

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Közlekedésüzemi és Közlekedésgazdasági Tanszék

A vasúti menetrendkészítés automatizálásának lehetőségei

TDK dolgozat

Készítette:
Jakus István János
(RGZ9FF)

Konzulens:
Bánfi Miklós Gábor
tudományos segédmunkatárs

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. A menetrend tervezési folyamata	3
3. A menetrendszerkesztés részfeladatai	11
4. A menetrendszerkesztési feladatok bonyolultsága	13
5. A menetrendszerkesztési feladatok bemeneti igénye és kimenetei.....	15
5.1. Topológiai leírás.....	15
5.2. Jármüleírás	17
5.3. Szabályrendszerek.....	18
5.4. Lehetséges felhasználási módok	19
5.5. Adatcsere információs rendszerek között	19
6. A vonat mozgásának differenciálegyenletét megoldó numerikus közelítés.....	20
6.1. Vonóerő.....	21
6.2. Fékerő.....	22
6.3. Adhéziós határ.....	23
6.4. Ellenállási erők.....	23
6.5. További megkötések	23
6.6. Számítási módszer.....	24
6.7. A numerikus közelítés hibája.....	24
7. Egyéb eljárások	25
7.1. A periodikus esemény időzítés problémájának megoldása.....	25
7.2. Menetrendi stabilitás	26
8. Összefoglalás	27
9. Irodalomjegyzék	28

1. Bevezetés

A vasúti menetrend a vasútüzem adott időszakra vonatkozó időbeli terve. Ez az adott időszakban alkalmazott technológiák és normák felhasználásával készül el, vagyis a menetrend a teljes vasútüzem tevékenységére hatással van, azt valamilyen formában meghatározza. A tervezés során több egymásnak ellentmondó optimalizálási feltétel közül kell választanunk. Ez legtöbbször valamilyen stratégia szerint történik, azonban sokszor a tervező szubjektív megítélése által vezérelve végzi el a tervezésnek ezt lépését. Vagyis az emberi faktor a műveletben a mai napig nélkülözhetetlen.

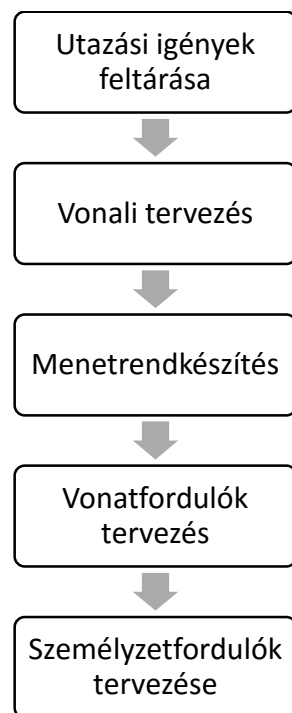
A menetrendkészítés gépi segítsége már régóta rendelkezésre áll és ennek segítségével a szükséges (és sokszor teljesen monoton) számítási feladatok kiváltására alkalmazzák. A bevezetésével a menetrendtervezés folyamata gyorsabbá vált és adott tervezési időszakban több tervváltozat elkészítésére nyílik lehetőség.

Dolgozatomban az újabb tervezési módszereket mutatom be, illetve ezek emberi beavatkozást igényét vizsgálom meg a tervezési folyamatban, melynek segítségével a szubjektív beavatkozások tovább csökkenthetőek a tervezési folyamatban. Természetesen a módszerek bemeneti adatigényeinek kielégítésére és ezen adatok minőségi és mennyiségi megfelelésére is oda kell figyelni. A technológia és technikai fejlődéssel, amely nagyrészt az automatizálással valósul meg a közlekedési alrendszerekben, az emberi beavatkozások csökkenése mellett a részrendszerek együttműködésének szükségessége is növekszik ezzel egy komplex intelligens közlekedési keretrendszert kialakítva mind a vasútnál, mind a közlekedési ágazatba. Ezek kidolgozása már évtizedekkel ezelőtt elkezdődött, így sok létező szabvány illetve formátumot tudunk felhasználni munkánk során, melyek a közös metainformációs tartalommal biztosítják a részrendszerek közötti interoperabilitást is.

2. A menetrend tervezési folyamata

A vasútüzem fő célja egy adott területi és időbeli lehatárolásban a forgalom megszervezése a felmerülő (illetve prognosztizált) közlekedési és szállítási igények kielégítésére. Erre adott technikai felszereltséggel és a megbízható minőségű működést biztosító technológiával, mint eljárásokkal.

Ezek ellátásához adott időszak üzemi tervét készítik el. A tervezés során a szolgáltatás lehatárolásában az összes résztvevő és szomszédos vasúttársaságra figyelemmel kell lennünk. Az üzemi terv egyik megjelenési formája a menetrend, amely csökkentett információtartalommal (csak időadatokat és alapvető vonatinformációkat tartalmaz) írja le a terv végrehajtási „ütemét”. Vagyis a menetrend elkészítése a benne szereplő információkon kívül egyéb üzemi tervezési feladatokat is magában hordoz. Ezek a tervezési feladatok különböző időhorizontokon jelennek meg a tervezés során. Ezeket a fázisokat láthatjuk az 1. ábrán. Mindegyik szinten figyelembe kell venni az alatta lévő szinteken feltárt szűk keresztmetszetek hatását. Ezeket vagy meg kell oldani az adott szint kompetenciái szerint (időtáv és rendelkezésre álló erőforrások) vagy újratervezésre visszautalni egy alsóbb szintre (egészen a fellépés helyéig lehet). [5]



1. ábra: Menetrendtervezés lépései

A stratégiai tervezés a távoli és közepes időhorizontra történik, bemeneti adatai a közlekedéstervezési modellek előrejelzéseiből származnak, vagyis távlati és az egész alágazatot átfogó tervezésből jönnek a bemeneti adatok. A stratégiai tervezés során a közeljövőben várható utasszám és szállítási igények determinálnak bizonyos kapacitásokat. A közlekedési modell megalkotása során a társadalmi, gazdasági és

infrastrukturális változások prognózisait, valamint a közlekedés- és szomszédos politikák hatásait is szükséges felmérni. Ezek segítségével alakíthatóak ki a közlekedési modell zónái és igényei. Ennek intézményrendszere a területfejlesztéssel nagymértékű átfedést mutat. Az alágazati szereplők pedig ezeket a fel nem tárt szűk keresztmetszeteikkel egészíthetik ki (pl. pályakapacitás hiánya vagy gördülőállomány hiányosságai, stb.).

Szintén részben a közlekedési modellből, másrészt a létező infrastruktúra felépítéséből a vasút esetén, következik a vonali tervezés, ami a tervezési probléma dekompozíciójához szükséges (ezzel részfeladatokra osztva az eredeti problémát). Ebben a lépésben a főbb utas- és áruáramlási folyamatokat és az infrastruktúrát figyelembe véve vonalakat alakítunk ki. A vonalak jellege eltérő lehet az azokon elérhető műszaki színvonal illetve a szolgáltatási kínálat összetétele szerint. A vonalak csatlakozásánál a szolgáltatások időbeli összehangolása szükséges (pl. átszállások vagy kocsirendezés elvégzésére). A vonalak alkotta leíró gráfban a kialakuló körök a szolgáltatások olyan kölcsönös időbeli függéseket tudnak kialakítani, melyek kielégítése kompromisszumokkal lehetséges általában vagy egyéb technológiai vagy infrastrukturális fejlesztési igényeket határoz meg önmagában, ami visszacsatolásként jelentkezik a felső színtre. A körök mindig legalább két olyan állomást (csomópontot) tartalmaznak melyek fokszáma nagyobb, mint kettő (csatlakozó, elágazó illetve keresztező állomások). A későbbiekben a hálózat topológiai modelljének pontosítása során meghatározásra kerül az a módszer is, amellyel gráfelméleti fogalmakkal leírható a menetirányváltások szükségességének vizsgálata is adott állomásokon a be- és kijáratok függvényében.

