

VÁLASZ

Dr. Kóczy László Tamás egyetemi tanár, MTA Doktora
„Közúti járműforgalmi folyamatok nemlineáris modellezése nagyméretű hálózatokon” című
doktori értekezés opponensi bírálatára

Köszönöm Tisztelt Bírálóm megállapítását, hogy a téma igen aktuális, mivel: „A közúti járműfolyamatok modellezése korunk egyik legégetőbb problémájával, jelentős gazdasági, környezeti, szociológiai és a fenntartható gazdaság és társadalom kérdését gyökereiben érintő problémakörrel foglalkozik.”

Valóban klasszikus irányításelméleti, nemlineáris differenciálegyenlet-rendszereken alapuló megközelítést alkalmaztam. Ezzel kapcsolatban örömmel olvastam azon megállapítását is, hogy a vizsgálat „kétségtől hatékony matematikai eszközre alapul”. Teljes mértékben egyetértek azzal is, hogy „fontos az, hogy e modellek kezelésének, megoldásának az erőforrásigénye ne haladja meg a reális rendelkezésre álló erőforráskapacitást.”

Számomra nagyon fontos Bírálóm azon összefoglaló megállapítása is, hogy „a témaválasztás igen időszerű, az alkalmazott megközelítés kétségtől tudományosan megalapozott.”

Emellett természetesen azon megállapításával is egyetértek, hogy „az alternatív megközelítések az utóbbi évtizedekben egyre nagyobb létjogosultságot nyernek.”

Nagyon köszönöm a „Formai jellemzők” bírálati részben tett megállapításait is! Így, az értekezéssel kapcsolatosan, hogy „mintaszerű külalakkal, világos felépítéssel rendelkezik.”

Teljes mértékben elfogadom és a jövőre vonatkozóan figyelembe fogom venni Tisztelt Bírálóm 1., 2., 3. számozással ellátott, a hivatkozásokkal kapcsolatos, számomra hasznos kritikai észrevételeit is.

A „Tartalmi kérdések, a tézisek értékelése” című bírálati részben Tisztelt Bírálóm az egyes fejezetekkel kapcsolatban tette meg észrevételeit. A továbbiakban rátérek ezekre.

Az 1. Bevezetés a témaválasztás indoklását tartalmazza. Valóban „érdekes lett volna egy nemzetközi kitekintés is” és az indoklásban egy szélesebb, nemzetközi területet érintő fejlődést tárgyalni a kérdéskör fontosságát és aktualitását illetően. Ugyanakkor átgondoltam a hazai tudományterületen végbement fejlődést is, amely immáron nemzetközi szinten is komoly elismerést váltott ki a rangos magyar kutatók eredményeit tekintve. Ez egyértelműen jó alapot teremtett számomra ebben a rövid részben, a hazai tudományterületen végbement tudományos fejlődésre utalva bevezetni a kutatásaimat.

A 4.3 alfejezetnél Tisztelt Bírálóm kiemelt két fontos, modellezéssel kapcsolatos módszertani elemet, ill. fogalmat. Ezekkel egyetértve megjegyzem még, hogy a disszertáció ezen alfejezetében nagyon fontos módszertani megállapítás az is, hogy:

„A parkolók ugyanolyan - állapotjellemzővel és anyagátadás-kooperációval bíró - dinamikus elemek, mint a hagyományos szektorok.” Ennek nagyon fontos következménye, hogy a rendkívül bonyolult és nagyméretű közúti hálózatokhoz kapcsolódó járműforgalmi folyamatok egységes dinamikus modelljét, ily módon sikerül egyféle elemek sokaságából felépíteni.

Az 5.5 alfejezetnél Tisztelt Bírálóm megjegyezte, hogy „Érdekes elem itt az egzisztencia és unicitás vizsgálat ..., érdemes lett volna részletesebben kifejteni, Tézisbe beépíteni.”

Nagyon köszönöm Tisztelt Bírálóm ezen észrevételét. Ezt a vizsgálatot a matematikai modellezés megalapozásánál tekintetem fontosnak, ezért nem építettem be tézisbe.

Tisztelt Bírálóm 1.1 tézisre vonatkozó értékelését és észrevételét szintén nagyon köszönöm!

Az alábbiakban a megjegyzésekre és a feltett kérdésekre adott válaszaimat ismertetem.

1. Megjegyzés: *A modell szoros matematikai rokonságot mutat a szakirodalomban a fuzzy kognitív térképnek nevezett kombinált fuzzy-neurális hálózati modellel.*

1. Kérdés: *Megkérdezem a jelöltet, végzett-e összehasonlítást a fuzzy kognitív térképek modellek segítségével elérhető eredményekkel?*

A kérdésre válaszolva ki kell emelnem, hogy a modellezés módszertanában teljes mértékben a közlekedési folyamatok makroszkopikus szemléletű analízisét tekintetem kiindulási alapnak. A közúti közlekedési járműfolyamatok vizsgálata szempontból tekintetem a rendkívül szerteágazó, bonyolult közúti hálózatokon lezajló fizikai-anyagáramlási problémára. Ennek a komplexitása ragadott meg. Annak a tisztázása volt a célom, hogy milyen módon lehet uniformizálni a problémát minél egyszerűbb struktúrát alkalmazva ahhoz, hogy ez végül jól áttekinthető legyen egy megfelelő matematikai modell szerkezettel.

A fenti megközelítés miatt Professzor Úr kérdése valóban meglepett, viszont a válaszomban örömmel elvégeztem az érdekes összehasonlító vizsgálatot, áttekintve a fuzzy kognitív térkép (F) és a nagyméretű közlekedési hálózat (H) modellezése esetén alkalmazott fogalmakat és módszereket az alábbiak szerint.

1.) (F). A fuzzy kognitív térkép esetén a C_i csúcspont, ill. csomópont állapotát a t időpontban $x_i(t)$ valós, $[0,1]$ intervallumba tartozó, a befolyás súlyát jelentő numerikus érték - fuzzy érték - írja le.

1.) (H). A nagyméretű közlekedési hálózat esetén a C_i csúcspontok állapotát a t időpontban $x_i(t)$ valós $[0,1]$ intervallumba tartozó függvényérték, - a modell által számított járműsűrűség érték - írja le. Ez esetben a csúcsok fizikai jelentése alatt, a közúti hálózat általánosított szektorai értendők.

2.) (F). A gráf e_{ij} élei w_{ij} súlyokkal társulnak, amelyek a C_i és C_j tényezők, állapotjellemzők kölcsönhatásának mértékét írják le.

Ekkor, az az ún. FCM I módszer, a C_i csúcsához tartozó x_i állapotjellemzőt a $t+1$ -ik időpontban az alábbi módon határozza meg:

$$x_i(t+1) = f \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n w_{ij} \cdot x_j(t) \right) \quad (1)$$

Amely a w nemnegatív élsúly vektor és x nemnegatív állapotjellemző vektor skaláris szorzatán értelmezett f függvény értéke, ahol $f(x)$ egy szigmoid átviteli függvény.

Ugyanakkor, a hálózati modellnél, az általam alkalmazott összefüggéseket tekintve, formai szempontból sokkal inkább célszerű az FCM II módszert vizsgálni, amely figyelembe veszi a „tényezők ön-hatását” is egy második tag alkalmazásával:

$$x_i(t+1) = f \left(k_1 \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n w_{ij} \cdot x_j(t) + k_2 \cdot x_i(t) \right) \quad (2)$$

2.) (H) Az általam felírt modell esetében a C_i csúcspont állapotjellemzőjének időbeni változását differenciálegyenlet írja le, figyelembe véve a makroszkopikus modellre jellemző fizikai, áramlási összefüggéseket. Először tekintsük az általam vizsgált Globális modellt, (amelynél n db belső szektor van és csak belső szektorok vannak). A modellenél az i -ik szektor x_i állapotjellemzőjét az alábbi differenciálegyenlet határozza meg:

$$\dot{x}_i(t) = \frac{1}{l_i} \cdot \left[\sum_{j=1; (j \neq i)}^n v_{ij} \cdot x_j(t) - \sum_{r=1; (r \neq i)}^n v_{ri} \cdot x_i(t) \right] \quad (3)$$

Ahol: $L = \text{diag}\{l_1, \dots, l_n\}$, l_i a főátlóban a belső szakaszok hossza ($\forall l_i > 0$, $i=1,2,\dots,n$), $x \in \mathfrak{R}^n$, $\dot{x} \in \mathfrak{R}^n$.

