# Válasz Péter Tamás bírálatára

Megköszönöm Péter Tamásnak, a műszaki tudomány kandidátusának, hogy értekezésem bírálatát elvállalta, és hogy rendkívüli alapossággal fogalmazta meg arról alkotott véleményét. Szükségesnek tartom megjegyezni, hogy pályafutásom alatt ehhez fogható mélységű bírálattal alig találkoztam, és ezt nem a szokásos udvariassági formula mondatja velem, hanem valóban így gondolom. A fejezetről fejezetre tett, kimerítően alapos szakmai értékelésében leírt pozitív megállapításokat köszönöm. Megfogalmazott észrevételeire és feltett kérdéseire az alábbiakban válaszolok, követve az értekezés és az opponensi vélemény szerkezetének sorrendiségét.

## **Bíráló általános észrevételeivel kapcsolatban a következő megjegyzéseket teszem**:

Először is nagy megelégedéssel nyugtáztam, hogy a választott kutatási témámat és annak a közlekedési rendszerek fejlesztésében, minősítésében világszerte megfigyelhető szerepét Bíráló is kiemelkedően relevánsnak és időszerűnek értékelte. Megállapította, hogy jól ismertem fel azokat az előnyöket, amelyeket az MCDM módszerek a döntéshozóknak kínálnak, tehát azt, hogy ilyen komplex rendszereknél, mint amilyen a közlekedés és a hozzá kapcsolódó infrastruktúrát biztosító objektumok és műtárgyak fejlesztése és létrehozása, valamint a közlekedési hálózatok vérkeringését biztosító járművek üzemeltetése és irányítása, a mérnöki döntéshozatal támogatására ezen újszerű módszerek hatásosan és hatékonyan alkalmazhatók.

Abban is teljesen egyetértek a Bírálóval, hogy e módszerek egyik sajátos előnye a humán döntéshozók közvetlen részvétele e folyamatokban. Így a beruházások és a kivitelezések során sokszor egymásnak teljesen ellentmondó konfliktusos helyzetek is kezelhetők, ha nem is konszenzusos döntések formájában, de legalábbis egy kielégítő kompromisszumos megoldás megtalálása érdekében. Különösen nagy örömömre szolgál, hogy a Bíráló nagyra értékelte azon törekvéseimet, amelyek a számítógéppel támogatott tervezési és irányítási rendszerek fejlesztésére és hazai elterjesztésére irányultak az intelligens közlekedési rendszerek területén, valamint, hogy kidolgoztam, és egy közlekedési szempontból igen fontos alkalmazási területen (metró hálózatok tervezésének példáján) bemutattam, integrált térinformatikai és többtényezős döntési eljárásoknak a mérnöki gyakorlatban történő felhasználását.

Hasonlóképpen örülök, hogy Bíráló egyetértett legfontosabb célkitűzéseimmel, amelyek a közlekedésfejlesztési hierarchiában a fenntarthatóságot, a globális, regionális és urbánus szinteken egyaránt reális célkitűzéseket megfogalmazó közlekedéspolitika kialakítását és a környezetkárosító hatások radikális minimalizálását favorizálják. Ezért helyeztem olyan nagy súlyt a hagyományos, fosszilis tüzelőanyagokra épülő hajtásrendszerű járművek iránti kereslet csökkentésére, az intermodális személy- és áruszállítás intenzív fejlesztésére, határokon átívelő logisztikai fogadó- és elosztó központok létesítésére, továbbá a közlekedési tevékenységek folytatásának hatékonyságnövelési kérdéseire.

A munka megtisztelő elismerését jelenti számomra, hogy a Bíráló még olyan, nemzetgazdasági szinten is számottevő pozitív ’multiplikátor-hatásokat’ is felfedezett a munkában, amelyek a foglalkoztatás bővítését eredményeznék, valamint üzleti befektetési jellegűek, és amely addicionális hatásokat a konvencionális gazdaságossági számításokkal - mint például a költség-haszon elemzéssel - nem lehetne kimutatni.