A menetrendszerkesztés feladata a kialakított vonalakra a szükséges áramlatokat kialakító vonatok leközlekedtetésének tervezetét (illetve ennek időbeli vetületét) elkészíteni a rendelkezésre álló erőforrások optimális kihasználása mellett úgy, hogy a közlekedés lebonyolítása az adott biztonsági és egyéb szabályozási feltételeknek maradéktalanul megfeleljen. A vasúti közlekedés sajátosságai miatt az infrastruktúra (állandó vagy közlekedés szerint virtuálisan kialakított) elemeihez foglaltsági állapotokat rendelhetünk, melyek segítségével a biztonságos közlekedés szervezhető (biztosítóberendezési és térközi felügyelet által). A menetrendszerkesztés során szükséges szinkronizálni a vonaltervezés során felmerült csatlakozó, elágazó illetve keresztező állomások technológiai folyamatait és személyszállítási minőséghez

kapcsolódó tartózkodási időket. Ugyanilyen kényszerek léphetnek fel egy vonali középállomás esetén is, ha az intermodális kapcsolatot biztosít és integrált menetrendi struktúra került kialakításra a többi alágazati szereplő között is. A korábbi időkben a közlekedési igények napi csúcsainak kielégítésére helyezték a hangsúlyt a menetrendszerkesztés során, illetve a távolsági kapcsolatok átszállásmentes megvalósítására. Ennek következtében a menetrendi ábra nem mutatott jellegzetes szimmetria tulajdonságokat. Később az erőforrás-kihasználás és az eljutási lehetőségek homogenizálása mellett optimalizált menetrendi megoldásokat kezdték alkalmazni, melyek szimmetrikus menetrendet biztosítanak. Az eljutási lehetőségek homogenizálása gyakorlatilag a feltárt keresleten felüli kínálat megjelenése a szolgáltatásban úgy, hogy a többlet kocsifutás határkölségeinek összege a pótlólagos bevételekkel megegyezik vagy inkább az alatt marad. Vagyis a pótlólagos bevételek és a határbevételek összegének aránya határozza meg a menetrendi periodicitást kiegészítve a közlekedéspolitikai ösztönző elemeivel vagy közszolgáltatási koncepciójával. Fontos, hogy ezek csak járulékos többlet-hozzájárulás formájában jelentkezessenek, mert így az egyéb indikátorok biztosítása mellett nem történnek értelmetlen menetrendi módosítások a rendszerben (pl. utaskilométer korlátozások). A vasúttársaságok saját felelőségi körükben határozhatnak arról, hogy sűrűbb követési ütemet tarthassanak, ha azt a közszolgáltatási megrendelésen túl teljesíteni tudják saját.

Ezek (vonali és intermodális) kapcsolatok összehangolásával integrált ütemes menetrendek (ITF) alakulnak ki. Az ITF jellemzői az alábbiak:

- ütemesség: a vonatok egy adott vonattípuson belül, adott időközönként követik egymást, vagyis érkezési és indulási időadataik hasonlóak
 - a kiindulási állomásról az adott állomásig tartó menetidő is megegyezik egy adott vonattípushoz kapcsolódóan (vagyis menetvonalai párhuzamosak)
 - a periódusidő jellegzetes értékeket vehet fel a menetrend szimmetria tulajdonságaiból fakadóan
 - ha a periódusidő nagyobb vagy egyenlő, mint 60 perc, akkor ugyanazon perccadatokat jelenti

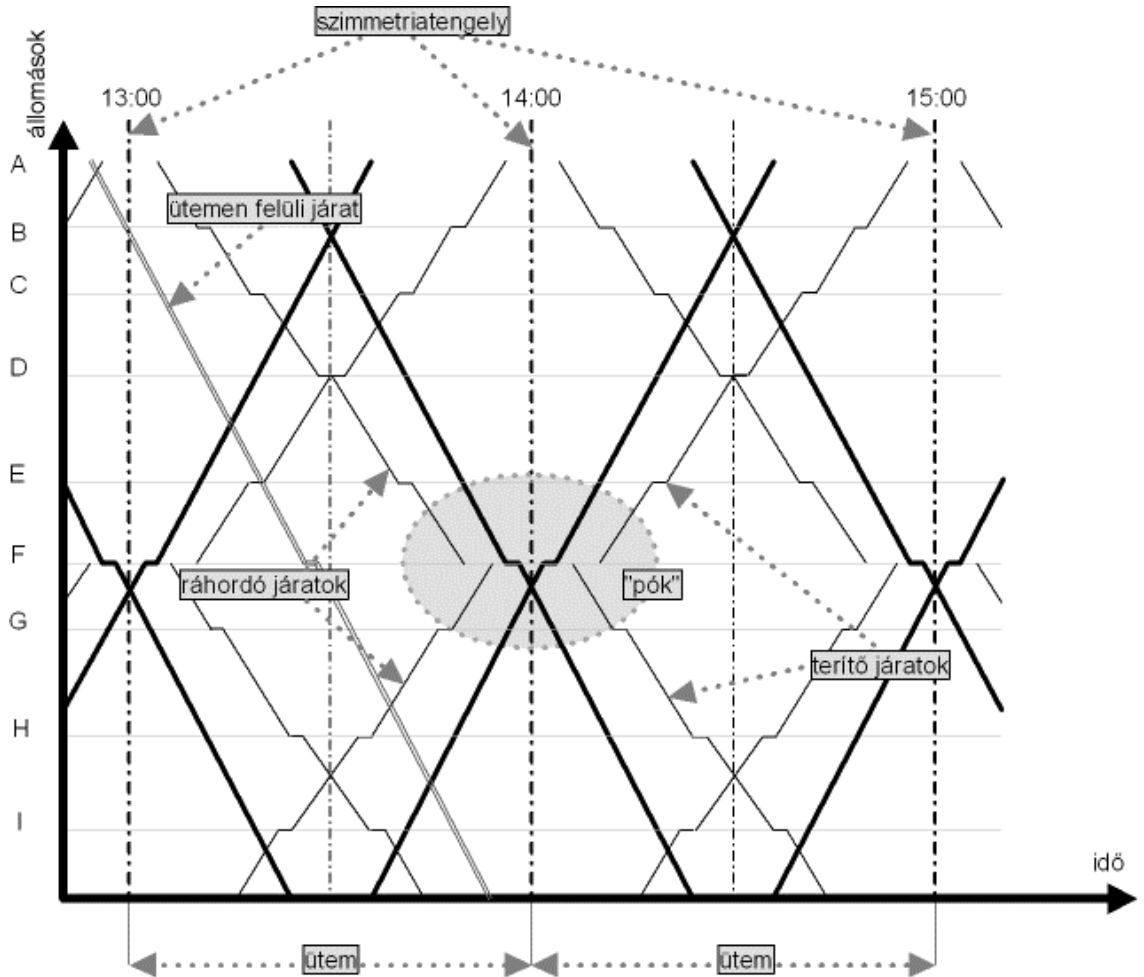
- adott menetrendi időszakon belül eltérő periódusidők lehetnek adott vonattípushoz rendelve (heti és éves időszakoknak megfelelően és speciális közlekedési rend idején – ünnepek illetve vágányzár esetén)
- szimmetria
 - az átszállások könnyen megjegyezhetővé tétele miatt azok egy időbeli szimmetria tengelyhez vannak kapcsolva nagyobb átszállási pontok esetén, ld. menetrendi pók (jellemzően egész vagy ritkábban fél óra, de speciális esetben, egészen ritkán, lehetnek negyed vagy háromnegyed órás szimmetriapontok is)
 - szimmetrikus az adott járat típus által meghatározott időablak menetrendi képe
 - időablak A és B között közlekedő vonattípusra – kezdőpont: $\min(\text{indulás}(A), \text{indulás}(B))$, végpont: $\max(\text{érkezés}(A), \text{érkezés}(B))$ időadatokkal
 - a közlekedési és topológiai sajátosságok miatt a szimmetria kis mértékben sérülhet az időablakban, de ennek mértéke a teljes menetidő maximum 10%-a lehet a gyakorlati tervezésben alkalmazott ökölszabály szerint
 - a teljes napi menetrendben van globális szimmetria az ütemes menetrendhez kapcsolódóan (ez az üzemidőhöz és vonattípushoz kapcsolódóan eltérő lehet; jellemzően 14:00 körüli szimmetriatengellyel)
- összehangolt alrendszerek átszállások biztosításával
 - menetrendi pók: nagyobb állomások időszimmetria tengelyére tükör-szimmetrikusan megvalósuló átszállási rendszer, ahol a gyorsabb magasabb minőségű vonatok a tengelyhez közelebb helyezkednek el, még az egyre alacsonyabb regionális, illetve rá- és elhordó járatok a tengelytől távolabb (fontos, hogy a legkésőbb érkező és legkorábban induló különböző szolgáltatási szintű vagy különböző vonalakon közlekedő vonatok a szimmetriapontban