Jól látható, hogy ebben az esetben is értelmezhető a probléma oly módon, hogy az állapotjellemzőket v_{ij} és v_{ri} értékek súlyozzák. Ez formailag megfelel ugyan a fuzzy kognitív térkép esetén a w_{ij} –vel és k_2 –vel jelölt súlyoknak, azonban a modellem esetében ezeket a súlyokat a differenciálegyenletnél, az i -ik belső szektor állapotjellemzője esetében, az időtől és állapottól függő sebességfüggvények, határozzák meg. Általános felírásukra, (a közlekedési folyamat belső automatizmusaiból következő hektikus áramlási feltételeknek megfelelően) az alábbi összefüggések érvényesek:

Az inputnál:

$$v_{ij} = S(x_i(t)) \cdot V(x_i(t), x_j(t), \underline{e}_i, \underline{e}_j) \cdot E(x_j(t)) \cdot \alpha_{ij}(x(t), t) \cdot \beta_{ij}(x(t), t) \cdot \gamma_{ij}(x(t), t) \cdot u_{ij}(t) \quad (4)$$

Az outputnál pedig:

$$v_{ri} = S(x_r(t)) \cdot V(x_r(t), x_i(t), \underline{e}_r, \underline{e}_i) \cdot E(x_i(t)) \cdot \alpha_{ri}(x(t), t) \cdot \beta_{ri}(x(t), t) \cdot \gamma_{ri}(x(t), t) \cdot u_{ri}(t) \quad (5)$$

További jelentős eltérés az is, hogy a fuzzy kognitív térkép esetén a w_{ij} –vel jelölt élsúlyok értékei a $[-1,1]$ intervallumban helyezkednek el. A hálózati modell esetében a sebességek nem negatívak és a valós forgalom által meghatározott tartományba esnek.

Az általam létrehozott modellben a súlyoknak tekinthető sebességekre vonatkozóan, nincs korrelációs együtttható típusú determináltság sem:

- A w_{ij} élsúly pozitív, ha az állapotjellemzőket tekintve, C_i növekedése C_j növekedését, vagy C_i csökkenése C_j csökkenését eredményezi.
- A w_{ij} élsúly negatív, ha az állapotjellemzőket tekintve, C_i növekedése C_j csökkenését, vagy C_i csökkenése C_j növekedését eredményezi.
- A w_{ij} élsúly zérus, ha nincs a C_i és C_j csúcsok állapotjellemzői között kapcsolat.

A fuzzy kognitív térkép esetén az éles élek helyett alkalmazott fuzzy súlyok magukban hordozzák a rendszer bizonytalan viselkedésének megjelenítését és a kapcsolódó, a rendszer jövőbeli viselkedését előre jelző tanuló algoritmusok alkalmazását.

Az általam létrehozott modellben nincs ilyen.

Ugyanakkor természetesen formailag még közelebb hozható egymáshoz a két különböző problémakörben felírt egyenlet, ha az általam felírt (3) differenciálegyenletet az Euler–féle numerikus integrálást alkalmazó, közelítő módszerrel és $\Delta t = 1$ [sec]-os értékkel átírjuk az alábbi rekurzív formát követő alakra:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \frac{1}{l_i} \cdot \left[\sum_{j=1; (j \neq i)}^n v_{ij} \cdot x_j(t) - \sum_{r=1; (r \neq i)}^n v_{ri} \cdot x_i(t) \right] \quad (6)$$

Formailag tovább közelíthető az FCM II módszerhez a feni összefüggés:

$$x_i(t+1) = \frac{1}{l_i} \cdot \sum_{j=1; (j \neq i)}^n v_{ij} \cdot x_j(t) + \left[1 - \frac{1}{l_i} \cdot \sum_{r=1; (r \neq i)}^n v_{ri} \cdot \right] x_i(t) \quad (7)$$

Ahol:

$$k_1 = \frac{1}{l_i} \text{ és } k_2 = 1 - \frac{1}{l_i} \cdot \sum_{r=1; (r \neq i)}^n v_{ri}$$

Esetemben azonban nincs szigmoid átviteli függvény. A modell belső S és E automatizmus függvényei (ezek láthatók (4) és (5) –ben) amelyek azt biztosítják, hogy az $x_i(t)$ állapot jellemzőknél teljesüljön az alábbi feltétel:

$$\forall x_i - re : 0 \leq x_i \leq 1 (i = 1, 2, \dots, n)$$

2. Bíráloí megjegyzés: *A modellezett rendszer nem zárt, komponenseit a jelölt „belső” és „külső” hálózat közötti „virtuális zárt görbével” választja el, amely azonban nem határolja el a két hálózatrészt dinamikus értelemben. Ebben a dinamikus szétválasztásban látom a modell különös értékét, amely felveti, hogy az 1.2 kapcsán feltett kérdésemben említett fuzzy kognitív térképek esetleg csak általánosított formában lehetnek ekvivalensek az itt bevezetett új modellel.*

Köszönöm Tisztelt bírálóm fenti, nagyon fontos megjegyzését! Igen, valóban beszélhetünk általánosított formában ekvivalenciáról, a bevezetett új modell és a fuzzy kognitív térképekkel kapcsolatban. Ez, az új modellt leíró differenciálegyenlet-rendszer azon speciális eseténél állapítható meg, amikor minden i -ik differenciálegyenletnél az Euler-féle numerikus integrálási módszert alkalmazzuk. Ugyanakkor, ennél a modellenél, az állapotjellemzők és súlyok dinamikusak és a fizikai rendszerből származnak. A fuzzy kognitív térképekhez viszonyítva van még egy további, a kapcsolatokra is vonatkozó eltérés az általam létrehozott univerzális hálózati modellenél. Ennél, a belső és külső hálózat működését egyszerre leíró univerzális hálózati modellenél a csúcsok két, diszjunkt halmazba tartoznak, ezek az x állapotjellemző vektorral jelölt belső és az s állapotjellemző vektorral jelölt külső csúcsok. Ennek a hálózati modellelnek a működését írja le az alábbi mátrix differenciálegyenlet-rendszer:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle L \rangle^{-1} & \\ & \langle P \rangle^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{11}(x, s) & K_{12}(x, s) \\ K_{21}(x, s) & K_{22}(x, s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ s \end{bmatrix} \quad (8)$$

Ahol: $\langle L \rangle$ a belső szektorokat és $\langle P \rangle$ a külső szektorokat tartalmazó diagonális mátrixok, $K_{11} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $K_{12} \in \mathfrak{R}^{n \times m}$, $K_{21} \in \mathfrak{R}^{m \times n}$, $K_{22} \in \mathfrak{R}^{m \times m}$ és $x \in \mathfrak{R}^n$, $s \in \mathfrak{R}^m$.

Ekkor, az FCM II módszerhez formailag közelíthető (6) Globális hálózati modellhez képest változás lép fel. Egyrészt: a belső szektorokra vonatkozó összefüggésnél, mindkét szummánál plusz egy szumma lép fel, a kívülről történő beszállítás és a kifelé történő kiszállítás miatt (9).