**Bírálónak az értekezés érdemi fejezeteivel és a tézisekkel kapcsolatos értékelésére az alábbi válaszokat adom**:

Bíráló véleményezéséből kitűnik, hogy a közlekedéspolitikai modellek kialakításával és azok optimalizálásának szükségességével kapcsolatos felfogása teljesen megegyezik az értekezésben tárgyalt megközelítéssel. Hasonlóképpen, a közlekedési és építőmérnöki projekteket a bírálat is tipikusan multidiszciplinárisnak tartja, miértis pozitívan értékeli az általam alkalmazott érték-központú közelítésmódot és a megalkotott többszintű hierarchikus elrendezésű eszközrendszert, amelyet alkalmasnak ítél közlekedési tendereknél, fejlesztéseknél és beruházásoknál történő felhasználásra.

A bírálat kiemeli a többkritériumú döntési eljárásokkal kapcsolatos módszertani fejlesztéseimet is és az ezzel kapcsolatosan elért matematikai eredményeket. Megállapítja, hogy valamennyi eredmény származtatásánál helyes volt a vizsgált problémák megoldásainak létezésével és egyértelműségével kapcsolatos bizonyítások megadása. A numerikus módszerekkel történő optimalizálási módszerekkel kapcsolatban kiemeli a konvergencia bizonyításokat is. A meglévő módszerek továbbfejlesztése révén és az új eljárások kifejlesztése alapján nyert eredményeim közül kiemeli a vasúti pálya által gerjesztett nemlineáris lengések területén (input spektrál-sűrűség mátrixok) kapott új eredményeket, valamint a szimmetrikusan reciprok tulajdonságú mátrixokra a sajátvektor módszer és a legkisebb négyzetek módszere közötti kölcsönös és egyértelmű megfeleltethetőség a bizonyítását.

Az értekezés elkészítése során magam is nagy hangsúlyt fektettem eredményeim kisebb projekteken, esetpéldákon, de legalábbis numerikus számpéldákon történő bemutatására, illetve illusztrációjára, amelyeknél igyekeztem nagy gondot fordítani a szükséges adatok biztosítására, mind mennyiségi mind pedig adatmegbízhatósági szempontból (például a MAROM eljárásnál felhasznált bemenő adatmátrix).

## **Válaszok a Bíráló által feltett kérdésekre**:

Opponensi véleményének végén a Bíráló két átfogó, további alkalmazási területekre vonatkozó kérdést tett fel. Mindkét kérdés az értekezés vizsgálatainak fókuszában álló többkritériumú döntéshozatali módszertan (MCDM) két, speciális közlekedésmérnöki területen történő alkalmazhatóságára vonatkozik. Mielőtt a konkrét kérdések megválaszolására rátérnék, először szeretném összefoglalni az MCDM módszerek jellemző tulajdonságait, amelyeket egyébként mintegy 65-70 különböző, a világban elterjedten használt ilyen eljárás kritikai szellemű áttekintésével és jónéhány közlekedési és építőmérnöki alkalmazás tömör leírásával együtt az értekezés 2. fejezetének 2.1 pontjában (a 24-25. oldalakon) és az ‘A’ Függelékben (a 105-130. oldalakon) részletesen is tárgyaltam.

A többkritériumú döntéshozatali eljárásoknak két, viszonylag jól elkülöníthető csoportja van. A disszertáció, lényegében csak az ún. *többkritériumú döntéselemzési eljárások* (MCDA) módszertanával foglalkozik, amelyek releváns tulajdonságai, hogy a megengedett alternatívák halmaza diszkrét, előzetesen specifikált és véges. A mérnöki gyakorlatban az MCDA módszerek meghatározott célok/funkciók kielégítésére szánt hasonló objektumok, projektek, mérnöki infrastruktúrális létesítmények, műszaki fejlesztési tervváltozatok, pályázatok, éit., *több szempont* szerinti komplex *összehasonlítására*, *értékelésére*, *rangsorolására*, *rendezésére*, illetve a “legjobb” alternatíva *kiválasztására* hivatottak. Különösen alkalmasak ún. rosszul strukturált problémák kezelésére, amelyek nem élesen definiáltak, bizonytalanságokat tartalmaznak, továbbá, amelyeknél a döntési probléma eredetileg megfigyelt állapota a problémamegoldási folyamat során változhat. Mindezek a tulajdonságok kizárják annak a lehetőségét, hogy csak egyetlen elfogadható megoldást találjunk. Nagyon fontos sajátosságuk, hogy az MCDA problémáknak *nincs* matematikai értelemben *optimális* megoldása. Viszont igen hasznos jellemzőjük, hogy a kritériumok egyaránt tartalmazhatnak kvantitatív és kvalitatív jellemzőket, amelyek különböző mérési skálákon (arány, intervallum, ordinális és nominális) értelmezhetők, illetve mérhetők. A döntéshozók az egyes kritériumokhoz különböző fontossági (súlyszámok) értékeket rendelhetnek hozzá.