olyan időtávolságra legyenek egymástól, hogy az átszállást az alábbi módokon meg lehessen valósítani)

- az átszállások során a nagyobb csomópontokban a menetrend által meghatározott szimmetria-időpontok körül jelentős gyalogos utasáramlatok keletkeznek az állomáson belül illetve környékén; a vonatok érkezését és a környezetet úgy kell összehangolni, hogy az utasok
 - minimális utat tegyenek meg
 - minimálisak legyenek szűk keresztmetszetek a gyalogos forgalom előtt (jellemzően lépcsők, kapuk környékén)
 - különböző irányú áramlatok minimálisan keresztezzék egymást egy szintben
 - az akadálymentesített eljutás biztosítva legyen mind eszközökkel, mind az átszállási idő meghatározásánál (az egyéb járművekkel kapcsolatos akadálymentesített megközelítési technológiai időkkal összhangban; kerekesszék emelő működtetésének időkeretei, buszok rámpájának kezelése, stb.)
 - az időjárástól megfelelően védett módon történhet az átszállás (jellemzően csapadék elleni védelemmel)
 - a közlekedési pályákat (vágányokat, úttestet) lehetőség szerint nem keresztező útvonalakkal
- egyéb közlekedési módokkal való kapcsolat során a vasúti menetrendhez való igazodás elsődleges az átszállási ponton (a leginkább kötött és rugalmatlan a menetrendi szerkezete a többi módhoz képest a vasútnak van, kevésbé variálhatóak a menetrendi idők egymáshoz képest való eltolása)
 - az intermodális átszállás során törekedni kell az utasáramlatoknál már bemutatott elvekhez, melyek közös használatú utasforgalmi létesítmények létrehozását jelentik a legtöbb esetben (közös peron, intermodális pályaudvar)

- kínálat (a fent leírt időben egyenletes eljutást biztosító szolgáltatási output többlet)

Az ITF menetrendek fent leírt jellemzőit az alábbi 2. ábrán lehet megtekinteni.



2. ábra: Az ITF menetrend szerkezete (forrás: itf.hu)

A vegyes használatú vonalak esetén a szoros kapacitáskihasználás mellett működő ITF-nek néhány negatív hatása is lehet:

- a teherforgalom számára rendelkezésre álló szűk kapacitás nehezen kihasználható, vagy időben széttagolt közlekedtetés lehetséges, ami versenyhátrányt jelent (a teherszállító vállalatnak; a térségi termelő üzemeknek, akik vasúti teherszállítást alkalmaznak; és a pályavasútnak, a csökkenő pályahasználati díjak miatt)

- a szűk kapacitással rendelkező vonalak esetén a regionális (alapszolgáltatás) kialakítása után nem tud megfelelő szolgáltatási színvonallal rendelkező távolsági vagy gyorsvonalat beilleszteni a menetrendbe, ami előzőleg jelen volt ezzel a rendszerben nemkívánatos átszállási kényszerek és utazási idővesztések jelenhetnek meg egyszerre, melyek az utazóközönség egy részének elvesztésével jár
 - távolsági illetve nemzetközi vonatok megszűnése ennek okán (pl. az ütemes menetrend bevezetése a 81-es vasútvonalon a távolsági szegmens teljes megszűnését jelentette az Urpín nemzetközi gyorsvonal felszámolásával együtt)
 - reggeli és délutáni csúcs lebonyolításához szükséges többletvonatok vagy gyorsított járatok indítása nem lehetséges ennek okán (jellemzően hosszú egyvágányú pályaszakasszal rendelkező állomásközi közlekedési rendben üzemelő vonalak esetén, pl. Banská Bystrica – Brezno)

A menetrendtervezés stratégiai fázisában menetrend katalógust készítenek, amely a fennálló igényeket az adott vonali bontásban képes közelítőleg kielégíteni. A katalógus menetvonalakon felül lehetséges néhány esetben egyedi menetvonalat is igényelni, akár időszakokra akár eseti megrendelésként is. Ez az operatív menetrendtervezés feladataihoz tartozik és a pályavasúti társaság határozza meg, hogy milyen időhatárokkal képes vállalni ezeket a feladatokat. Fontos, hogy az állami tulajdonú holdingokkal szemben a magántulajdonú vasúti szolgáltatók is a pályához férjenek, ezt a közszolgáltatási elemek csomagban való megpályáztatásával, a közszolgáltatáson felüli menetvonalak árversenyeztetésével, vagy az egyedi menetvonalak kiutalásának speciális díjrendszerével lehet megoldani (vagy ezek kombinációiként).

Az operatív feladatok körébe tartozik még a vonat- és kocsifordulók megtervezése, illetve a személyzet vezényletének megtervezése is különböző időtávokra és tartalékokkal. Itt a járművek elosztása során figyelemmel kell lenni a kötelező és a váratlan meghibásodásokból fakadó műhelyi tartózkodási időkre és a megfelelő állomáshelyre való oda- és visszaszállításra is. A véletlenszerű meghibásodások

kezelésére statisztikai módszereket lehet alkalmazni (benne a tartalék járművek mennyiségének és tárolási helyének meghatározásával).

