalósult és letesztelt módszer két különböző elvű minimumkeresés ötvözte. A függvényérték adott pontban történő kiszámítása már ismertetésre került. Mindkét módszer az optimum közelébe visz, ezért alkalmazhatók akár egymás ellenőrzéseként is, illetve megoszthatjuk közöttük az optimalizálás egyes szakaszait. Erről bővebben később, a két módszer összehasonlításánál esik szó.

A függvény folytonos, viszont nem differenciálható. Ezzel szemben adott pontban differenciálható a függvény közelítő polinomja. Ezt használja ki az első módszer.

Gradiens módszer: A numerikus analízis egyik jól ismert minimumhely-kereső módszere. Lényege, hogy adott pontban meghatározzuk a függvény legnagyobb növekedésének irányvektorát (gradiensét), majd a gradiens által kijelölt irányban haladva meghatározzuk az immár egydimenziós valós-valós függvény minimumát. Az egydimenziós differenciálható (legalábbis a közelítő polinom által) függvény minimumának a meghatározására számos ismert módszer létezik (Newton módszer, intervallumfelezéses módszer).

Genetikus algoritmus: A mesterséges intelligencia egy közkedvelt eljárása, amely az evolúciót utánozza. Először létrehoz egy N darabos populációt. Esetünkben ez a függvény értelmezési tartományának N különböző értékei, amelyeket a kiinduló érték viszonylag szűk környezetéből véletlenszerűen választunk.

Ezek után ismételt alkalommal alkalmazzuk a populáción a SZELEKCIÓ (1), REPRODUKCIÓ (2), MUTÁCIÓ (3) szekvenciát, ilyen módon – akár az evolúció során egyre jobb és jobb egyedek alakulnak ki, vagyis esetünkben egyre közelebb kerülünk az optimális térközkiosztáshoz.

A két módszer összehasonlítása: A gradiens módszer hatalmas előnye a gyorsasága. Nagyon gyorsan eljut a megoldás „közelébe”. Hátránya a mi esetünkben, hogy a közelítő polinom és az eredeti függvény közti minimális eltérés miatt az optimum környezetében hajlamos „eltévedni”, vagyis esetünkben néhány 10 méterre a megoldástól megállni.

A genetikus algoritmus sokkal lassabb, ahogyan az evolúció maga. Előnyei, hogy egyrészt sokkal igénytelenebb a célfüggvénnyel szemben, nem szükséges, hogy az differenciálható vagy akár folytonos legyen. És mivel nincs szükség közelítő polinomra, ezért garantáltan helyes megoldásra jut.

Esetünkben a két módszert érdemes egymás ellenőrzésére futtatni, illetve lehetséges a feladat megosztása köztük oly módon, hogy a gradiens módszerrel eljutunk a megoldás közelébe, majd a genetikus algoritmussal pontosítjuk az értékeket.

Egy tesztprojekt és annak eredményei

A módszer a Szajol–Püspökladány vasútvonalon került tesztelésre. Rendelkezésre állt a távlati menetrend, de attól számos esetben eltértünk, illetve annak variációival dolgoztunk, hogy a módszert teszteljük, és általános következtetéseket vonhassunk le.

