

## Vasúti menetrendtervezés energetikai szempontok alapján

Cseh Attila, Aradi Szilárd, Bécsi Tamás, Sághi Balázs, Tarnai Géza

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék  
(e-mail: cseh.attila | aradi.szilard | becsi.tamas | saghi.balazs | tarnai.geza @mail.bme.hu)

---

**Absztrakt:** A cikk a dinamikus programozás olyan alkalmazását mutatja be, amelynek segítségével a vasúti menetrend szerkesztésekor figyelembe vehetők az energiamegtakarítási szempontok. Az energiatakarékosság és a menetrend kapcsolata a menetidő tartalékokban rejlik, ezek megfelelő allokálása a menetrendbe az energia hatékonyabb felhasználását eredményezi. A cikk a menetrendbe építendő tartalékok ismertetését követően a dinamikus programozás menetét mutatja be, amelynek során a tartalékok optimális módon felhasználásra kerülnek.

---

### 1. BEVEZETÉS

Napjaink energiamegtakarítással kapcsolatos kihívásai a közlekedésben és azon belül a vasúti ágazatban fokozottan jelentkezők, hiszen ez a szektor kiemelt energiafogyasztónak számít. Az elérhető relatíve kisebb mértékű megtakarítások is ennél fogva jelentős fogyasztáscsökkenést eredményeznek. Az energiahatékony vonatközlekedés megteremtésének egyik lehetősége, hogy a menetrendszerkesztés folyamatába integráljuk az energetikai szempontú optimalizálást. A menetrendbe építendő tartalékidőket ezáltal megfelelően elosztva kisebb fogyasztás mellett érhető el azonos vontatási teljesítmény.

### 2. JELENLEGI HELYZET

#### 2.1 A menetrend mint adottság

A menetrendtervezés során figyelembe veendő szempontokat a Svájci Szövetségi Vasutak (SBB) már vizsgálta korábban [1]. Az erősen hurkolt, sok ún. kényszerponttal rendelkező hálózat, a nagy forgalmi áramlatok, a személyvonatok ütemes menetrendje, és a majd valamennyi vonalon lebonyolított vegyes üzem (IC-, gyors-, zónázó és személyvonatok, valamint teherforgalom) révén a menetrend adottnak tekinthető, és egy, az energia szempontok szerinti optimalálás alig elképzelhető. Ennek oka, hogy a kényszerpontokat a menetrend struktúrája, azaz elsősorban az átszállási csomópontok optimális működése és a kapacitáskorlátok miatti technológiai kötöttségek (pl. egyvágányú pályán történő keresztezés) határozzák meg. Ha a csomópontokba (ún. menetrendi pókokba) nem érkezünk meg a struktúra által meghatározott optimális időpontban, akkor az átszállási lehetőségek (számszerű) fenntartása csak többletvonat beállításával lenne lehetséges. A többletvonatoknak a többletenergia felhasználásán felül számos más többletköltsége is van (a változó költségek mellett így a nagyságrenddel nagyobb állandó költségek terén is többlettel kellene számolni).

#### 2.2 Menetrendi tartalékok

A hazai gyakorlatban a menetidő meghatározása két részből áll, tekintettel a vonatkozó nemzetközi UIC 451-1 döntvényre [2]. Első lépésben az ideális körülmények között teljesíthető menetidőt határozzák meg. Ez a pályavasúti adatszolgáltatás keretében átadott menetrendi alapadatok alapján fizikai menetdinamikai számításokkal történik. Ezt követi az ideális menetidő „megpótlékolása”. A menetrendi pótlék 120 km/h sebességig két részből áll:

- egyrészt az ideális menetidő 4%-át (a teljes úton egyenletesen elosztva),
- valamint egy 100 km-enként 1,5 perces fix menetidőt (célszerűen elosztva, rendszerint a kényszerpontok elé „torlasztva”) tartalmazza.

A 120 km/h fölötti sebességű vonalakon az esetleges terven kívüli vagy indokolatlan feltartóztatások nagy idővesztésének fedezésére megnövelik a vonat menetidejét 100 km-enként egy kényszerű megállás (teljes sebességről való lassítás, konfliktusfeloldás és visszagyorsulás) időszükségletével is.