A menetrendszerkesztéssel (illetve üzemszervezéssel) kapcsolatos feladatok tervezése és értékelése során fontos, hogy az összes résztvevő alapvető érdekeit és tevékenységét egyeztessük a pontos és rendszerszinten optimális működéshez, és ezek megfelelően illeszkedjenek az egységes európai közlekedési térben is. Ehhez a 3C üzleti metodust ajánlott használni. Ebben a vásárlók és megrendelők, a vasúttársaságok, illetve versenytársak nézőpontjából is meg kell vizsgálni az egyes lépések hatásait. [4]

3. A menetrendszerkesztés részfeladatai

A továbbiakban csupán a menetrendkészítés szűkebben értelmezett, alapvető feladataival fogok foglalkozni a továbbiakban (az 1. ábra középső tevékenysége). Mint az előző pontban kiderült a tevékenység elég szerteágazó és ez a részfeladat is rengeteg olyan (részben megemlített) optimalizálási lépést kellene megvalósítani, melyek egymásnak ellentmondóak. A továbbiakban a feladathoz (illetve részfeladatokhoz) szükséges eljárások ismertetésével párhuzamosan azok egy lehetséges rendszerbe szervezését is ismertetem a szükséges mértékben. [1]

Adódik a gondolat, hogy a menetrendtervezést egy általános, a kihasználást maximalizáló, erőforrás elosztó eljárás alapján valósítsuk meg. Azonban az így, automatikusan készített menetrendek nem felelnek meg az alapvető elvárásoknak, mivel ez egyvágányú pályaszakaszokon a menetrendet párhuzamos menetvonalakkal teli blokkokkal töltik fel a menetirányváltások idejét minimalizálva, így adott napszakban jellemzően csak egy irányban közlekednek vonatok; még a többvágányú (párhuzamos közlekedésű) esetén pedig a szolgáltatási színvonalak szerint blokkosítja a menetvonalakat egy irányban. A kapacitás maximalizálás mellett tehát a forgalmi áramlatok kielégítése nem valósítható meg. E mellett a forgalmi áramlatoknak megfelelően (a vonatméretekre és terhelésekre vonatkozó előírásokat betartva) kiosztott vonatok közlekedése nem lehetséges, mert így a pályán több vonat is tartózkodhat foglalt elemekben (ami nem megengedett). A tisztán az áramlati igényeket kialakító elosztási eljárás pedig nem veszi figyelembe az erőforrás felhasználásokat. Ebben a két példában tisztán látható, hogy a feladatok szétválasztása nem mindig egyértelmű, a feladatok

nagyrészt átfedik egymást, így sokszor prioritás alapján sem lehet a két eljárást egymás után végrehajtva eredményre jutni. Ugyanakkor egymásnak látszólag ellentmondó optimalizálási feltételekkel állunk szemben. Ennek megoldására a zavarok (egyidejű foglaltságok) eliminálására minimálisan szükséges feltételeket kell a feladatban megadni, amint azt később látjuk majd.

A menetrendszerkesztési feladatok felbontása klasszikusan a következő módon történik meg:

- menetidőszámítás
 - gyorsítás és egyenletes haladás
 - kifuttatás (alkalmazásának paraméterei)
 - fékezés (lambda és gamma vonatok)
- vonatok képzése és azok leközeledtetése a forgalmi áramlatok kielégítése és a biztonsági tényezők figyelembevételével az elérhető optimális erőforrás-felhasználás mellett
 - hagyományos menetrendszerkesztési eljárások
 - ütemes menetrend szerkesztési eljárások
- átszállási rendek összeállítása (az előző ponttal párhuzamosan kidolgozva)

A modern menetrendszerkesztési eljárások, melyek a hagyományos rendszert egészítik ki:

- energiafelhasználás optimalizálása (a kifuttatással kapcsolatosan)
- várakozási idők csatlakozó vonatoknál és zavarokból eredő késések terjedése a hálózatban

A modern eljárások a hagyományos modellek kiterjesztései vagy egy speciális probléma megoldását jelentik. Az eljárások egyéb részfeladatokra is támaszkodhatnak, melyek több helyen (akár eltérő céllal is) alkalmazva vannak. Ilyen pl. az útkereső eljárások, melyek segítségével az egyidejű, de egyúttal legoptimálisabb vágányutakat tudjuk megtalálni. A legoptimálisabb itt jelenti az átszállási feladatok szerinti vágány kiválasztását is, valamint a leközeledtetésben a legkevesebb blokkoló (legkevesebb ideig foglalt) elemeket tartalmazó vágányutak kijelölését is. A feladathoz itt is rendelhetünk különböző tartalékokat, melyet a rendszer figyelembe tud venni. Alapvetően az alábbi

metódusokat és kapcsolódó adatszerkezeteket fogom bemutatni, a tevékenységgel kapcsolatban, a későbbiekben:

- a vonat dinamikai leírásából származtatott differenciál-egyenletrendszer megoldása numerikus közelítéssel
- az erőforrások elosztása
 - periodikus események programozása (PESP – Periodic Event Scheduling Problem solver)
 - útválasztási probléma
- menetrend stabilitási vizsgálata
 - max-plusz algebra alkalmazása

4. A menetrendszerkesztési feladatok bonyolultsága

A felsorolt problémák jelentős részének (főleg a gráfelméleti és optimalizálási feladatok esetén) jelentős bonyolultsága van. Ez matematikai tulajdonságként az algoritmikus bonyolultsággal fejezhető ki. Az algoritmuselmélet az algoritmusokat a Turing-gép nevezetű absztrakcióval írja le. Ezen gép elemi lépésigényének és tárigényének alapján különíthetünk el különböző bonyolultsági csoportokat az adott feladatot a gép nyelvén leíró algoritmushoz rendelve. A vizsgálat során a Turing gép determinisztikusságát is figyelembe kell venni, vagyis ahol egy véges állapotú gép esetén egy bejövő és tárhely állapothoz csak egy (determinisztikus) vagy több (nemdeterminisztikus) következő állapot is tartozhat. A nemdeterminisztikus Turing gépek által leírt feladatokban gyakran kombinatorikus robbanást előidéző vizsgálati lépéseket kell végezni, amely alkalmazhatatlanul hosszú futásidőt eredményez egy bemeneti (input) méret felett; nemdeterminisztikus polinomiális időben (NP osztály). Azonban adott megoldási tervvel determinisztikus polinomiális időben (P osztály) ellenőrizhető a megoldás helyessége. Pl. a Hamilton kör keresése gráfban egy NP-beli probléma. Azonban, ha a megoldás adott (intuícióval előállított), akkor röviden ellenőrizhető a megoldás helyessége. A korábbi tervezési feladatokban az NP-beli problémák megoldását a tervező csapatra bízták (emberi megoldás). Később a számításelmélet is foglalkozott a probléma megoldhatóságával. A Karp-redukció segítségével adott algoritmikus feladat visszavezethető (redukálható) egy másikra.

Amennyiben a sikerül bizonyítani, hogy NP osztály a P osztály részhalmaza, akkor a problémára található redukció és ez a fenti állítás (tétel) bizonyításával elő is áll. Ennek (vagy ellenkezőjének) bizonyítása jelenleg is folyamatban van, eddig csak részeredmények születtek. Szintén kísérleti megoldás a nemdeterminisztikus állapotok fizikai megvalósítása (ez a kvantumszámítógépek qubit állapotaival lehetséges). Ebben a környezetben már léteznek klasszikusnak mondható kvantum-algoritmusok (pl. az egész számok prímtényező felbontását elvégző Shor-algoritmus), ennek alapján megfelelő redukció is található a fenti problémák megoldására. A probléma ebben az esetben az, hogy nincs megfelelő állapotterű működőképes kvantum-számítógép jelenleg. [6]