A fenti karakterisztikákból jól látható, hogy komoly matematikai apparátust igénylő mérnöki problémákra, mint például a rendszermodellezés, a szabályozástechnika, vezérlés és irányítás, dinamikai számítások, algoritmusok készítése, továbbá a konvencionális műszaki tervezési, méretezési és kivitelezési feladatok végrehajtására *nem*, legfeljebb csak a kapcsolódó döntések támogatására alkalmasak. Ráadásul, e modellek a szó szoros értelmében *statikusak*, tehát időfüggő folyamatok kezelésére *nem* adekvátak.

Ezzel szemben az MCDM módszerek másik csoportja, a *többcélú optimalizálási eljárások* (MOO) már többé-kevésbé alkalmasak bizonyos (kisebb horderejű) műszaki tervezési, szabályozási, stb., feladatok végrehajtására is, pontosabban azok *optimalizálására*. Az MOO módszerek meghatározott egyenlőségi és/vagy egyenlőtlenségi feltételek melletti *szélsőértékek meghatározását* teszik lehetővé *több* formálisan is felírt *célfüggvény* szimultán megfogalmazása alapján. Ha létezik *megengedett* megoldás, akkor ún. *nem-domináló*, vagy más néven *Pareto-optimális* megoldások halmazát nyerjük.

Ebből következik, hogy az MOO modellek felhasználása jól strukturált gyakorlati problémák esetén jöhet szóba, ahol a döntési probléma kiinduló és kívánatos jövőbeli állapota ismert, a feladat zárt matematikai alakban megfogalmazható és a megoldási folyamatnak van egyértelmű logikai szerkezete és a megoldások vagy bizonyíthatók, vagy cáfolhatók. Ilyen problémák megoldására különösen alkalmasak az úgynevezett *interaktív* algoritmusok, amelyek egy specifikus részrendszerét képezik az MOO módszereknek, mert itt a döntéshozók aktív részvételt gyakorolnak a teljes folyamat során azáltal, hogy a Pareto-optimális megoldások halmazából a *saját preferenciájuk* szerint választják ki a legmegfelelőbb megoldást. Ez különösen lineáris és konvex nemlineáris MOO problémák esetében sikeres, amikor is a többcélú optimalizálási probléma *skalarizációja* nem olyan kulcskérdés, mint az egészértékű, a kombinatorikus típusú vagy a nem konvex nemlineáris problémáknál.

*1. Hogyan alkalmazza a többkritériumos döntéselemzési módszertanát, a pályán valóságos körülményekre jellemző változó sebességgel közlekedő nemlineáris, térbeli járműdinamikai rendszer meghatározására, - figyelembe véve az optimális dinamikai folyamatokkal szemben támasztott követelményeket és az optimális energia felhasználás szempontját?*

## Válasz:

Érdekes gondolatfelvetés a többkritériumú döntési módszerek, és a közlekedési járművek és hálózatok tervezésének, modellezésének összekapcsolási lehetősége. Sajnos azonban, az előzőekben tett megállapítások alapján, a bíráló által specifikált feladat megoldására a többkritériumú döntéselemzési eljárások (MCDA) egyáltalán *nem* alkalmasak. Ha ilyen probléma megoldása lenne a feladatom, akkor az alábbiakban körvonalazott gondolatmenet mentén járnék el alkalmazva a járműdinamikában ma már általánosan használt matematikai módszereket és megkísérelném felhasználni a többcélú optimalizálás elmélet (MOO) célszerű *adaptálását* a közúti és vasúti járművek lengéstani szempontból *optimális válaszfüggvényeinek minimális energiafelhasználás* melletti meghatározására.