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \frac{1}{l_i} \cdot \left[\sum_{j=1; (j \neq i)}^n v_{ij} \cdot x_j(t) + \sum_{q=1}^m v_{iq} \cdot s_q(t) - \left(\sum_{r=1; (r \neq i)}^n v_{ri} \cdot x_i(t) + \sum_{w=1}^m v_{wi} \cdot x_i(t) \right) \right] \quad (9)$$

Másrészt: fellépnek a külső szektorokra vonatkozó összefüggések is hasonlóan négy szummával (10).

$$s_i(t+1) = s_i(t) + \frac{1}{p_i} \cdot \left[\sum_{j=1}^n v_{ij} \cdot x_j(t) + \sum_{q=1; (q \neq i)}^m v_{iq} \cdot s_q(t) - \left(\sum_{r=1}^n v_{ri} \cdot s_i(t) + \sum_{w=1; (w \neq i)}^m v_{wi} \cdot s_i(t) \right) \right] \quad (10)$$

Végül, a (9) egyenlet és hasonlóan a (10) is, átírható az alábbi (11), (12) alakra, az FCM II módszerhez formailag közelítve:

$$x_i(t+1) = \frac{1}{l_i} \cdot \left[\sum_{j=1; (j \neq i)}^n v_{ij} \cdot x_j(t) + \sum_{q=1}^m v_{iq} \cdot s_q(t) \right] + \left[1 - \frac{1}{l_i} \cdot \left(\sum_{r=1; (r \neq i)}^n v_{ri} + \sum_{w=1}^m v_{wi} \right) \right] \cdot x_i(t) \quad (11)$$

Ahol:

$$k_1 = \frac{1}{l_i} \text{ és } k_2 = 1 - \frac{1}{l_i} \cdot \left(\sum_{r=1; (r \neq i)}^n v_{ri} + \sum_{w=1}^m v_{wi} \right)$$

és

$$s_i(t+1) = \frac{1}{p_i} \cdot \left[\sum_{j=1}^n v_{ij} \cdot x_j(t) + \sum_{q=1; (q \neq i)}^m v_{iq} \cdot s_q(t) \right] + \left[1 - \frac{1}{p_i} \cdot \left(\sum_{r=1}^n v_{ri} + \sum_{w=1; (w \neq i)}^m v_{wi} \right) \right] \cdot s_i(t) \quad (12)$$

$$k_1^* = \frac{1}{p_i} \text{ és } k_2^* = 1 - \frac{1}{p_i} \cdot \left(\sum_{r=1}^n v_{ri} + \sum_{w=1; (w \neq i)}^m v_{wi} \right)$$

Mindkét eset, a (11) és (12), egyaránt figyelembe veszi a belső és a külső sebesség súlyokat az első tagoknál és a második tagoknál, a tényezők ön-hatásánál is.

2. Kérdés: *a belső és a komplement külső hálózat határgörbájének dinamikus változtatásával nyerhető modellsalád esetén, milyen mértékben különböznek a modellezett közlekedési hálózatra nyerhető eredmények. Van-e „határérték viselkedési” tendencia?*

A kérdés valóban érdekes és erre a válasz részletesebb vizsgálatokat igényel. Azt tudom ehhez hozzáfűzni, hogy a közúti hálózatok szerkezetére az jellemző, hogy egyes tartományoknál (a városi és az ipari létesítmények tartományai esetén) nagyon sűrű a hálózat, ezek között viszont az ún. összekötőbiztosító tartományokban ritka a hálózat. A hálózat sűrűségét szokták jellemezni az 1 km²-re eső úthosszal, az általam alkalmazott modellezés esetén leegyszerűsítve a szektorok számával. Tovább bonyolítja a kérdést az is, hogy az eltérő sűrűségek mellett, eltérőek a hálózatok komplexitásai is. Ez is sokrétű és összetett fogalom, leegyszerűbben a szektorelemek kapcsolati számával közelíthető meg.

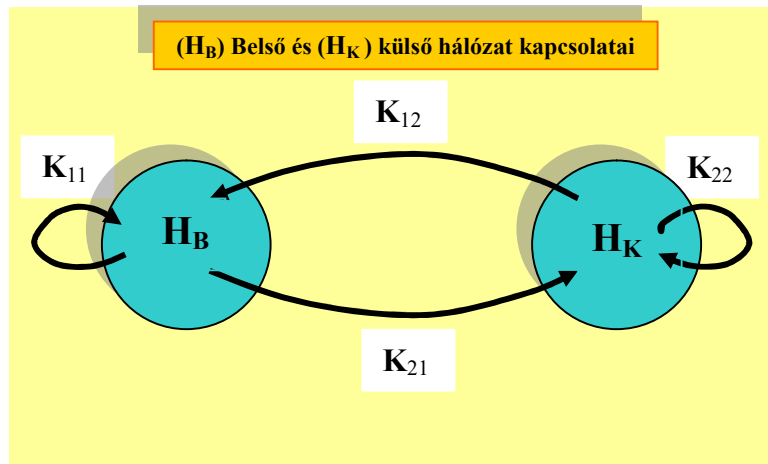
Nagyon köszönöm az érdekes felvetést és kérdést és amennyiben lehetséges a fuzzy kognitív térkép területen folytatni az általam felírt modellel kapcsolatos kutatásokat, örömmel keresem a kapcsolatokat a hazai rangos fuzzy kutatókkal.

3. Megjegyzés: *Az említett négyféle dinamikus átadási kapcsolatot jó lett volna itt, a tézisben tömör, konkrét módon megadni.*

Köszönöm bírálóm megjegyzését! Egyetértek vele, valóban hasznos lett volna a négyféle dinamikus átadási kapcsolatot is beírni és így, egy helyen részletesebb információt nyújtott volna a tézis további megfogalmazásával.

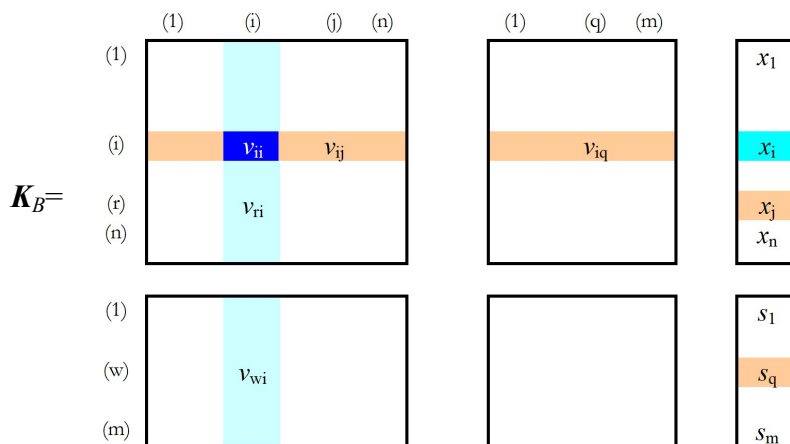
3. Kérdés: Miben különbözik a kapcsolati hipermatrix a négy esetben?

A belső és külső hálózatnak négyféle kapcsolatát szemlélteti az 1. ábra.



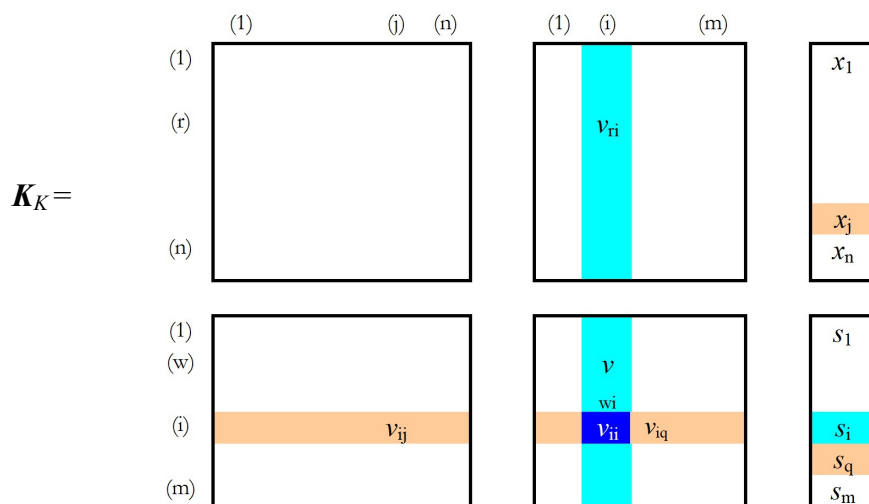
1. ábra: A belső és külső hálózatnak négyféle kapcsolata van

A hipermatrix kapcsolatát tekintve a négy részmatrix az alábbi működő kapcsolatokban különbözik. A 2. ábrát tekintve a belső hálózati folyamatok modellezése esetén működik (felhasználásra kerül) a belső-belső kapcsolatokat leíró K_{11} matrix, a kívülről befelé irányuló kapcsolatokat és az ebből származó folyamatokat meghatározó K_{12} külső-belső matrix, végül a belülről kifelé irányuló kapcsolatokat és ebből származó folyamatokat meghatározó belső-külső K_{21} matrix. (A hipermatrix tetszőleges i -ik belső szektora által meghatározott i -ik sorban, nemzérus v_{ij} sebességekkel reprezentálva láthatók azon szektorelemek - az i -ik kivételével - amelyek erre a szektorra dolgoznak. Az i -ik oszlopban vannak viszont azok a szektorok nemzérus v_{ri} sebességekkel reprezentálva, amelyekre i dolgozik. A főátalóban található v_{ii} sebesség ez utóbbi oszlopban lévő sebességek összegének ellentettje. Végül ezen sor-hipervektor és a jobboldali oszlop-hipervektor skaláris szorzata a magja az i -ik belső szektorra felírható differenciálegyenletnek.)