Azonban mégis léteznek számítógéppel támogatott módszerek NP-beli problémák megoldására (vagy legalábbis a megoldás nem a legoptimálisabb, de a gyakorlatban elfogadható, előállítására). Ezeket a mesterséges intelligencia kutatások és a létező tudásbázis információs rendszerek létrehozásánál alkalmazott módszerek alapján lehet előállítani. A megoldás lényege abban áll, hogy NP-beli A probléma átalakításával az előzőhöz hasonló eredményű P-beli A^* relaxált problémát állítsuk elő, vagy bizonyos feltételek elhagyásával, vagy éppen bizonyos korlátok bevezetésével a feladatnak megfelelően. A működésnek kétféle módszere ismert. Az első módszer, az implicit módszer, szerint egy létező mesterséges intelligencia keretrendszerbe van ágyazva a feladat végrehajtása, ahol a maga a keretrendszer tartalmazza a szükséges redukciókat. Ilyen megoldás pl. a feladat neurális hálózatban a megfelelő súlymátrix megtalálása és az eddigi problémák és megoldások „tanítása” a rendszernek, ahol a belső struktúra ezek mentén alakul ki a keretrendszer által biztosított eljárásokkal. Hasonló megoldást nyújtanak a genetikus algoritmusok is, melyek elsősorban szélsőérték (vagy erre redukálható) feladatok megoldására alkalmaznak. Ebben a megoldásban a véletlenszerű inicializációnak van nagyobb szerepe a későbbi gyorsabb működés biztosításában. A második módszer, az explicit módszer, pedig az A és A^* feladatok közti leképzést analitikusan állítja elő a feladat specifikációjának és az eredmények elfogadható hibahatárának figyelembevételével. A leggyakoribb ilyen relaxálás a linearizálás vagyis a feladat lineáris programozási feladatra való visszavezetése (LP egyszerűsítés). A továbbiakban a legtöbbször ilyen egyszerűsítéseket használok a feladatok leírása során. [7]

5. A menetrendszerkesztési feladatok bemeneti igénye és kimenetei

A feladatok bemenetei általában magasabb szinten mért, kiszámított vagy előírt adatok illetve korábbi eljárások által eredményül kapott kimenetek lesznek. Ezek praktikusán a rendszer által kezelt adatbázisban helyezkednek el és onnan elérhetőek (mint bemenetek), illetve ott tároltak (mint kimenetek). Az adatbázis által tartalmazott adattípusok és metaadat leírók egy jelentős része napjainkban szabványosított formában létezik. Ennek értelmében az adatbázis tartalmát szokás adatcsoportokra bontani, melyek az alábbi részeket írják le:

- pályaleírás (topológiai leírás)
- járműállomány leírása
- a felmerülő közlekedési áramlati igényekkel, biztonsággal és szabályozással kapcsolatok korlátozások leírása
- a menetrend és szerelvényforduló leírása (mint az első két pont összerendelése a harmadik pont alkotta szabályrendszer szerint)

5.1. Topológiai leírás

A topológia és egyéb pályához kapcsolható paraméterek leírása különböző szinteken történhet meg a kifejtés részletességének függvényében. Ez általában a felhasználási módtól függ. A gyakorlati életben meghatározott felbontások a következők:

- folyosó szint (a TEN-T vasúti vonalainak felügyelete, EUROPTIRAILS project alapján)
- makroszkopikus szint (a vonali felbontás alkalmazása)
- mezoszkopikus szint (a vonali és a részletesebb felbontások közti leírás, a menetrendszerkesztési feladatok alapvető szintje, itt látszódnak az állomási és nyíltvonali vágánykapcsolatok)
- mikroszkopikus szint (itt részletesen is megjelennek a legkisebb paraméterek is melyek a működés szempontjából fontosak, pl. túlemlés)
- nanoszkopikus szint (a kerék-sín kapcsolat vizsgálatához szükséges további információk, pl. anyag típusok)

A topológia leírás általában speciális csomópontokkal történik, amely a topológiát leíró gráf csomópontjait kettéosztja egy be- és egy kimeneti részre. Az ilyen gráf egy egyszerű irányított gráffá alakítható, ha a ki- és bemeneti részeket külön csomópontokká alakítjuk és ezek között egy irányított élt helyezünk el a bemeneti csomópont irányából a kimeneti csomópont irányába. Az ilyen leíró gráfokban a csomópontok egy-egy objektumrészt jelenthetnek (pl. egy kitérő különböző ágait). Azonban a felbontás részletességétől függően ezek a csomópontok halmazokhoz rendelhetőek (mintegy magasabb felbontási szinten létező csomópont), ahol már összetettebb megfeleltetést jelenthet (pl. váltó objektum, váltókörzet, stb.). Az ilyen magasabb szintű csomópontok előállítása során az új csomópontba vett alacsonyabb csomópontok közti éleket el kell hagyni, ha azok kiinduló és célpontja ugyanazon magasabb felbontású csomópontban van. Ha két különböző magasabb szintű csomópontban vannak az alacsonyabb szintű struktúra végpontjai, akkor a két magasabb szintű csomópontot irányított él köti össze. Az így előállt magasabb szintű leírás gráfjában megjelenő párhuzamos irányított élek közül elegendő egyet megtartani vagy figyelembe venni (vagyis az ugyanabból a pontból ugyanabba a pontba tartó ugyanolyan irányítottságú éleket). A gráfban a hagyományos irányított gráfokra érvényes algoritmusok érvényesek (útkeresés, maximális folyam keresése, feszítőfa előállítása). Az így előállított gráfok esetében lehetséges az állomás egy bemenetéről (vonalról vagy vágányról, adott felbontás szerint) a menetirányváltás nélkül elérhető kimenetek elérése (vonalak vagy vágányok).

A megkötések biztosítóberendezésekre vonatkozó leírásaival (pl. jelzők helyzete és biztosított szakaszok) elkészíthető egyszerű útkeresési algoritmusok segítségével az állomáson egyidejűleg használható vágányutak terve, valamint az ehhez kapcsolódó elzárási táblázat is. Azonban a tervezés során további megkötéseket is figyelembe kell venni:

- az állomás (illetve vágányai) által fogadni képes legnagyobb vonathossz
- a biztonságos menetek elérése miatt a vágányútban nem érintett váltók biztonságos állapotban való rögzítése (másodlagos foglaltság)
- a vágányutak kialakításánál figyelembe kell venni a megcsúszási távolságokat (ezek az utasítások értelmében eltérő módon képztettek, van

ahol rögzített érték, van ahol a sebesség függvénye és van ahol a pályaszakasz lejtésének mértéke is számít)

- az elérhető sebességek a jelzési rendszer függvényében változnak (hagyományos jelzési rendszer kevés állapotú sebesség értékei, a modern rendszerek kvázi folyamatos sebességértékei és menetengedélyei)

A topológiai leírásnak kiegészítő leíró elemei is lehetnek:

- energetikai rendszerek (betáplálási pontok, elérhető teljesítmény a villamos táplálási szakaszokon, üzemanyag vételezési pontok, víz vételezési pontok, szényszerelési pontok)
- az objektumok (pontok, vonalak, objektumok) elhelyezése a térinformatikai rendszerben
 - geo referencia szerint (koordinátás megoldás adott vetülethez, legtöbbször WGS84 vetülethez)
 - vonali elhelyezkedés (szelvényszám szerinti felvétel)

A topológiai adatok tárolására az UIC által irányított konzorcium létrehozta a RailTopoModel sémát, amely a fenti topológiai leírási funkciókat nagyrészt implementálja. Illetve a korábbi UIC adatbázisokat is közös sémára helyezik a fejlesztéssel párhuzamosan.

5.2. Járműleírás

A járműveket alapvetően két csoportba lehet osztani: a vontatott és vontató járművekre. Minden jármű rendelkezik alapvető tulajdonságokkal, mint a különböző menetellenállások, tömeg és a vonatrészek kapcsolatát biztosító kapcsolóelemek terhelhetősége. A vontatójárművek ezen felül további paraméterekkel láthatóak el, amelyek a jármű meghajtásával kapcsolatos teljesítmény és nyomaték információkat adják meg.