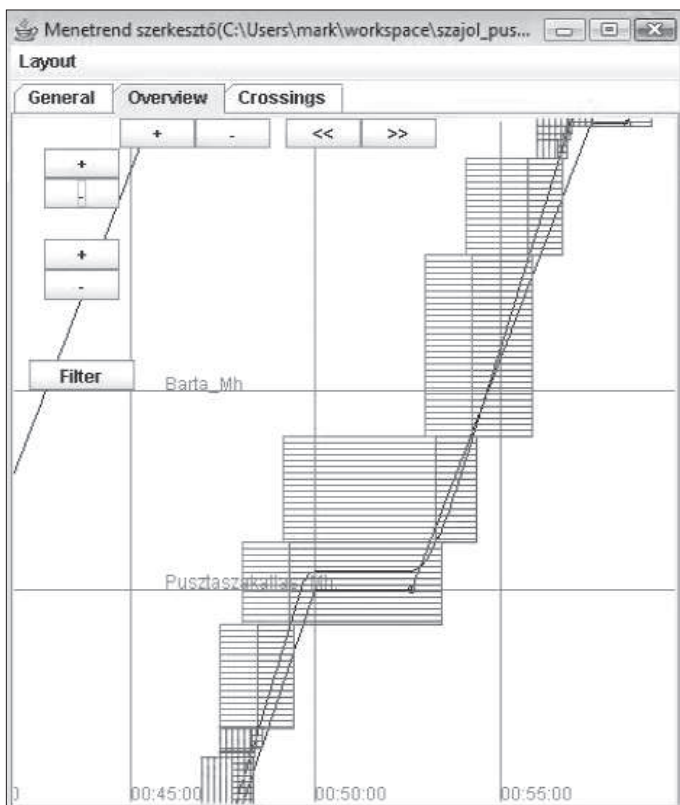
A következő általános tapasztalatokat gyűjtöttük.

Megállóhelyek hatása

Minél több vonat áll meg egy megállóhelyen, annál hangsúlyosabban jelentkezik annak „összehúzó” hatása a befoglaló térközre – és esetenként a rákövetkező térközre. Az illusztrációként szereplő térközkiosztási optimumnál a jobb láthatóság kedvéért kikapcsoltuk a maximális 2500 méteres térközhosszra vonatkozó feltételt.

Sebességkorlátozás hatása

Amennyiben tartós sebességkorlátozás van az állomásköz egyik részében, az oda eső térközöket az optimalizáló algoritmus összehúzza. A mellékelt ábra egy szélsőséges esetet mutat (140 km/h => 80 km/h), hogy szemmel is látható legyen a hatás.



3. ábra: Megállóhely „összehúzó” hatása a befoglaló térköze (megjegyzés: a jobb láthatóság kedvéért a 75 Hz-es jelfeladás miatti 2500 méteres korlát átmenetileg kikapcsolásra került)

Állomások hatása a minimális vonatkövetési időre

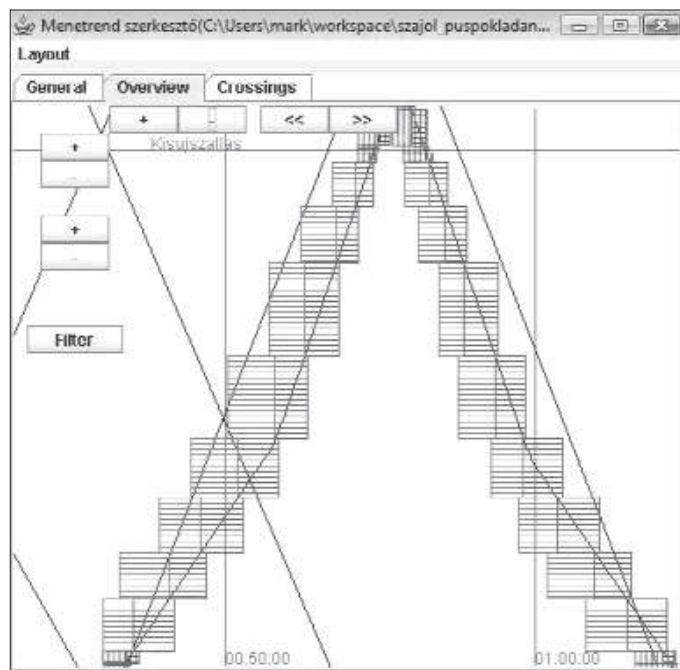
Főszabályként elmondható, hogy minél rövidebbek a térközök, annál nagyobb az adott állomásköz áteresztőképessége. Ezzel együtt azt is kijelenthetjük, hogy nem érdemes a minimális vonatkövetési időket egy bizonyos határon túl csökkenteni, hiszen az állomások áteresztőképességét nem tudjuk érdemben változtatni – vagy legalábbis az a kérdéskör túlmutat a jelen alkalmazáson. Tipikusan az állomási főjelzők nem mozgíthatók, vagy legalábbis azok helyzetét egyéb szempontok határozzák meg. Mindazonáltal a verifikálási szakaszban érdemes egy hosszabb vonalszakaszt együtt vizsgálni.