2. ábra: i -ik belső szektor kapcsolati matrixai

A 3. ábrát tekintve a külső hálózati folyamatok modellezése esetén működik (felhasználásra kerül) a külső-külső kapcsolatokat leíró K_{22} mátrix, a belülről kifelé irányuló kapcsolatokat és az ebből származó folyamatokat meghatározó K_{21} mátrix, végül a kívülről befelé irányuló kapcsolatokat és ebből származó folyamatokat meghatározó K_{12} mátrix. (A hipermátrix tetszőleges i -ik külső szektora által meghatározott i -ik sorban, nemzérus v_{ij} sebességekkel reprezentálva láthatók azon szektorelemek - az i -ik kivételével - amelyek erre a szektorra dolgoznak. Az i -ik külső oszlopban vannak viszont azok a szektorok nemzérus v_{ri} sebességekkel reprezentálva, amelyekre i dolgozik. A főátlóban található v_{ii} , ez utóbbi oszlopban lévő sebességek összegének ellentettje. Végül ezen sor-hipervektor és a jobboldali oszlop-hipervektor skaláris szorzata a magja az i -ik külső szektorra felírható differenciálegyenletnek.)

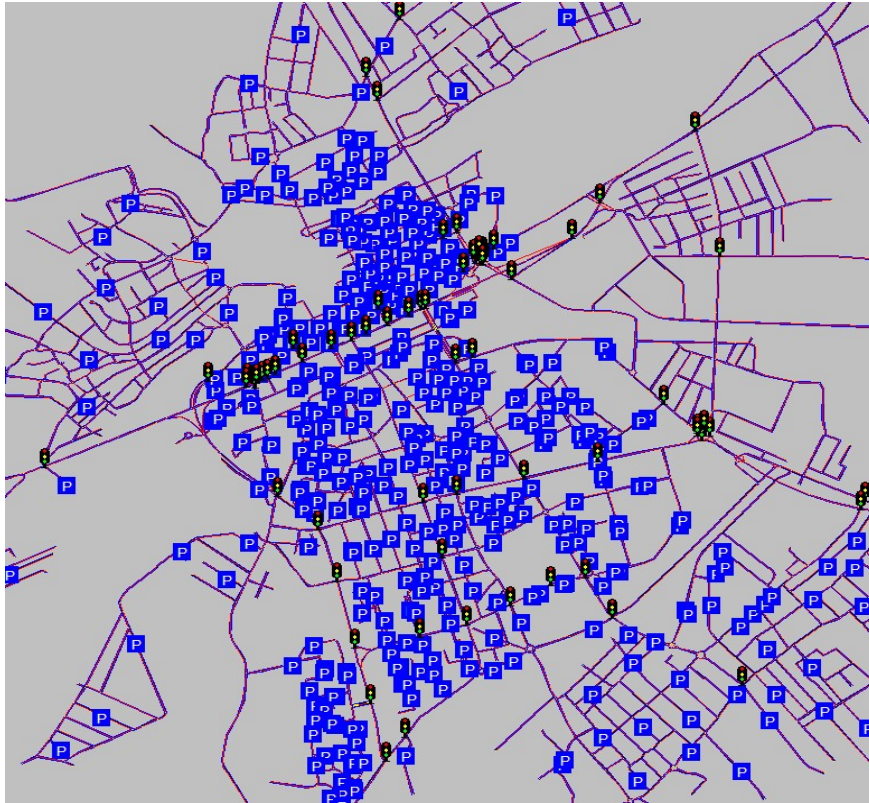


3. ábra: i -ik külső szektor kapcsolati mátrixai

4. Kérdés: A hipermátrixot tartalmazó differenciálegyenlet-rendszer megoldása milyen erőforrás igényű, illetve, végezt-e a Jelölt számítási bonyolultság elemzést?

Az Univerzális hálózati modellre, - amely a földfelszíni hálózatot formálisan figyelembe vevő matematikai modell - természetesen nem végeztem ilyen vizsgálatot, viszont a szűkített hálózati modellre igen, amely a belső tartományt és a hozzá közvetlenül kapcsolódó és a külső tartományban elhelyezkedő input-output szektorokat veszi figyelembe. A számítási bonyolultság elemzése szoftver fejlesztéséhez kapcsolódott.

A számítási sebesség, ill. ennek növelése a gyakorlati alkalmazások szempontjából fontos kérdés volt számomra. Ez a probléma a matematikai modell létrehozását és Maple környezetben történő alkalmazását követően nagyon gyorsan felmerült a kutatásoknál. A szoftver legkorábbi, Delphi környezetben készített verziójában a szimulációs algoritmus teljes mértékben lekövette a matematikai modell számítási algoritmusát. Ez egy nem objektumorientált megoldás volt. Ebben az esetben a hálózatok tárolásától kezdve a kapcsolatok paramétereinek megadásán át, minden művelet a mátrixok és vektorok egy-egy elemének beállításával történt. Ebből adódóan ezzel az alkalmazással már 40 belső szakasz esetén gondok jelentek meg a teljesítményben. Ez az eszköz igen kisméretű modellek létrehozására volt csak elegendő. Ha nem fejlesztjük tovább a szimulációs eszközt, akkor szóba sem jöhetett volna pl. az alábbi 4. ábrán látható győri területen a forgalmi modellezés. Ebben az esetben a közterületeken található parkolók felmérését is elvégeztük. (Itt ráadásul összesen 20 000 jármű befogadására alkalmas 650 parkolót is rögzítettünk a modellünkben.)



4. ábra: A modellezett hálózat parkolókkal és jelzőlámpás csomópontokkal, a szoftver által megjelenített felületen

A hálózatok méretének növekedése során figyeltünk fel arra, hogy a valódi közlekedési hálózatok grájából előállított kapcsolati mátrixok ritka mátrixok. Ennek egyszerű oka az, hogy egy adott sávsektor csak „néhány” kis számú szektorral áll input és output járműátadási kapcsolatban. Egy kellően „nagy hálózat” esetén ez fontos információ. Ekkor az n szektorból álló hálózathoz található egy pozitív K korlát, hogy bármely i -ik szektor C_i input-output kapcsolatainak számára igaz, hogy: $C_i < K$ ($i=1,2,3,\dots,n$). (A K értékét a tesztelésnél 8-nak vettük fel.)