A jármű leírása is több szinten történhet meg. A részletezettség leírása a felhasználás módjától függ. A létező szabványok alapvetően az alábbi leírási formákat adják meg:

- fekete doboz leírás

- az erőhatások kifejezéséhez szükséges mennyiségek paraméteresen adottak (pl. a vonóerő számításához néhány jellemző adat áll rendelkezésre, teljesítmény, nyomaték, jelleggörbe legfontosabb jellemző sebességértékei)
- az erőhatások kifejezése valamilyen részletesebb alakban adott
 - képlettel
 - jelleggörbével (annak részei közelítve jellemzően lineáris, parabolikus, hiperbolikus, logaritmikus és exponenciális görbetípussal a grafikus szerkesztőfelületen)
- fehér doboz leírás (ahol a részletes gépészeti vagy fizikai leírás is lehetséges a hajtóművel kapcsolatosan)

5.3. Szabályrendszerek

A szabályrendszerek az általános jogszabályi, szabványbeli és utasításbeli megkötéseket tartalmazzák az adott földrajzi terület vagy társaság alapján való lehatárolásában. A következő elemek helyezhetőek el ide:

- biztosítóberendezési jellegzetességek
 - jelzési képek (diszkrét vagy kvázi folyamatos sebességjelzés illetve menetengedély)
 - térközök kialakítása (hagyományos vagy virtuális)
- biztonsági mennyiségek
 - megcsúszási távolság számítása
 - ellenállási és vontatási erőkhöz kapcsolható biztonsági tényezők kialakítása
 - az energiatakarékosság és a menetdinamika közti egyensúly indikátorai (vezetési módok, kifuttatások mértéke)
 - a térközök biztosítása során a foglaltsági szakaszok átfedésének hossza
 - vonattalálkozások vagy követések közti időtávolságok
- szolgáltatási minőséghez kapcsolható mennyiségek
 - átszállási idők

- csatlakozásra várakozási idők (menetrendi stabilitással kapcsolatos előírások)
- zavarkezeléshez kapcsolódó időindikátorok a szolgáltatások összevonására vagy lemondására (havária vagy pályaelem-hiba esetén)
- pályaelemek maximális bejárési sebessége

5.4. Lehetséges felhasználási módok

A három alapvető adatcsoport használatával és a köztük lévő korlátok leírását tartalmazó szabályok segítségével különböző automatizált feladatok végezhetőek el annak függvényében, hogy melyik adatcsoportot tekintjük rögzítettnek és melyiket hagyjuk szabadon, az eljárások által szerkeszthetőnek (ceteris paribus vizsgálati eljárás). Így az alábbi kombinációk merülhetnek fel felhasználásra, melyek az

rögzített adatcsoportok	szabad adatcsoport	vizsgálati cél
topológia-gördülőállomány	menetrend	menetrendkészítés, forgalmi szimuláció
menetrend-gördülőállomány	topológia	infrastruktúra (pálya) szűk keresztmetszeteinek feltárása
menetrend-topológia	gördülőállomány	gördülőállomány fejlesztési és karbantartási terve

5.5. Adatsere információs rendszerek között

A többszereplős piacon a vasúttársaságok nagyobb csoportja van jelen, akik saját információs rendszerüket használják. Ezek között a szereplők között valamilyen szabványos adatszerével kell megoldani a tervezési lépések és operatív működés közbeni információcserét. Hasonló a helyzet a szomszédos vasutakkal is. Erre a piaci igényre jelent meg a railML formátum.

A railML az XML (eXtensible Markup Language) speciális kiterjesztése az iparági szereplők közti adatcserére. A most megjelenő harmadik változatban több újdonság (pl. a biztosítóberendezési leírás) mellett a teljes RailTopoModel séma leírhatóságát is biztosítja. Az XML formátum miatt a hordozhatóság megvalósulhat offline (fájlként) vagy online (webservice) formában is. Ez igen rugalmassá teszi ezt a formátumot a felhasználási módokban. [8]

6. A vonat mozgásának differenciálegyenletét megoldó numerikus közelítés

A vonatok menetidejének és energiafogyasztásának számítása a menetdinamikai összefüggések által adott differenciálegyenlet-rendszer megoldásával állítható elő. A gyakorlatban a bemeneti formátumok és a rendszer komplexitása miatt a zárt alakban való megoldás nem lehetséges, de semmi esetre sem praktikus. Ennek kiküszöbölésére hagyományosan numerikus eljárást alkalmazunk, mellyel iteratíván közelíthető a szükséges pontosságú megoldás. A vizsgálat során csak a főmozgással foglalkozom és a parazita (bólintás és rezgések) és járulékos (szinuszfutás) mozgásokkal nem.

A feladat a következő formában áll elő:

$$F_{\text{vonat}} = F_{\text{vonóerő}} - F_{\text{ellenállás}} - F_{\text{fékerő}} \quad (1)$$

$$F_{\text{ellenállás}} = F_{\text{pályaellenállás}} - F_{\text{lejtőerő}} + F_{\text{légellenállás}} + F_{\text{kocsiellenállás}} \quad (2)$$

$$m_{\text{vonat}} = m_{\text{saját}} + m_{\text{hasznos}} \quad (3)$$

$$a_{\text{vonat}} = \frac{F_{\text{vonat}}}{m_{\text{vonat}} \cdot \gamma_{\text{vonat}}} \quad (4)$$

$$v_{\text{vonat}} = \int a_{\text{vonat}} dt \quad (5)$$

$$s_{\text{vonat}} = \int v_{\text{vonat}} dt \quad (6)$$

$$F_{\text{vonóerő}} = \min(F_{\text{adhézió}}; \min(F_{0g} \cdot \alpha; \frac{P_{\text{vonat}}}{v_{\text{vonat}}} \cdot \alpha)) \quad (7)$$

$$F_{\text{fékerő}} = \min(F_{\text{adhézió}}; \min(F_{0f} \cdot \beta; F_r \cdot \beta)) \quad (8)$$

$$F_{\text{lejtőerő}} = m_{\text{vonat}} \cdot \sin(\delta_{\text{vonat}}) \quad (9)$$

, ahol $F_{adhézió}$ a sín és a kerék közti adhéziós erő (a megcsúszás határáig), γ_{vonat} a vonat forgótömeg tényezője, δ_{vonat} a vonat aktuális tartózkodási helyének lejtő dőlésszöge, F_{0g} a legnagyobb elérhető vonóerő a vontató egységben, F_{0f} a legnagyobb fékerő a teljes vonatra, α a vonóerő kivezérlés mértéke és β a fékerő kivezérlés mértéke.