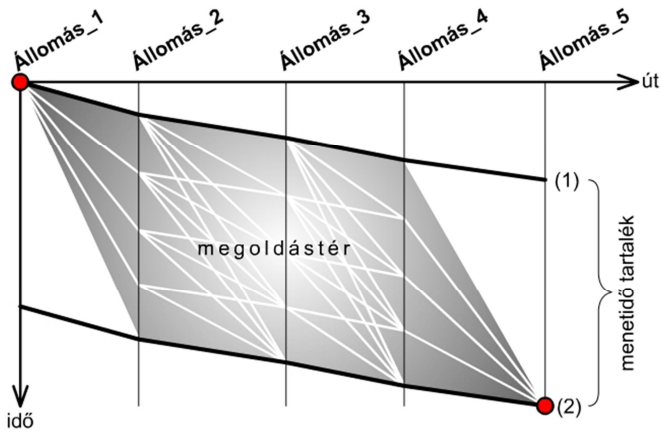
### 3. ENERGIA OPTIMÁLIS MENETREND

#### 3.1 A megoldandó probléma

Az energetikai szempontok szerinti menetrendtervezés problémakörét az 1. ábra menetgrafikonja alapján ismertetjük. Ha a korábban említett, menetrendi kényszerponttal rendelkező csomópontok (az ábrán sötét pontok) között nagyobb menetidőt engednek meg, mint amennyire a vonatnak ideális esetben szüksége lenne az eljutáshoz, akkor a vonat hagyományos esetben az ábrán látható módon:

- vagy végig a megengedett legnagyobb sebességgel közlekedik, és a kényszerponttal rendelkező állomáson várakozik (1),

- vagy később indul el az előző csomóponttól, végig a megengedett legnagyobb sebességgel közlekedik, és időben érkezik a kényszerponttal rendelkező állomásra (2),
- vagy végig állandó értékű, de csökkentett sebességgel haladva éppen időben érkezik az állomásra.



1. ábra A tartalék menetidő lehetséges szétosztása

Ezek a megoldások az energiafelhasználás szempontjából nem eléggé hatékonyak, bár az utolsó esetben már mérséklődik az energiafogyasztás. A csomópontok között viszont nem előnyös végig ugyanazzal a csökkentett sebességgel haladni, mivel a fogyasztás a sebességgel nem lineárisan változik, illetve alakulását számos más tényező is befolyásolja. Emiatt érdemes a feladatot szakaszokra bontani, célszerűen a csomópontok közötti közbenső állomásoknál, és bizonyos szakaszokon nagyobb, más szakaszokon kisebb sebességgel közlekedni.

Az optimalizációs feladat ezek ismeretében úgy néz ki, hogy a kényszerpontoknál jelentkező tartalék menetidőt az egyes szakaszok között osztjuk szét (1. ábra megoldástere) oly módon, hogy a szakaszokra vonatkozó részmenetidők, és így az alkalmazott sebességek akkorák legyenek, amelyekhez tartozó energiafelhasználás a teljes vonalra nézve minimális.

### 3.2 Megoldás dinamikus programozással

Az [1] svájci vizsgálat szerint a feladat dinamikus programozással megoldható, amelynek specifikációját, illetve megoldási menetét [3] alapján a következőkben részletezzük.

1. A problémát **szakaszokra** kell osztani. Az 1. ábra öt állomása négy szakaszra bontja a feladatot, amelyekre a feladat megoldása során egyenként kell meghatározni az *alkalmazandó sebességet*.
2. Minden szakaszhoz társul bizonyos számú **állapot**. Ez esetünkben az n-edik szakaszban a maradék, *még fel nem használt tartalék menetidő* ( $t_n$ ) lesz. A szakaszok kezdetén, attól függően, hogy milyen állapotban vagyunk,  $t_n$  valamekkora értékkel bír. Ez a kiinduló körülményekre vonatkozó információ szükséges, hogy meghatározzuk a

szakaszra vonatkozó optimális stratégiát. Jelen feladatban minél kevesebb még fel nem használt tartalék menetidő áll rendelkezésre, annál kisebb mozgásterünk lesz a sebesség megválasztásában. A szakasz kezdetén lévő állapotból a szakasz bejárása során egy új állapotba kerülünk, ami már a következő szakasz kezdeti állapota lesz. Az 1. szakasz kezdetén és a 4. szakasz bejárását követően csak egy-egy állapot állhat fenn:

$t_1$  = teljes tartalék menetidő,

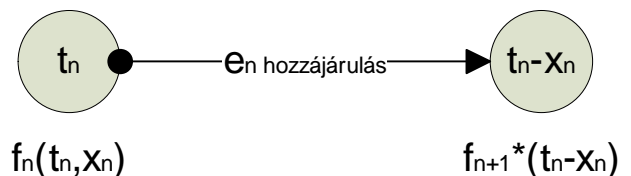
$t_5 = 0$ .

3. Ha adott a szakaszon a kezdeti állapot, akkor a fennmaradó szakaszokra vonatkozó optimális stratégia **független az előző szakaszokon** követett **stratégiától**. Általában a szakasz kezdeti *állapotának ismerete magában hordozza a rendszer korábbi viselkedésére* vonatkozó összes olyan információt, amely szükséges a további optimális stratégia meghatározásához. Ez az ún. Markov-tulajdonság, aminek teljesülnie kell minden dinamikus programozási feladatnál.

4. Minden szakasz elején szükségünk van valamilyen **stratégiai döntésre** ( $x_n$ ), hogy miképpen járjuk be az adott szakaszt, azaz példánkban *mennyi tartalék menetidőt használjunk föl két állomás között*. Ennek értékét az *alkalmazott sebesség határozza meg*, vagyis maximális sebességnél  $x_n=0$ , a legkisebb sebességnél pedig az adott szakasz kezdetén még fel nem használt tartalék menetidő ( $x_n=t_n$ ). A stratégiai döntés határozza meg, hogy a szakasz végén melyik ( $t_{n+1}$ ) állapotba kerülünk át, tehát mennyi tartalék menetidő áll még rendelkezésre. Az n-edik szakasz bejárása során még fel nem használt tartalék menetidő a stratégiai döntésnek megfelelően:  $t_{n+1}=t_n-x_n$ . (2. ábra)