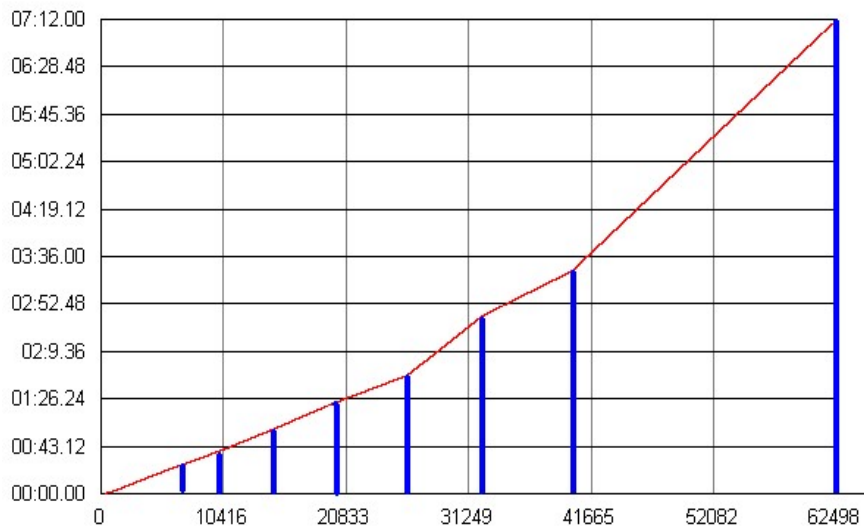
A további szoftveres modellezéseknél a mátrixos adattárolás helyett listás szerkezeteket vezettük be. A szerkezetet mutatókkal támogattuk meg, ezeket a referenciákat pedig arra használtuk, hogy a mátrixon végzett műveleteket matematikailag értelmezhesük az új adatszerkezeten is. Így minden lépést megvalósíthattunk, amelyet a matematikai modell megvalósított. Emellett a szektorszám növekedésével arányos, közel lineárisan növekvő tárigényt valósítottunk meg.

A járműátadás általunk használt modellezése esetén a rendszer olyan szektorokból áll, amelyek csak néhány más szektorral kooperálnak. Ennek megfelelően a közlekedési hálózat a mi modellelemeinkkel lokálisan strukturált rendszert alkot.

Ebből adódóan a megoldás memóriatakarékosabb és az objektum hierarchiából egyébként is rendelkezésre álló szektorlistákat használja fel, amely hatékonyabb működést eredményezett. (Így pl. a ConnectionLaneLane illetve az ObjectPark objektumok olyan elemek, amelyek a szimulációs időszak során járműátadást bonyolítanak le.) Ennek megfelelően egy-egy α_{ij} , β_{ij} , u_{ij} jellemzőt tárol minden ConnectionLaneLane objektum. Emellett a megadott E_i és S_i jellemzőket sem indexelhető vektorokban tároljuk, hanem magában a kapcsolat objektum által forrásként és célként hivatkozott szektor objektumban, hasonlóan a szektorokon számított járműhossz változásokhoz.

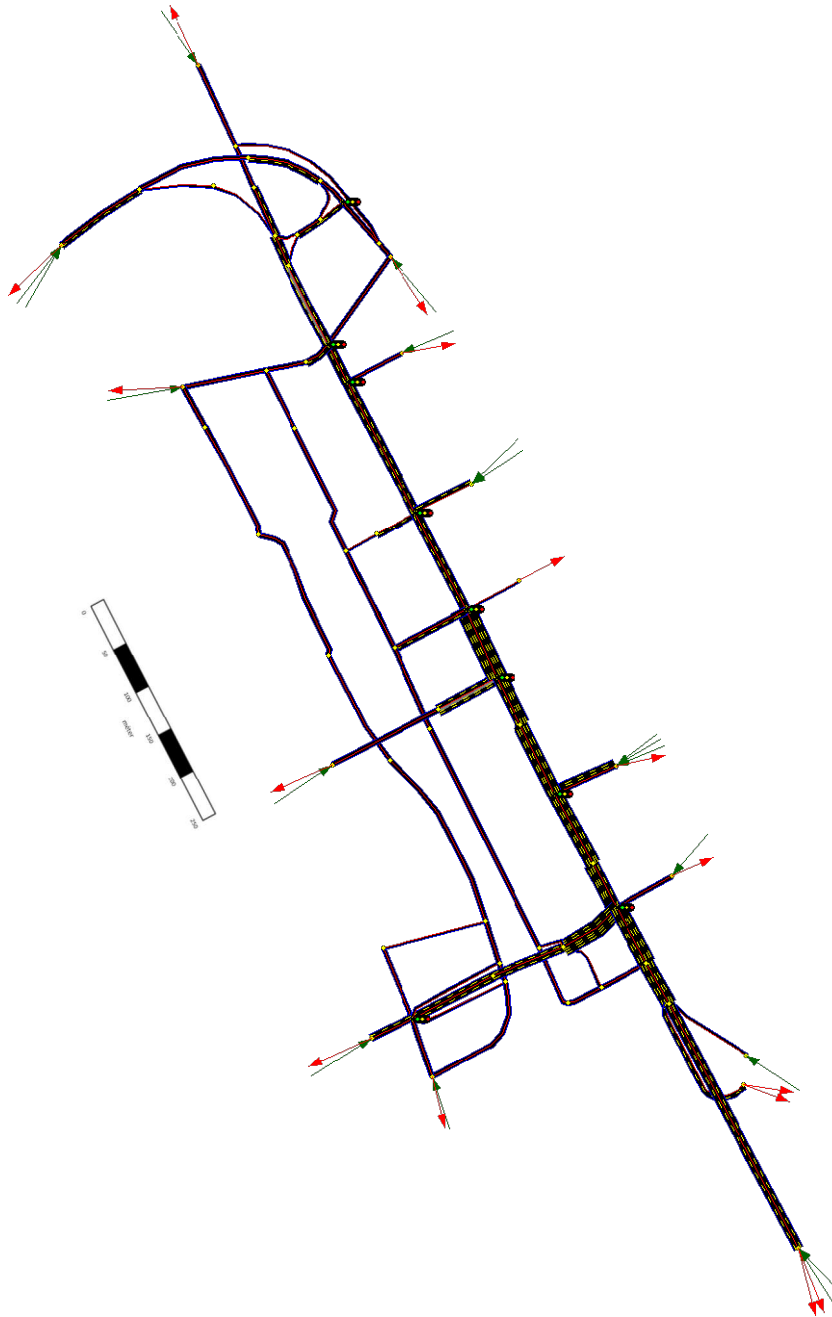
Ki kell emelni, hogy a program fejlesztése Fazekas Sándor PhD hallgatóm munkájának az eredménye, aki a BME mérnökinformatikus szakon kitüntetéssel végzett és a közlekedési modellezéssel kapcsolatban diplomamunkájának témavezetését közösen végeztük Charaf Hassan Professzorral. A program fejlesztésében ugyancsak kiemelkedő munkát végzett Stróbl András hallgatóm is a BME Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Karon.

Automatikusan generált nagyméretű hálózatokon teszteltük az új szimulációs motort, a nagy úthálózatoknál, max. 62500 szektorral rendelkező modellel. Ez utóbbi méretnél kb. 7 óra alatt futott le a modellidő szerinti 24 órás szimuláció. Az 5. ábra egy teszteredményt szemléltet egy akkor átlagos asztali PC-n, (3,4 GHz Intel i5, 4GB 1600 MHz RAM).



5. ábra: Teszteredmények; függőleges tengelyen a futási idő, vízszintesen a szektorok száma

A futásidővel kapcsolatos további információval szolgál Győr belváros – Szent István út és környéke - közlekedési szimulációs modellje, 6. ábra. Ennek a hálózati modellnek a felépítése és jellemző adatai láthatók az alábbiaknál:



6. ábra: A modellezett hálózat törzsét a Szent István út képezte

A hálózatot jellemző fő adatok: 228 db útszektor; 9 jelzőlámpával irányított csomópont; 38 egyéb csomópont; 18 input szakasz; 15 output szakasz. A szimuláció a vizsgált időszakra (7:15 - 8:15) vonatkozóan 6 másodperc alatt futott le. A szimuláció 24h-s időtartamára vonatkozó futási idő 2 perc 14 másodperc volt.

5. Kérdés: *Tervez-e a jelölt Q minősítésű publikációt megjelentetni?*

Tisztelt Bírálóm három helyen teszi fel a fenti kérdést, mindhárom esetben igen a válaszom. Nagyon köszönöm tisztelt bírálóm publikációim Q besorolásra vonatkozó konkrét és fontos kritikai észrevételeit! Különösen azért is, mivel mint a Periodica Polytechnica Transportation

Engineering főszerkesztője, magam is mindent megteszek azért, hogy az egyetemi folyóirat minél magasabb Q besorolásba kerüljön, amely jelenleg egyedüli Q2-es besorolású a BME Periodica Polytechnica szaklapok körében, ezért is nagyon elevenbe vágó volt az, hogy erre a saját publikációs területemen nem fordítottam kellő figyelmet. Tisztelt bírálóm határozottan rámutatott arra, hogy mára már valóban nagyon fontos - a kutatóknak és az intézményeiknek is egyaránt - az eredmények magas minőségű Q1-es szaklapokban történő megjelentetése.