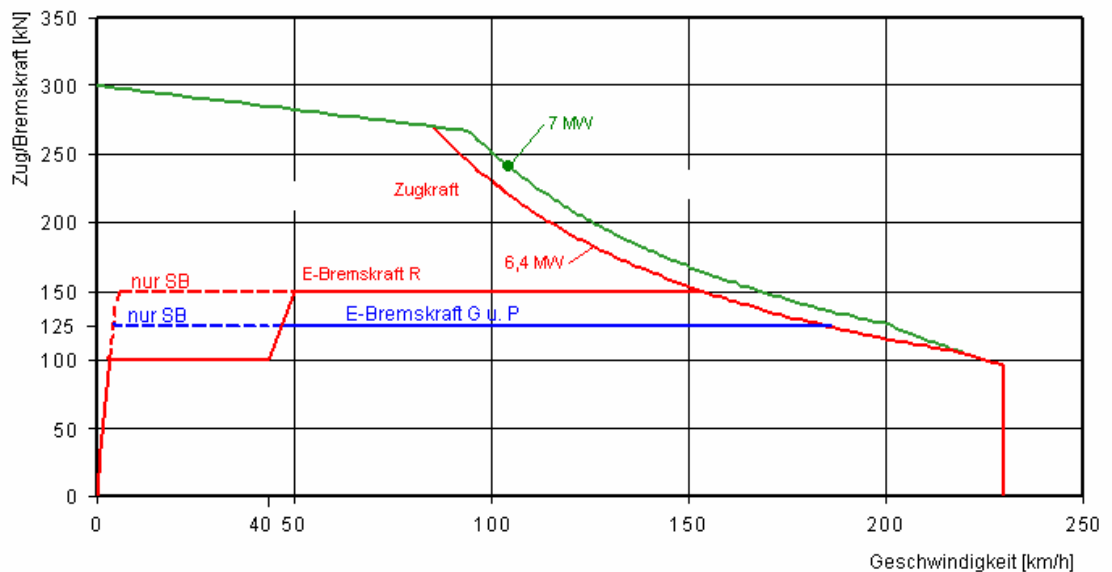
Az ismeretlen erőhatások (ellenállások, fékerő) kifejtése alább következik, illetve az adatbázisból tárolt alapadatokból (kocsitömegek, teljesítmény, terhelések, stb.) jön.

6.1. Vonóerő

A vonóerő meghatározása az adatbázisban tárolt adatok segítségével történhet, vagy jelleggörbével, vagy általános gépészeti paramétereiből számítással. Az általános vonóerő-diagramm a teljesítménytartó motorok jelleggörbéje szerinti (ld. 3. ábrán pirossal jelölve). Jellemző a teljesítménytartás miatti hiperbolikus karakterisztika, amit egy határsebesség alatt lineáris karakterisztikájú szakasszal szabályoznak le, valamint a végsebesség, ami a vonóerő görbe végét jelenti. A maximális teljesítmény bizonyos feltételek teljesülése esetén bizonyos mértékben megnövelhető rövid időszakra a menetdinamikai vizsgálat során (csak ha nagyon szükséges). A normál gyorsítások meghatározása a hagyományos módszerben egy megengedett maximális gyorsulási értékkel számol $0,424 \text{ m/s}^2$ -el. Ez tovább finomítható az alábbi értékekkel (forrás: ERA ETCS dokumentáció és DB LZB dokumentáció):

- elővárosi vonatok esetén $0,525 \text{ m/s}^2$
- személyvonatok esetén $0,375 \text{ m/s}^2$
- tehervonatok esetén $0,225 \text{ m/s}^2$

Amennyiben a vonat nem képes az adott gyorsuláshoz szükséges vonóerő kifejtésére, akkor a minimális vonóerővel kell számolni, úgy, hogy a vonat a kijelölt pályaszakaszon teljesíteni tudja az előírt minimális gépezeti vonóerőt (megállás után a pálya bármely pontján biztonságosan el tudjon indulni). A kivezérlést ezek alapján kell meghatározni.



3. ábra: Siemens ES64U2 mozdony karakterisztikái (forrás: Siemens A.G.)

6.2. Fékerő

A fékerő számítása bonyolult lenne fizikai módszerekkel, így bizonyos méréseken alapuló statisztikai módszerekkel meghatározott általános megoldásként lehet kezelni. A fékerő számításnál többféle megközelítést lehet használni. Alapvetően a gyorsulási értékekből is ki lehet indulni, ha a vonatunk a menetrendi segédkönyvben előírt megfékezettséget biztosítani tudja. A vonatok normál lassítási mértéke a gyorsulásukkal megegyező (de ellentétes értelmű) mennyiségekkel lehet dolgozni. A vészfékezések normál lassítások duplájával lehet figyelembe venni.

Ha ennél pontosabb megoldást szeretnénk megvalósítani, akkor a 160 km/h-ig az UIC által kidolgozott megfékezettségi értékekkel dolgozó modellel tudjuk a fékerőt kiszámolni (lambda vonatok). Még pontosabb esetben (ERTMS alkalmazása menetengedélyekkel) pedig a gamma modell segítségével számíthatóak a fékerő görbék. Ezt az utóbbi modellt használhatjuk bármilyen sebességnél a fékezés nem a féksúly értékek segítségével, hanem más paraméterek alapján, számítható ki (ETCS fékgörbe számítások).

A fékerő számításánál figyelembe kell venni az egyéb fékezési módokat is, így az elektrodinamikus fékezés (3. ábrán kékkel jelölve) és a sínfékezés (ahol lehetséges) esetét is. A kivezrlést ezek alapján kell meghatározni.

6.3. Adhéziós határ

Az adhéziós határ a sín-kerék kapcsolat gördülési ellenállási értékéből származtatható összefüggés. A pontos leírására többféle modell létezik. A gyakorlatban a leginkább elterjedt megoldás szerint a Curtius-Kniffler formulát alkalmazzák [1]:

$$\mu_v = \frac{7,5}{(3,6 \cdot v_{\text{vonat}} + 44) + 0,161} \quad (10)$$

$$F_{\text{adhézió}} = \mu_v \cdot m_{\text{vonat}} \cdot \cos(\delta_s) \quad (11)$$

6.4. Ellenállási erők

A következő ellenállások léteznek a modellben:

- menetellenállások
 - csapsúrlódási (a kocsi tömegétől és sebességétől függ)
 - gördülési (intervallumban szokás megadni; játékköz függvénye)
 - sínütközési (sebesség függvénye)
 - légellenállás (sebesség és normálfelület nagyságától függ)
- járulékos ellenállások
 - emelkedési (a tartózkodási helytől függ már a (9)-es összefüggésben leírva)
 - ív (az ív sugarának és a kocsi geometriájának függvénye)
 - kitérő (intervallumban szokás megadni)

Az ellenállások statisztikai vizsgálatok által előállított gyakorlati képletekkel közelíthetők a tervezésben. Ezeket az egyes vasutak egyénileg definiálták saját használatukra. Ezek fellelhetők a vonatkozó szakirodalomban részletezve is. [2]

6.5. További megkötések

További megkötéseket is kell tenni a vonatmozgással kapcsolatban a tervezés szempontjából. A vonatoknak a közlekedési útvonalában szereplő összes állomás maximális vonathossz korlátozásaiból a minimális értéket be kell tartania (a vágányút állítás bizonytalansága miatti worst-case scenárió).

A vonatokba sorolt jármőrészek által meghatározott sebességhatárok közül a minimális érték lesz a vonat maximálisan sebessége. Ezt még az adott vonalszakasz engedélyezett sebességével, illetve a sebességsoportjával is össze kell hangolni úgy, hogy az összes sebességadat közül a minimális érték legyen érvényes egy adott vonatra a az adott szakaszon.

További tervezési korlátozás, hogy a vonat megfékezhetőségét és terhelhetőségét is figyelembe kell venni a tervezéskor és ezeknek megfelelő vonathossz határt beállítani (ezeket tovább csökkenthetik szükség esetén az állomási maximális vonathossz értékek).

6.6. Számítási módszer

A jó stabilitással rendelkező (negyedrendű) Runge-Kutta módszer segítségével lehet közelítőleg megoldani az egyenletrendszert. [3]

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{3}(k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4) \quad (12)$$

$$k_1 = \frac{h}{2} \cdot f(x_n, y_n) \quad (13)$$

$$k_2 = \frac{h}{2} \cdot f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + k_1\right) \quad (14)$$

$$k_3 = \frac{h}{2} \cdot f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + k_2\right) \quad (15)$$

$$k_4 = \frac{h}{2} \cdot f(x_n + h, y_n + 2 \cdot k_3) \quad (16)$$

, ahol h a lépésköz és f a differenciál kifejezése.