Az 1. kérdés érdemi megválaszolása a legtöbb esetben időintegrál alakban megfogalmazható *vektorértékű funkcionálokra* vonatkozó variációs feladatok numerikus megoldását kívánja (ez a 2. kérdésre is vonatkozik). Ezen integrál kifejezéseket az időtengely menti ekvidisztáns felbontásra támaszkodó integrálközelítő összeggel felírva lehetőség nyílik a feladatoknak sokváltozós *többkritériumú feltételes szélsőértékfeladatra* való visszavezetésére. A járműdinamikai 3D modell pálya menti főmozgását a vonó- és fékezőerő adagolást jellemző (lépcsősen közelíthető) vezérlő függvényre, a környezeti hatások okozta gerjesztőhatás által kiváltott parazita mozgásokat pedig a járműkerék támasztófelületén jelenlévő (esetleg ugyancsak 3D) - egyenetlenségfolyamat-realizációra lehet visszavezetni. Itt szükséges a dinamikai modell mozgásegyenlet-rendszerének gyors numerikus integrálását biztosító szubrutin alkalmazása. A *vektorértékű kritériumfunkcionál* egyik koordinátája a vizsgált időkeretben és az adott korlátozó feltételek (pl. előírt gyorsulás és sebességkorlátok betartása) *a járműmenet energiaszükségletének minimális értékét* írja elő. A további koordinátái pedig a lényeges mozgásjellemző függvények pl. *minimális szórásnégyzeteit* követelhetik meg.

(*Megjegyzés*. Szakmai pályafutásom folyamán az 1. kérdésben megfogalmazott hasonlóan összetett feladattal az eddigi munkáim során nem találkoztam. Megemlítem azonban, hogy egyetemi tanársegéd koromban intenzív kutatásokat folytattam vasúti pálya al- és felépítményei dinamikus modelljeinek megalkotására, amely modelleket a pálya rendszer dinamikai paramétereinek több adat-kombinációjára is megoldottam egy általam felállított, negyedrendű, redukálható fokszámú, parciális differenciálegyenletet, majd ezután, numerikus integrálással meghatároztam a felépítmény *optimális dinamikai* jellemzőit és *kinetikai* paramétereit [1]. A vasúti járművek kocsiszekrényére átvitt gerjesztések leírására mérőkocsi által szolgáltatott mérési eredmények feldolgozásával meghatároztam több fővonali vasúti pálya *statisztikai* jellemzőit, Fourier-transzformációval származtattam a vonatkozó *gyorsulásspektrum* függvényeket és értékeltem azokat a veszélyes *frekvencia-összetevők* szempontjából [2]. A konstruált járműmodell azonban nem térbeli, hanem egy síkbeli, tíz szabadságfokú, koncentrált paraméterű lengő rendszer volt, amellyel azonban optimalizálási számításokat nem végeztem.)

*2. Hogyan alkalmazza a többkritériumos döntéselemzési módszertanát a városi közúti közlekedési hálózat esetében, az optimális forgalomirányítás meghatározására, - figyelembe véve az optimális forgalmi folyamatokat és a környezeti problémákat?*

## Válasz

Egy városi közúti közlekedési hálózat esetében, a hálózati topológia, és az egyes hálózati szakaszokra és csomópontokra vonatkozó korlátozó feltételek figyelembevételével kell a *vektoros* (többkritériumú) *célfunkcionált* meghatározni. Itt lényeges a hálózat csomópontjaira értelmezett *vektorértékű vezérlőfüggvényektől* függő kritériumrendszer felállítása, a csomóponti átbocsátóképességeket ezen a vezérlő vektorfüggvény-rendszeren értelmezett *vektorértékű funkcionálok* alkotják. A *vektoros vezérlő függvények* koordinátái közötti függőségeket (kizárásokat, meg nem engedett egyidejűségeket) figyelembe véve kell azután az átjutási időre és a környezetszennyező kibocsátások minimum feltételeit teljesítő döntést hozni, figyelembe véve a *járműsebességeket* és a közúti *jelzőlámpa* rendszerek korlátozó hatásait is. Természetesen összetett numerikus hátterű programrendszer szükséges az előző, az 1. pontban ismertetett diszkretizált feladat feltételes szélsőérték vizsgálatának végrehajtásához.