Ezért a disszertációm témakörében kidolgozott új módszertant, a tézis-eredményeket és a kapcsolódó további kutatások eredményeit magas minőségű, Q1-es IF-es szaklapokban is közzé teszem. Ez egyrészt már el is indult és a közlekedéskutatási területen társszerzőimmel meg is jelentettem ilyen szinten anyagokat.

Időközben 2021. november 30-án kaptam külön felkérő levelet is a Sustainability folyóirattól (IF= 3.251, minősítés Q1) a Planning and Development területeken, amelyben vendégszerkesztőnek kérnek fel a „Fenntartható városi mobilitás szabályozási rendszere” témában és ez a folyóirat Q1-es területéhez tartozik. Nyilván a folyóirat megkeresése mögött üzleti megfontolás is húzódik, viszont fontos az, hogy gyorsan jelenik meg, nyílt hozzáférésű, erős IF-es és Q1-es minőségű, ezért a széles körű olvasottsága nagyon gyors érdeklődést és reakciót válthat ki a hazai kutatásaink számára. Ezzel kapcsolatban 2022. év közepéig összeállítok egy igen színvonalas cikkekből álló anyagot a témában. **Az anyagok elméleti területei ölelik fel a disszertációm téziseit, az általam kidolgozott hálózati irányítással kapcsolatos kutatási kérdéseket, valamint a modelltől származtatható új számítási lehetőségeket, honnan-hova mátrix direkt számítására és a kijelölt trajektóriák menti haladásokra vonatkozó modell-számításokat, a hálózati forgalomra vonatkozó környezeti hatásokat. Ehhez tartozik, hogy dolgozunk Zalaegerszeg modern város témában is egy általunk megtervezett fenntartható felszíni közlekedési projektben, amely nemlineáris pozitív rendszert alkalmaz a hálózati modellezésre és a környezeti hatásokat is figyelembe veszi, drónos és felszíni forgalmi mérésekre is építve. A területen kollégáim bevonásával 5-6 színvonalas, Q1-es publikáció leadásával számolunk.**

Hasonlóan az év folyamán, a Springer kiadóhoz kötődő Nonlinear Dynamics, IF: 1.252 Q1 folyóiratban tervezem leadni a nemlineáris közlekedési hálózati modellhez kapcsolódó folyamatok dinamikájának elemzését a környezeti és humán hatásokat is figyelembe véve.

6. Kérdés: *A 2. Tézishez kapcsolódik: a sebesség-sűrűség törvény és az ennek alapján elérhető maximális sebesség, milyen új elemeket hordoz a fizikai megmaradás törvényéhez képest?*

Az említett, alább megfogalmazott eredmény és képlet a két csatlakozó szektor esetére felírt átadási sebesség általánosítása.

A tételben szereplő koherencia elve a többváltozós sebesség-sűrűség törvényre vonatkozik. Azon fontos modellezési elvet mondja ki, hogy az egyes kijelölt szektorokon a mérések alapján meghatározott bázis sebesség-sűrűség törvényeknek kell érvényben maradniuk modellezés során.

Ez kifejtve azt jelenti, hogy a tézisben megadott képletben az i -ik szektornál az f_i magfüggvény rögzített megadott típusú függvény, amelynek értéke természetesen függ a szektor járműsűrűségétől, az e_i környezeti paraméter vektortól és a t időtől is.

Ugyanakkor minden egymáshoz csatlakozó kettő vagy több szektor esetén is összefüggő, koherens egységet kell alkotniuk a sebesség-sűrűség törvényeknek. Ennek a követelménynek megfelelő, a közúti hálózati trajektórián történő mozgás leírására n változós sebesség-sűrűség törvényt adtam meg és kimutattam, hogy a hálózat bármely $n \geq 1$ szektorból álló trajektóriáján a szabad áramlás feltétele esetén az alábbi n változós sebesség-sűrűség törvény érvényes:

$$v(x_1, x_2, \dots, x_n, t) = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{V_i} [1 + f_i(x_i, e_i, t)]}$$

Ahol:

$V_i > 0$ az i -ik szakaszon megengedett maximális sebesség értéke, ($i=1, 2, \dots, n$)

$l_i > 0$ az i -ik szektor hossza

$x_i = x_i(t)$ az i -ik szakaszon t időpillanatban fellépő járműsűrűség értéke

$f_i(x_i, e_i, t)$ i -ik szektorra jellemző valós magfüggvény, amelyre: $f_i(x_i, e_i, t) \geq 0$, $f_i(0, e_i, t) = 0$ és $f_i(x_i, e_i, t)$ a $0 \leq x_i < 1$ intervallumon szigorúan monoton növekvő, x_i és t szerint differenciálható függvény

$e_i \in \mathbb{R}^p$ az i -ik szektorra jellemző környezeti paraméterek vektora

A trajektória teljes befutásánál elérhető maximális sebesség az alábbi:

$$V(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{V_i}}$$

A max. sebesség triviálisan akkor lép fel, ha minden i szektoron a 0-hoz közelítő járműsűrűség esetén az $f_i(0, e_i, t)$ magfüggvény is 0-hoz közelít.

Ebben a tézisben az új elem az, hogy figyelembe veszi a hálózati trajektóriákon történő haladásnál, a szektorokon fellépő változó x_i járműsűrűség állapotjellemzők mellett, az e_i környezeti paramétereket is. Az általa meghatározott sebesség adott t időpontban egy származtatott komplex állapotjellemzőnek tekinthető, amely a hálózati tartomány két különböző A és B pontját összekötő kiválasztott trajektóriát jellemzi. Az n elemű egymáshoz kapcsolódó szektorokból álló trajektória hosszát is figyelembe véve ugyancsak származtatható az adott t időponthoz kapcsolódó várható eljutási idő is. Ennek az az előnye, hogy egy igen gyors módszert határoz meg.

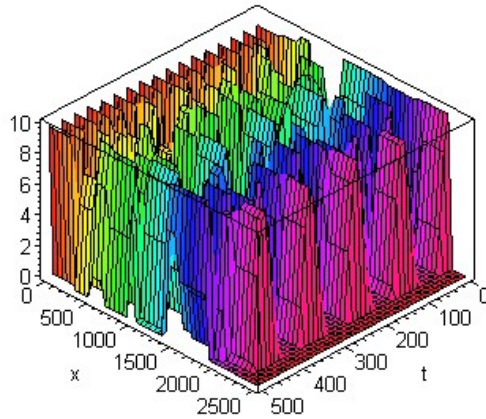
A hálózati modell alkalmas arra is, hogy meghatározzuk az A és B pont közötti $v(t)$ sebesség függvényt, viszont ez egy időigényesebb módszer.

A $v(t)$ sebességprofilja röviden az alábbiak szerint határozható meg.

1.) A hálózati modell alapján a vizsgált hálózati tartomány minden szektorára a megválasztott $[t_0, T]$ időintervallumon számítható a járműsűrűség állapotjellemző és ebből a $v(t)$ haladási sebesség is, a modellben megadott sebesség-sűrűség függvények alapján.

2.) Ezt követően a hálózat tetszőleges „A” kiindulási pontjából elindulva, egy megválasztott trajektória mentén a hálózat másik „B” pontjába megyünk.

3.) Ezt követően létrehozuk az ehhez a trajektóriához tartozó kétváltozós $V(t, X)$ függvényt (felületet) oly módon, hogy az X tengely hossza mentén van a kiegyenesített trajektória és a t tengely mentén van elhelyezve azon időintervallum, amelyben $[t_0, T]$ biztosan benne van, (ennél t_0 az indulási időpont és T a várható érkezési időpont). A V sebesség érték a modellszámítás során a (t, X) ponthoz tartozó sebességérték, ez határozza meg a $V=V(t, X)$ felületet, 7. ábra.