Az implementáció során fontos, hogy az egyes lépések hibahatára ne lépjen át egy kritikus mértéket, ez a lépésköz megválasztásával és a különböző lépésközzel számított következő elemeket paraméterül használó kifejezéssel biztosítható (ahol $y(n+1)$ értéke következő értéke h és $h/2$ értékekre van kiszámolva – utóbbi a csillaggal jelölt tag) [3]:

$$d_n \approx \frac{16}{15} \cdot (y_{n+1} - y_{n+1}^*) \quad (17)$$

6.7. A numerikus közelítés hibája

A numerikus közelítés az iteratív számítási módszer miatt a számítási lépésekben foglalt hibákat minden egyes további lépésben tovább görgeti. A hibák az eredmény, mint

közéérték, körül egyenletes eloszlás szórása szerinti eltéréseket okozhatnak, melyek hosszabb távon kiegyenlítik egymást. Azonban a számítógépes közelítés esetén előfordulhatnak olyan helyzetek, mikor a hibák nem egyenlítik ki egymást, hanem még nagyobb eltéréseket okoznak a műveletek folyamán. Ez a számítógép által ábrázolni képes számok végességéből fakad. Így a lebegőpontos számábrázolás esetén is vannak olyan értékek, melyek nem fejezhetőek ki, mivel nem ábrázolható adott adattípusban (ezeken a helyeken ún. „lyukak” vannak a lebegőpontos adatszerkezet diszkrét ábrázolási jellegéből fakadóan). Az ilyen értékek az egyik közeli értékre konvertálódnak, kerekítődnek. Ennek következtében az így előálló számleíró halmaz algebrai értelmezésben nem test (jellemzően az asszociativitás és a disztributivitás tulajdonságai sérülnek a végrehajtási sorrendtől függően). Ezt az eltérésekből származó és folyamatosan zavaró hatást a numerikus módszer instabilitásával és kondíciószámával fejezhetjük ki. Ezek az implementált függvény lineáris érzékenységgel meghatározható mennyiségek. A hibaterjedésnek és stabilitásvizsgálatnak külön összefüggései vannak, melyekre most nem térünk ki.

7. Egyéb eljárások

7.1. A periodikus esemény időzítés problémájának megoldása

A menetidőkből, a tartózkodási időkből és az időbeli korlátokból (melyek az állomási vágányzat vagy a megcsúszási távolság bejárásának menetidő számításából következik) az (elsődleges és másodlagos) foglaltságok figyelembevételével egy ütemes menetrend szerkesztése a feladat. Erre a PESP (Periodically Event Scheduling Problem) megoldása áll rendelkezésünkre. A kiinduló feladat önmagában NP-beli, ezért lineáris (LP) relaxált és egész értékű változatát vesszük figyelembe. [1]

Az eredeti probléma felírása a következő:

Adott egy $D=(V, A)$ gráf és mellé \underline{l}^A és \underline{u}^A vektorok, melyek egész értékeket tartalmaznak, és a T periódusidő.

Létezik-e olyan $\underline{\pi}$ vektor eleme $[0, T)^V$, hogy $(\pi_w - \pi_v - l_a) \bmod T \leq u_a - l_a$ minden $a = (v, w) \in A$ esetén.

Problémaként léphet fel, hogy a modellben az időbeli korlátok olyan szigorú feltételeket szabnak meg, hogy azok nem jutnak értelmes megoldásra (túlhatározott egyenletrendszer). Ilyenkor a megadott korlátok prioritása szerint el kell hagyni azok közül (a lehető legkevesebbet), még az új megoldás előáll. Ez újabb NP-beli probléma, melynek megoldása a mai kutatások témája. Az eljárással az indulási idők eltolására és az állomási várakozási időkre adódnak értékek.

7.2. Menetrendi stabilitás

A menetrendi stabilitás a max-plusz tropikus algebra által leírt műveletek sajátérték feladataként lehet menetrendi stabilitásvizsgálatra használni az irodalomban leírt módon. A metódussal a késési hatások is végigkövethetőek a hálózaton. [1]

8. Összefoglalás

A dolgozatomban bemutattam azokat az eljárásokat, melyek segítségével a megfelelő adatheménységel és –minőségel rendelkező adatbázisokból a menetrendtervezési feladatok minimális beavatkozással elkészíthetőek. Ezek összeállítása egy működő információs rendszerre külön folyamat, amely elég sok időt vesz igénybe. Ennek implementálását már elkezdtem, azonban a rendelkezésre álló időkeretben ennek nem sok eredménye látszik még. Ez pedig a probléma sokoldalú és komplex kezelése miatt van, illetve a szoftverfejlesztési módszerben az alkalmazott eljárások generikus megvalósítása az újrahasonosítás miatt újabb szoftvertervezési problémát állít. Szintén probléma a megfelelő inputok elérése a működés teszteléséhez. Ezek kidolgozása illetve megoldása folyamatban van és ez a várható továbblépés is a munkámban a jövőben.

A bemutatott eljárások adatbázison keresztül történő alkalmazása megteremtette azt a teret, ahol az egymásra épülő feladatok igényvezérelve indulhatnak el, a megfelelő bemenetek előállása útján. Így lehetséges a topológiai vizsgálatoktól kezdve a menetidő-kalkuláción át a menetrendtervezéshez kapcsolódó erőforráselosztási probléma megoldásával létező menetrendeket előállítani. A vizsgált eljárások azonban még most is jelentős beavatkozást igényelnek, mivel a túlhatározott feltételrendszerek feloldása, vagy a menetrendi pókok kijelölése túl komplex feladat a rendszernek jelen pillanatban. A későbbiekben ezek további vizsgálatára lesz szükség. A vasúti folyamatok minőségi leírásának formalizálásával ezek a döntések is automatizálhatóak lesznek idővel.

A folyamatok jelenlegi implementációjában az alkalmazott relaxációk sem egészen pontosan vannak megvalósítva így a rendszer többször eredménytelenül fut le speciális inputok esetén. Ezeknek a hibáknak az eliminálása is folyamatban van.

Hosszú távon a rendszer fejlesztésével megvalósulhat a dolgozatomban elején kitűzött cél, de addig még jelentős munka van hátra az eddigi eredmények további finomításával és még több kutatással az eredmények függvényében.

9. Irodalomjegyzék

- [1] Hansen, Ingo Arne; Pachl, Jörn (et. al.): Railway timetable & traffic (DVV Media Group, 2008, ISBN 978-3-7771-0371-6)
- [2] Gajári, József: Vasútépítéstan I. (Tankönyvkiadó, 1983, ISBN 963-17-6393-5)
- [3] Henrici, Peter: Numerikus analízis ((Műszaki Könyvkiadó, 1985, ISBN 963-10-6419-0)
- [4] Horizonty železničnej dopravy 2015 – zborník príspevkov (Žilinská Univerzita v Žiline, 2015, ISBN 978-80-554-1097-5)
- [5] Ortúzar, Juan de Dios; Willumsen, Luis G.: Modelling transport (John Wiley & Sons Inc., 2006, ISBN 978-0-471-86110-2)
- [6] Rónyai, Lajos; Iványos, Gábor; Szabó, Réka: Algoritmusok (Typotex, 2005, ISBN 963-9132-16-0)
- [7] Russell, Stuart; Norvig, Peter: Mesterséges intelligencia (Panem, 2005, ISBN 963-545-411-2)
- [8] 4th RailTopoModel and railML conference/ Paris, April 2015 (UIC HQ)