A feltett 2. kérdés alapos végiggondolása után mérlegeltem többkritériumú döntéselemzési módszerek forgalomirányítási tárgykörben való alkalmazhatóságát. Megállapítottam, hogy ez a módszertan ennél a problémakörnél *sem* jöhet szóba. Az ilyen feladatokra felhasználható (kifejleszthető) modellek közös sajátossága az, hogy tudományos hátterük a *pozitív* rendszerek elmélete és ezek - lényegüket tekintve - ún. *makroszkopikus* modellek. A forgalomirányítási rendszerek dinamikus működését nemlineáris differenciálegyenletek halmazával (un. állapot-egyenletekkel) kísérelik meg leírni és viselkedésüket tanulmányozni. Ehhez szükséges a rendszerből ki- és beáramló, valamint a belső rendszer részrendszerei közötti járműsűrűségek, a járműgeometriák és a járműsebességek ismerete. Ezeket az adatokat az állapotegyenletekbe foglalt nem-negatív elemű, ún. Metzler-mátrixok tartalmazzák [3]. Az MCDM módszerekben általánosan használt ún. páros összehasonlítási mátrixok esetében viszont megköveteljük, hogy ezek legyenek *szimmetrikusan reciprok* tulajdonságúak a főátló elemeik pedig *egységnyiek.*

Ezen túlmenően, a városi forgalomirányítási rendszerek modellezése megkívánja a *topológia* egzakt definiálását is, irányított (és részben irányítatlan) hálózatok (térképek) formájában. A forgalomirányítási rendszerek tipikus jellemzője az *időfüggőség*, modellezésük diszkrét vagy folytonos idejű *állapotfüggvényekkel* lehetséges. Optimalizálásuk, többek között a rendszer *stabilitására*, illetve *egyensúlyi állapotának* az elérésére vonatkozik, amely többnyire az irányítási *szabályoknak* Lyapunov-függvényekkel való megoldásával lehetséges. A fenti sajátosságokat figyelembe véve, az általam felhasznált, illetve kidolgozott módszertan a feltett 2. kérdésben megfogalmazott feladattípusokra *nem* alkalmas.

Forgalmi rendszerek tervezésénél és elemzésénél igen gyakran alkalmaznak számítógépes szimulációra épülő modellezést is, például változtatható irányú forgalmi sávok időszakos alkalmazásával járó hatásvizsgálatok komplex elemzése [4], illetőleg a városi közlekedésben részt vető járművek által kibocsátott káros anyagok térbeli eloszlásának a meghatározása [5]. Az MCDM módszertan ilyen feladatok támogatását *sem* biztosítja.

Gyakorlati forgalomirányítási célokra egy kisméretű többcélú optimalizálási modellt (MOO) három éve magam is kifejlesztettem, amelyet azóta is rendszeresen használok a BME Közlekedés és Járműmérnöki Karának Vasúti Járműgépész és Járműüzemeltetési Szakmérnök szakon oktatási célokra. A kétszintű (két lineáris célfüggvényt, továbbá négy lineáris feltételt tartalmazó) optimalizáló modell komplett leírását és alkalmazását az alábbiakban mutatom be, ezzel is érzékeltetve, hogy milyen nagyságrendű, illetve típusú forgalomirányítási problémák megoldására alkalmasak az MOO módszerek:

**Kétszintű (bilevel) vasúti teherszállítás optimalizálási (TSO=Train Set Organization) modellje**

Az $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_n) \in X$ és az $\mathbf{y} \in Y$ vektorváltozók számára felírható, hogy a

**<u>Vezető</u>: A vasúthálózat felelős döntéshozója szemszögéből**:

$$\max_{x \in X} F(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{a_1 \sum_{i=1}^{n} w_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i y_i} \tag{1a}$$

feltéve, hogy

$$\sum_{i=1}^{n} w_i x_i \leq m \tag{1b}$$

$$\sum_{i=1}^{n} w_i y_i \geq c_1 \tag{1c}$$

***<u>i</u>*<u>-edik követő</u>: Az *i*-edik állomás szemszögéből**:

$$\min_{y_i} f_i(x_i, y_i) = -b_1 x_i - b_2 y_i \tag{1d}$$

feltéve, hogy

$$c_2 \leq \frac{x_i}{y_i} \leq c_3 \tag{1e}$$

$$y_i \geq c_4 \qquad (1f)$$

**Változók**:

$x_i$: a szerelvény hossza, azaz a vagonok száma, amit a vezető (teljes hálózat hatékonysága) kontrollál