7. ábra: Egy kiegyenesített X trajektóriához és t időponthoz tartozó kétváltozós $V(t, X)$ függvény

A fent meghatározott $V(t, X)$ kétváltozós sebesség függvény ismeretében kiszámíthatjuk az $X(t)$ út-idő függvényt az alábbi integrálegyenletből kiindulva:

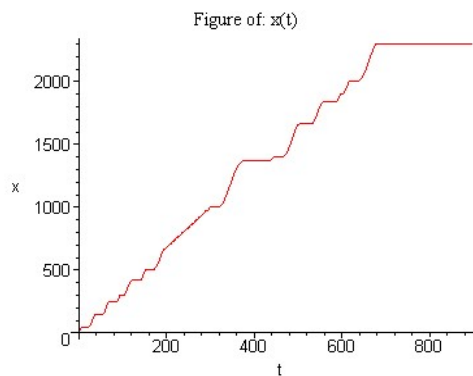
$$X(t) = \int_{t_0}^t V(\tau, X(\tau)) d\tau$$

A feladat az alábbi elsőrendű nemlineáris differenciálegyenlet megoldását igényli az $X(t_0) = X_0$ kezdeti feltétel mellett:

$$\frac{dX(t)}{dt} = V(t, X(t)) - V(t_0, X(t_0))$$

$$X(t_0) = X_0$$

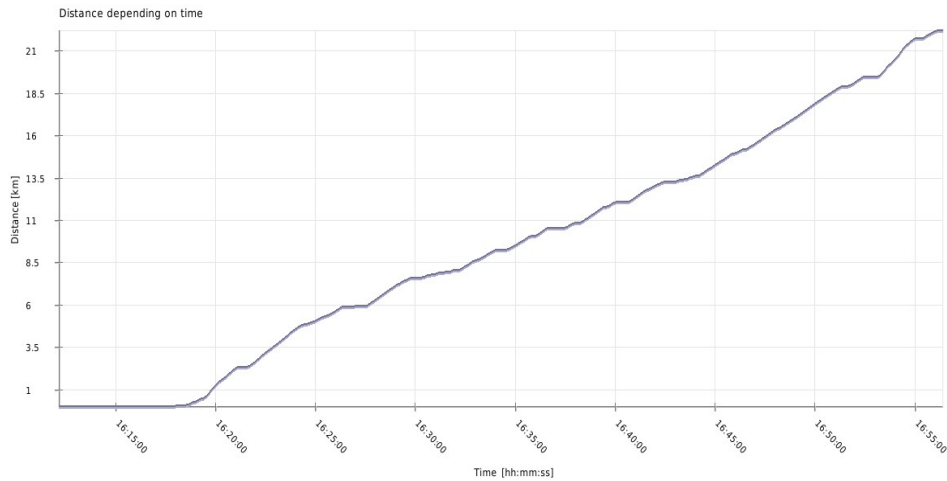
A megoldás a fenti 7. ábrán látható Maple modellből származik és numerikus módszer alkalmazásával áll a rendelkezésünkre.



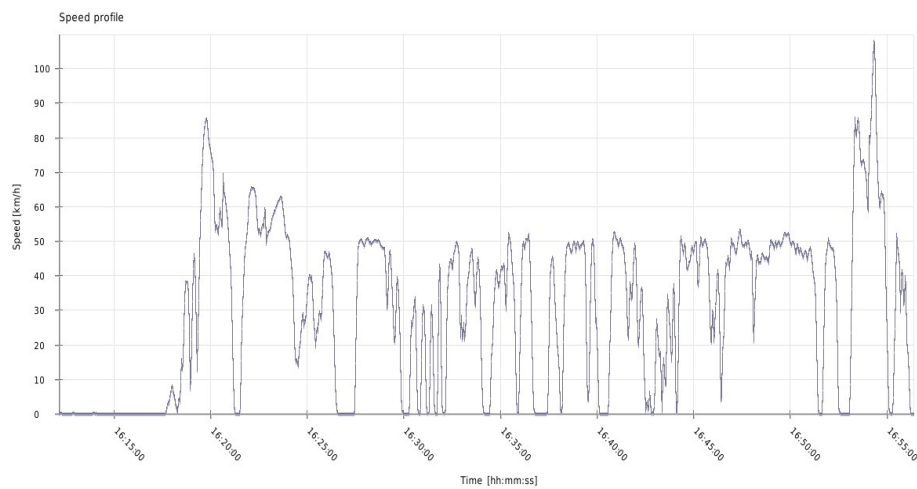
8. ábra: Út-idő diagram

A t_1 célba érési időponttól $X(t)$ már nem növekszik, tehát pl. a célba érési idő $T = t_1 - t_0$.

Alább összetartozó út-idő és sebesség-idő diagramok láthatók, amelyek egy győri közlekedési modellezésből származnak.



9.1 ábra: Út-idő diagram egy győri szimulációs modellezés esetén



9.2 ábra: Sebesség-idő diagram a fenti szimuláció esetén

7. Megállapítás: a 4. Tézishez matematikailag nem tartalmaz lényegesen új elemeket, ám a gyakorlati alkalmazás szempontjából fontos lehet, itt is felmerülhet a számítás bonyolultságának kérdése.

A közlekedésgazdasági, termelési-amortizációs modellel kapcsolatban úgy ítélem meg, hogy ez egy fontos és összetett, a közlekedésgazdaságot is figyelembe vevő modellezési megközelítés. Nem egyszerű szokványos modell, a teljes közúti hálózati forgalmi folyamat összekötése a termelésből a hálózatra áramló járműfolyamattal, valamint az amortizáció következtében a hálózatról kiáramló járműfolyamattal. Ezzel a kiterjesztéssel vizsgálható a hálózati tartományok jövőbeni megfelelősége, a jármű kor-összetételének egyes hálózati részeken végbemenő alakulása és az ezekkel kapcsolatos komplex környezeti hatások is. Ezért tárgyaltam önálló tézisként ezt a modellezési kiterjesztést. Ezen a területen a vizsgálatok eredményei másként fogják érinteni a szegényebb és másként a gazdagabb országokat, továbbá a különböző országoknál szükséges infrastrukturális fejlesztéseket is.

Érdekes új eredmény tehát, hogy egyszerre veszi figyelembe a közúti forgalmi modellt és a termelésből eredő, a forgalomban megjelenő járműáramlatot, valamint a közúti forgalmat elhagyó járműáramlatot és ezekkel kapcsolatban nyújt további kutatási lehetőségeket.

Ennek a modellnek a további kutatása természetesen már egy szélesebb területre történő kiterjesztése a közlekedési modellnek. Érinti a közlekedésgazdaságot, a környezetet, amely időtartományban egy nagyobb léptékű modellhez vezet. Elsősorban nem szoftveres problémának, hanem a komplexitását tekintve közlekedésgazdasági, operációkutatási területen tekintem hasznosnak ezt a modellt, modell koncepciót.

8. Kérdéscsoport: *Az értekezés 8. fejezetében, az alkalmazási példával kapcsolatban hangzott el a három kérdés. 1. Milyen kritériumok figyelembevételével, hogyan történik a minimális fázisszámra való redukció? 2. Az engedélyezett fázisátmenetek tervét milyen forrásból, milyen eljárással lehet meghatározni? 3. A közbenső időmátrix meghatározása hogyan történik, milyen forrásból?*

Itt elsősorban arra utaltam, azt emeltem ki, hogy ha a szimuláció alkalmazásra kerül, akkor bizony figyelembe kell venni még a konkrét előírásokat, biztonságot szolgáló szabályozásokat is. Ezért a 8. Alkalmazás fejezetben azzal a feltételezéssel éltem, hogy a csomópont műszaki-technikai szinten alkalmas a forgalomfüggő irányítási stratégiák megvalósítására. Ez a feltétel azért fontos, mert a csomópontok tervezése egy rendkívüli, biztonságkritikus terület. Ez az érvényes üzemi, műszaki tervezési szabályzat szerint történik, valamint a forgalomirányító jelzőlámpák követelményeiről, tervezési, telepítési és üzemeltetési előírásairól a 41/2003. (VI. 20.) GKM rendelet intézkedik.