n-edik szakasz

n+1-edik szakasz

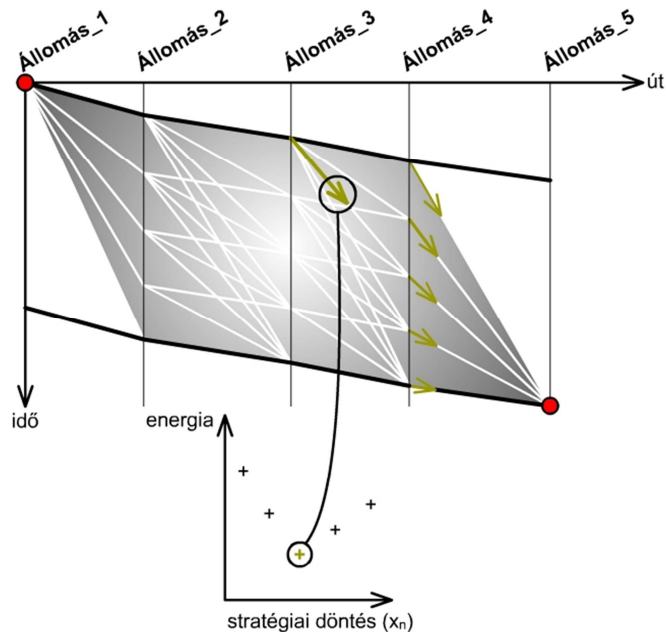


2. ábra Az n-edik szakasz bejárása

A feladat megoldásában egymással **összefüggő döntések sorozatát** kapjuk meg, ahol minden döntés a probléma egy szakaszának felel meg. Az n-edik szakaszon meghozott stratégiai döntés ( $x_n$ ) hatása az, hogy a ( $t_n$ ) kezdeti állapotot olyan ( $t_{n+1}$ ) állapotba transzformálja, amely már a következő szakaszhoz van társítva. A különböző szakaszokban lévő állapotokat összekötő **élekhez** hozzárendelt értékek fölfoghatók úgy is, mint **hozzájárulások** az adott állapotátmenethez, és ezeket szeretnénk minimalizálni vagy maximalizálni. Ez a hozzájárulás a *felhasznált energia mennyisége* ( $e$ ) lesz, aminek összegét természetesen minimalizálni szeretnénk.

A 3. ábra mutatja, hogy minden egyes szakasz elején öt különböző sebesség közül választhatunk. Minél meredekebb

a menetvonal, annál kisebb a sebesség, és a szakasz végén annál kevesebb tartalék menetidő marad. A választási lehetőségeket természetesen korlátozza, hogy mely  $t_n$  állapotban vagyunk, ugyanis  $t_n = 0$  esetén már csak a maximális sebesség alkalmazása mellett dönthetünk.



3. ábra Az optimális menetek kiválasztása

5. A megoldási eljárást úgy tervezzük, hogy keresünk egy **optimális stratégiát a teljes problémára**, egy olyan **előírást**, amely azután minden **egyes szakaszon** megadja az optimális stratégiai döntést az összes lehetséges kezdeti állapotra. Ez az előírás példánkban globálisan a **hozzájárulások összegének minimalizálása**, ebből következően az egyes szakaszokon az egyes döntések értelmében születő **hozzájárulások közül a legkisebb kiválasztása**.

A 3. ábra alján lévő diagram mutatja a diszkrét összefüggést a stratégiai döntés (felhasznált tartalék menetidő, avagy alkalmazott sebesség) és az állapotátmenet hozzájárulása (energiafelhasználás) között. Ahhoz, hogy megfelelő stratégiai döntés születhessen, az egyes döntésekhez hozzárendelhető energiafogyasztást a vasúthálózat valamennyi szakaszára meg kell határozni. Így figyelembe vehető minden, fogyasztást befolyásoló tényező (pl. állandó lassújelek hatása a menetdinamikára). Látható az Állomás\_3 példáján, hogy az öt lehetséges menetvonal közül a harmadiknak (zöld nyíllal jelölt) a legkisebb az energia felhasználása. Ez az optimális menet minden szakasz valamennyi kezdeti állapotára vonatkozóan rendelkezésre áll. (lásd 4. ábra zöld nyilak)

6. Meghatározandó az a **rekurzív összefüggés**, amely megadja az optimális stratégiát az  $n$ -edik szakaszon, amennyiben már ismerjük az  $n+1$ -edik szakaszon az optimális stratégiát. Ez az összefüggés magában hordozza az előző pontban ismertetett, teljes problémára vonatkozó

optimális stratégiai előírást. A rekurzív összefüggés (lásd 2. ábra):

$$f_n(t_n, x_n) = \min \{ e_n + f_{n+1}^*(t_n - x_n) \}, \text{ ahol}$$

$f_n$  – az  $n$ -edik szakaszban  $t_n$  állapotban hozott  $x_n$  döntés energiafelhasználása,

$e_n$  – az  $n$ -edik szakasz hozzájárulása,

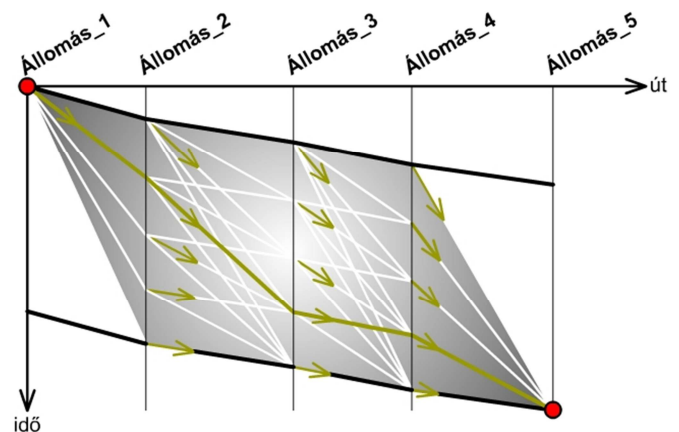
$f_{n+1}^*$  – a korábban kiszámolt szakaszok összes energiafelhasználása, amely már biztosan optimális, és ezt jelöli a  $*$ .