$y_i$: a szerelvény sűrűség, azaz a követési idő (intervallum) két bármilyen a vasúti pályán haladó szerelvény között, amit az *i*-edik állomás kontrollál

**Együtthatók és konstansok**:

$n$: az állomások száma a hálózatban

$w_i$: az *i*-edik állomás súlya (súlyszáma) a hálózatban

$a_1$: a teherszállítás vonatkoztatási (tervezési) időintervalluma

$m$: a maximális vagonszám bármelyik szerelvényre (VBSz=Vasúti Biztonsági Szabályzat). Terheletlen vagonok esetén az a meghatározó kritérium, hogy a szerelvény ne lépje túl a rakodó peron hossza által meghatározott korlátot. Terheléses esetben a súlykorlát veendő figyelembe. Biztonsági okokból természetesen mindkettő követelmény, amelyek a vagonok lehetséges számát befolyásolják

$c_1$: a lehető legkisebb, azaz a lehetséges minimális követési időköz a vonatok között (VBSz)

$b_1$ és $b_2$: Súlyszámok (arányszámok), amelyek a szerelvényhossznak és a követési sűrűségnek az egységköltségre gyakorolt hatását jellemzik

$c_2$ és $c_3$: az időegységre eső tolatási/rakodási műveleteknek az alsó és a felső korlátja vagonszámban mérve a vasúthálózat átrakó állomásaira vonatkozóan

$c_4$: a tolatási/rakodási műveletek végrehajtásának lehetséges legrövidebb időtartama

## A megoldandó probléma leírása

Egy tényleges vasúti hálózat, egy adott A állomásán a B állomás irányába történt teherszállítás empirikus megfigyelése (2 hónap) alapján felvett adatok:

Az egyféle *vontatójárművek* (mozdonyok) típusa, összes tömege és ekvivalens hossza:

$T_m$=SS1, $G_ö$=137 tonna, EH=1.9

A megfigyelési időszakban összeállított tehervonat szerelvények *vagonjainak* gyártmánytípusait ($T_v$), terheletlen (üresjárati) állapotbeli súlyadatait ($G_ü$), a szállításra berakodott áruk súlyát ($G_t$), a vizsgált periódusban történt felhasználásuk relatív gyakoriságát (g) és az ekvivalens hosszúságukat (EH) az alábbi táblázat tartalmazza:

| $T_v$ | $G_ü$ [tonna] | $G_t$ [tonna] | g [%] | EH |
|---|---|---|---|---|
| B23 | 38 | 40 | 3 | 2.1 |
| P64A | 26 | 58 | 3 | 1.5 |
| G50 | 23 | 58 | 9 | 1.1 |
| G60 | 23 | 50 | 50 | 1.1 |
| G70 | 23 | 55 | 35 | 1.1 |

Egy vagon ekvivalens hosszúságán (EH) a mellső vonóhorogtól a hátsóig való távolság értendő, 11 méter un. egységhossz feltételezésével. Tehát, ha például EH=1.1, akkor a tényleges vagon hosszúság: 11×1.1=12.1 méter.

$n$ =1, mivel a számításokat csak az egyetlen feladóhelyre az A állomásra kell elvégezni.
$w_1$=1, értelemszerűen.