Összefoglaló

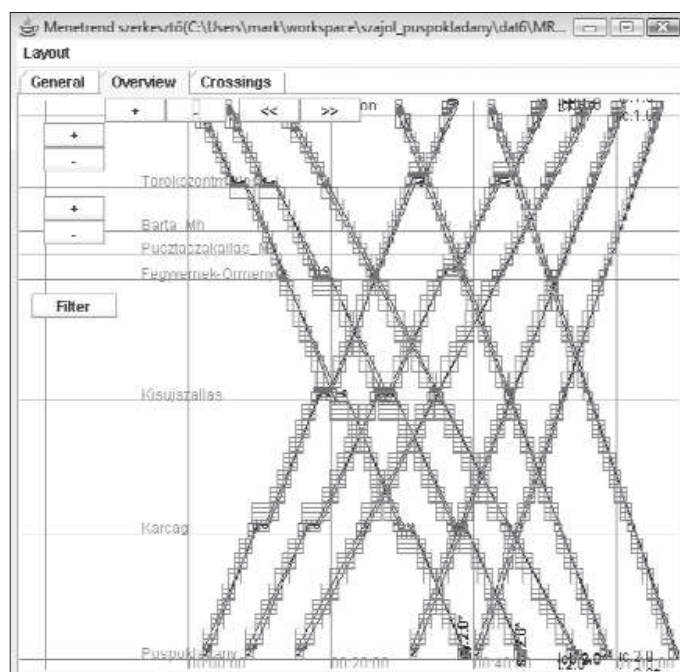
A tesztprojektről és annak eredményeiről szóló részben ismertetett esetekben preparált menetrendeket alkalmaztunk annak érdekében, hogy bizonyos hatásokat vagy tendenciákat önmagukban mutassunk be. Egy valós esetben ezek a hatások együtt érvényesülnek.

Az optimalizálás alapját jelentő függvényérték, két vonat minimális követési ideje, a lehető legpontosabb szimulációs eljárással kerül meghatározásra, amelynek alapja egy menetdinamikai modul, amely figyelembe veszi az adott mozdony vonóerőgörbéjét, a vonat fékszázalékát, valamint a pálya ív- és lejtviszonyait.

A fentiekben ismertetett módszer és azt megvalósító eszköz alkalmas optimális térközkiosztás meghatározására, figyelembe véve az érvényes szabályokat, a térközjelzők fajtáját, a vonatbefolyásoló rendszer hatásait és technikai korlátjait, a távlati vonatmenetrendet és a helyi adottságokat. Abban a tekintetben nevezünk egy térközkiosztást optimálisnak, hogy a szükségesnél nem nagyobb számú térköze oszt egy állomásközt, és a térközhatárokat a legnagyobb átbocsátóképesség szerint helyezi el.



4. ábra: Sebességhatározás az állomásköz egyik részében



5. ábra: Egy hosszabb vonalszakasz egyidejű vizsgálata

Algorithmus zur Errechnung der optimalen Anzahl und Positionen der Blocksingale

Das Optimierungs-Programm benutzt eine Betriebs-simulation, um Objektbelegungszeiten zu gewinnen, womit die optimale Position der Blocksingale zu errechnen sind.

Software to calculate the optimal number and location of block signals between two stations

This program uses a simulator to calculate object occupation times when searching for the optimal division of the track between railway stations.