7. A teljes feladat megoldása úgy kezdődik, hogy **optimális stratégiát keresünk az utolsó szakaszra**. Az utolsó szakaszra vonatkozó optimális stratégia meghatározza az optimális stratégiai döntést azon a szakaszon minden lehetséges kezdeti állapotra. Ennek az egyszakaszos problémának a **megoldása rendszerint triviális**. A 4. ábrán jól látható, hogy a 4. szakasz kezdetén bármely állapotban is vagyunk, már csak egyetlen döntési lehetőség van, ennek megfelelően az az egy lesz optimális.

8. A rekurzív összefüggés használatakor a **megoldási eljárás** szakaszról szakaszra **visszafelé halad** – úgy, hogy minden alkalommal megkeresi az optimális stratégiát az adott szakaszra – egészen addig, amíg **végül megtalálja az első szakaszból induló optimális stratégiát**.

### 3.2 A dinamikus programozás eredménye

A dinamikus programozás végeredményét, az optimális menetvonalat, a 4. ábra **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** mutatja. A programozási műveletet a gyakorlatban az egyes szakaszokra vonatkozóan ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) **táblázatos formában** lehet elvégezni. A táblázatok sorfejléceikben tartalmaznak valamennyi, az adott szakaszhoz tartozó lehetséges kezdeti állapotot ( $t_n$ ), az oszlopfejléceikben pedig a lehetséges stratégiai döntéseket ( $x_n$ ), a hozzájuk tartozó következő állapottal. A táblázat cellái az adott állapotban hozott döntés összes energiafelhasználását, az  $f_n(t_n, x_n)$  értéket tartalmazzák. Ezek közül a legkisebbhez tartozó döntési változó lesz az  $x_n^*$  optimális döntés. Egy  $n$ -edik szakaszban meghozott  $x_n^*$  döntés határozza meg az  $n+1$ -edik szakasz  $t_{n+1}$  állapotát.



4. ábra A dinamikus programozási feladat végeredménye, az optimális menetvonal

A kapott eredmények birtokában a menetrendi kényszerpontok között a vonatok menetvonalának szerkesztésekor figyelembe lehet venni az energetikai szempontokat, és a közbelső állomások között a menetrendi kötöttségekből adódó tartalék menetidőt optimálisan szét lehet osztani.

### 3. ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEK

A cikkben részletezett dinamikus programozás módszere a hazai gyakorlatban is alkalmazható, azonban tekintettel az igen magas számú ideiglenes lassújelre, csak olyan algoritmus jöhet számításba, amely ezek hatását is figyelembe veszi. A menetidő többletet, aminek optimális energiafelhasználást biztosító szétosztását kell elvégezni egy vasútvonalon, jelen esetben a menetrendi kényszerpontok,

illetve az ideális menetidő 100 km-enkénti 1,5 perces fix pótléka jelentik. Ahol a menetrendi struktúra feszes menetidőket igényel, tehát legfeljebb a fix, 1,5 perces tartalékkal lehet számolni, ott aligha lehetséges ezt a csekély többletet szétosztani a vasútvonal állomásai között. Ahol viszont a kényszerpontok miatt nagyobb mértékű lazaság jelentkezik, ott érdemes a módszert alkalmazni.

### HIVATKOZÁSOK

- [1] Emkamatik GmbH. Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB. 2007.
- [2] UIC 451-1 döntvény, Menetrendi tartalékidők a menetidők garantálása érdekében. Tartalékidők. 4. kiadás. Párizs. Hatálybalépés: 2000.12.01.
- [3] Hillier és Liebermann. Bevezetés az operációkutatásba. Budapest. LSI Oktatóközpont. 1994.