$a_1$= 24 óra, tehát a tervezés az előírások szerint napi szinten történik.
$m$: a szerelvények vagon összeállításának gyakorisági táblázata alapján célszerű egy un. "egységvonatot" képezni (súlyozott átlagszámítással) és erre a fiktív szerelvényre meghatározni a vagonok ekvivalens hosszúságát és tömegét (súlyát). Ezekkel a fajlagos értékekkel azután kiszámolandó az "egységvonat" vagonjainak maximális száma a hosszúság, illetve a tömeg szempontjából . A két vagonszám közül nyilvánvalóan a kisebbik lesz az amelyik az $m$ értékét meghatározza. Egy-egy szerelvény maximális tömege a mozdony vonóereje, a pályaállapot, a megengedhető tengelynyomás, stb. következtében legfeljebb 3500 tonna lehet, az A állomás rakodó peronjának hasznos hossza pedig 860 méter.
$c_1$= 0.2, mivel a járműfutás során a szerelvények közötti minimális távolságnak a VBSz előírások szerint legalább 10 kilométernek kell lennie az A állomástól a B állomás felé történő haladás esetén.
$b_1$=0.4 és $b_2$=0.6, mivel a járműsűrűség alakulása átlagosan mintegy 60%-át teszi ki az egységköltségnek.
$c_2$= 30/óra és $c_3$= 150/óra, az A állomás tehát az elvégzendő tolatási/rakodási műveleteket legalább 30, de legfeljebb 150 vagonnál képes óránként biztosítani.
$c_4$= 0.68 óra, ez a lehetséges legrövidebb időtartam az A állomáson a szükséges tolatási/rakodási műveletek végrehajtására egy-egy szerelvény összeállítása során.

## Feladatok

Irja fel a fenti kétszintű lineáris programozási feladat adekvát matematikai modelljét és a grafikus módszer segítségével határozza meg a probléma optimális megoldását ($x^*$,$y^*$), valamint a célfüggvények optimális értékeit. Értelmezze az eredményeket vasútüzemi szempontból, mind a hálózatot üzemeltető szervezet, mind pedig az állomásirányítás szemszögéből!

Bővítse a vasúti hálózatot, úgy hogy megnöveli az átrakó állomások számát eggyel. Irja fel a vonatkozó matematikai modellt erre a kiterjesztett hálózatra!

## Megoldás

Alkalmazzuk az (1) által definiált kétszintű matematikai optimalizálási problémát a konkrét gyakorlati feladatra. Ekkor a modell az alábbi formában (2) fogalmazható meg:

__Vezető__**: A vasúthálózat döntéshozója**:

$$\max_x F(x,y) = \frac{24x}{y} \qquad \text{(2a)}$$

feltéve, hogy

$$x \le 50 \qquad \text{(2b)}$$

$$y \ge 0.2 \qquad \text{(2c)}$$

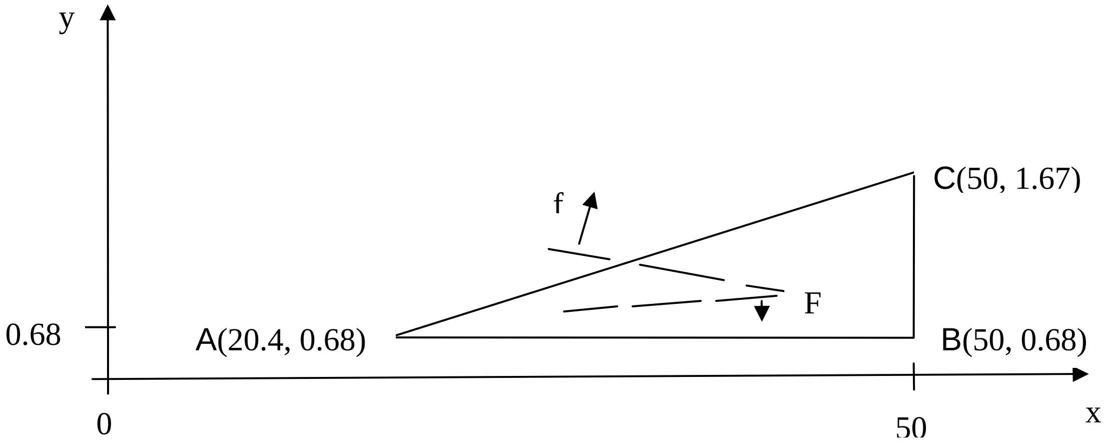
__Követő__**: Az A állomás**:

$$\min_y f(x,y) = -0.4x - 0.6y \qquad \text{(2d)}$$

feltéve, hogy

$$30 \le \frac{x}{y} \le 150 \qquad \text{(2e)}$$

$y \geq 0.68$ (2f)




A grafikus megoldás ábráján feltüntettük a korlátozó feltételek által meghatározott konvex poligont (a megengedett megoldások halmazát az ABC háromszög reprezentálja). A szaggatott vonalak a nyilakkal a célfüggvények egyenesei. A nyilak az optimalizálás irányait mutatják. Tudjuk, hogy optimális megoldást csak valamelyik sarokpont biztosíthat (ezt matematikai tétellel lehet bizonyítani), továbbá kell, hogy a célfüggvények metsszék egymást (és ne keresztezzék a döntési operációs teret). Ennek megfelelően az optimális megoldást a C pont adja meg, amelynek koordinátái: $(x^*, y^*)=(50,1.67)$. Az optimális célfüggvény értékek pedig: $F^* = 718.6$ és $f^* = -21.002$. Ez úgy értelmezhető, hogy a vasúthálózat maximális áteresztőképessége 718.6 vagon naponta, amennyiben a döntéshozó(k) az A állomásról kiinduló és B állomásra tartó tehervonatok vagonjainak átlagos számát 50 vagonban, az egymás utáni szerelvények követési idejét pedig 1.67 órában határozzák meg.

**<u>Szükséges részletszámítások</u>**

$c_1 = 0.2$, mivel a járműfutás során a szerelvények közötti minimális távolságnak a VBSz előírások szerint legalább 10 kilométernek kell lennie az A állomástól a B állomás felé történő haladás esetén. A *minimális követési távolságnak* az állandónak feltételezett átlagsebesség alapján becsült és időben kifejezett értéke tehát $c_1 = 0.2$ óra.

Az A állomás rakodó peronjának (rámpa) a maximális, un. *hasznos* hosszúságát, ami 860 méter, a II. vágány *tényleges*, 890 méter peron-hosszúsága és egy 30 méteres un. fékezés biztonsági út figyelembe vételével határoztuk meg.

Az ”egységvonat” elemeit képező ”egységvagon” (ami egy átlagosan előforduló fiktív vagonegység) műszaki jellemzőinek meghatározása a következő módon történik:

<u>Az ”egységvagon” ekvivalens hosszának kiszámítása:</u>

$L_e = 2.1 \cdot 0.03 + 1.5 \cdot 0.03 + 1.1 \cdot 0.09 + 1.1 \cdot 0.5 + 1.1 \cdot 0.35 = 1.142$ méter.

<u>Az ”egységvagon” tömegének (súlyának) kiszámítása:</u>

$G_e = (38+40) \cdot 0.03 + (26+58) \cdot 0.03 + (23+58) \cdot 0.09 + (23+50) \cdot 0.5 + (23+55) \cdot 0.35 = 66.95$ tonna.

<u>Az üres (terheletlen) ”egységvagonok” maximális száma:</u>

$m(G_0) = [860 - (1.9 \cdot 11)]/(1.142 \cdot 11) = 66$ vagon.

A betárolt (terheléses állapotú) ”egységvagonok” maximális száma:

$m(G_t) = (3500–137)/66.95 = 50$ vagon.

A fenti értékeket elemezve a megengedett *maximális* vagonszámra (felső korlát) egyszerűen adódik, hogy

$m = \min\{m(G_0), m(G_t)\} = \min\{66,50\} = 50$ vagon.

## Hivatkozások


[1] Farkas, A.:“Vasúti pályadinamika a járműtervezés szemszögéből”. *Járművek, Mezőgazdasági Gépek,* 26. évf. 10.sz. 1979. pp. 380-386.

[2] Farkas, A.:“A járműfutás statisztikai jellemzőinek meghatározása és kiértékelése mért adatok alapján”. *Járművek, Mezőgazdasági Gépek,* 26. évf. 12.sz. 1979. pp. 453-460.

[3] Péter, T.: “Modelling nonlinear road traffic networks for junction control”. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, 2012, Vol. 22, No. 3, 723-732.

[4] Bede, Zs. és Péter, T.: “A variábilis hálózatok leírása és gyakorlati alkalmazások”. IFFK 2014, Budapest, 2014. augusztus 25-27, Paper 13., 64-67.

[5] “Smarter Transport”. Kooperatív közlekedési rendszerek infokummunikációs támogatása. TÁMOP-4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0012 sz. Project.


Tisztelettel:

Farkas András

Budapest, 2015. szeptember 6.