<https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0300041.gkm>

A szükséges kritériumokat és az előírt paraméterek betartását ma már modern **tervező programok alkalmazásával végzik el** (pl., a LISA+ segítségével). További, szoftverekkel kapcsolatos információk találhatóak itt: <http://kjit.bme.hu/index.php/hu/labor/szoftverek>

Maga a tervezés a szükséges adatok begyűjtésével és az igények felmérésével kezdődik az új, valamint a meglévő csomópont áttervezése esetén is.

Három fő terület érint:

1. A forgalmi adatok elemzése
2. A forgalomszabályzással kapcsolatos konkrét műszaki vizsgálatokkal a hálózaton és a csomóponton
3. Valamint a speciális alkalmazásokkal kapcsolatban, így pl. a közösségi közlekedés prioritásának vizsgálatával is

Az adatok begyűjtése és feldolgozása után következik a fázisok (az egyidejűleg megengedett csomóponti mozgások) definiálása. A lehetséges irányok nagymértékben függenek a:

1. csomópont kialakításától és a
2. geometriájától.

A tervezés során ekkor dől el, hogy a csomópontban milyen irányú forgalom lesz engedélyezve. Ezután következik a tényleges szoftveres tervezés.

A fázisba sorolás végrehajtásakor a helyi speciális környezeti adottságok mellett az alábbi fontos **kritériumokra** kell tekintettel lennie az alkalmazott algoritmusnak:

1. a minél kisebb fázisszámra való törekedés, valamint
2. az egy fázisba való lehető legtöbb irány bevonása.

A fázisok meghatározása után a **fázisátmenet terve, kialakítása** következik, tehát annak az eldöntése, hogy a korábban definiált fázisok milyen sorrendben kövessék egymást. Kettőnél több fázis esetén a fázisok lefutásának többféle sorrendje adódik egy csomópontban.

Az egyes fázisok közti átmenet kapcsán kerül meghatározásra az úgynevezett **közbenső idő mátrix**, amely az egymást keresztező, vagy nyomvonal szempontjából kapcsolódó (fonódó) mozgások **szabad jelzései között biztosítandó legkisebb biztonsági időt**, az úgynevezett közbenső időt tartalmazza.

(Adatforrások: helyszínrajz, várható átbocsátott járműhosszak, ki és behajtási sebességek, empirikus biztonsági időértékek, geometriai jellemzők)

9. Megállapítás *A következőkben Jelölt olyan modellt javasol, amelyben a kereszteződések gráfcúscsként, az összekötő útszakaszokat gráfélenként reprezentálja*

9. Kérdés *Hogyan illeszkedik ez a modell mégis a tézisekben megfogalmazott újszerű modellreprezentációjához?*

Ezzel a kérdéssel kapcsolatban külön is köszönöm azt, hogy Tisztelt Bírálóm felhívta a figyelmet erre a valóban létező kettősségre!

A disszertációm 81. oldalán ezt a következő módon próbáltam tisztázni „A modellel kapcsolatos megjegyzések és alapösszefüggések” bekezdés alatt: „Az irodalomból ismert közúti közlekedési hálózati modellek a csomópontokat, illetve kereszteződéseket kitüntetett elemként kezelik. Ez olyan gráfot eredményez, amely hűségesen leutánozza a térképet, a gráf csúcsai a csomópontok, illetve kereszteződések, az ívek pedig az őket összekötő útszakaszok.

A modellezés területén ettől eltérve, az ismertett új szemléletmódra és eredményekre támaszkodunk ebben az esetben is. A hálózati modellünk egyszerre vizsgálja az egész hálózatot a teljes kapcsolatrendszer mellett. Ebben önálló elemként már nem jelenik meg a „csomópont”, ugyanis minden csomópont és annak működése része a teljes hálózatnak és a kapcsolatrendszerének. A probléma általános megoldására alkalmazott matematikai modell a korábban ismertett, n db. belső szakaszból és m db. külső szakaszból álló dinamikus kapcsolati struktúrát definiálja. Esetünkben a szűkített hálózati modellünk, a csomópont, egy zárt görbével körülhatárolt tartományában helyezkedik el. A (H_B) belső hálózaton kialakuló $0 \leq x_i(t) \leq 1$ normált járműsűrűségek **a csomópont-rendszer állapotjellemzői:**

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_n(t)]^T$$

A modell a (H_K) külső hálózat azon részhálózatát is használja, amely olyan m db szakaszból áll, amelyeknek közvetlen input-output kapcsolatuk van valamely belső szakasszal. Az ezeken kialakuló $0 \leq s_i(t) \leq 1$ normált járműsűrűségeket jelöli:

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_m(t)]^T$$

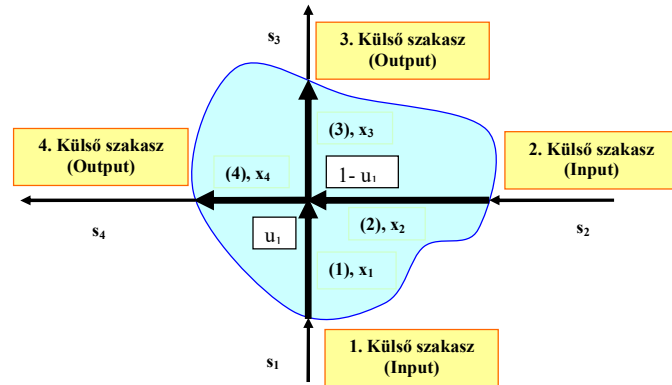
Ez utóbbiakat a vizsgált időtartományon valós időben végzett **mérések alapján ismerjük ...**” Tehát valóban fellép a kettősség, amikor a modell konkrét alkalmazását vizsgáljuk és ekkor elkerülhetetlen a hagyományos fogalmak használata is, pl., „*Ha a csomópontok optimális működtetését tekintjük a hálózatban, ...*”

Ennél valóban, a klasszikus forgalmi értelemben, a fizikai csomópontokra történt az új hálózati modell alkalmazása.

10. Megállapítás *Az értekezés állítása szerint a modell alapján 45-50 % -os növekedési eredmény érhető el az optimális működéssel*

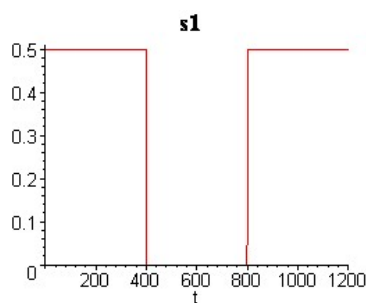
10. Kérdés *mi a jelzett növekedés viszonyítási alapja?*

Annyiban pontosítom az eredményt és a kérdést, hogy az optimális irányítás nagy előnye akkor jelentkezik, amikor az egyes irányokban tartósan jelentős járműsűrűség különbségek lépnek fel, ilyenkor akár 45-50 %-os többlet is fellelhető a kereszteződésen áthaladó járműszám esetén a hagyományos, fix programmal működő kereszteződéssel szemben. A kérdés az alábbi ábrához tartozik, amelyhez két teszteredményt helyeztem el a disszertációmban.

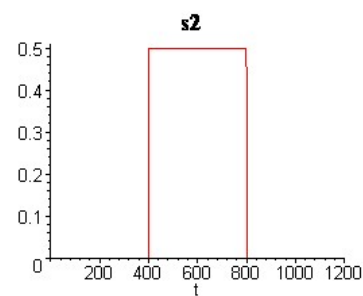


10. ábra: 1. Modell, két egyirányú út egyszerű lámpás kereszteződése

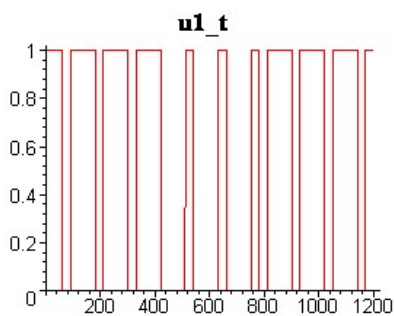
(I.) Esetben az 1. és 2. bemeneteken időben eltérő $s_1(t)$ és $s_2(t)$ input járműsűrűségek lépnek fel (11. és 12. ábra), a kimeneteken pedig időben állandó $s_3 = s_4 = 0.5$ output járműsűrűségek vannak.



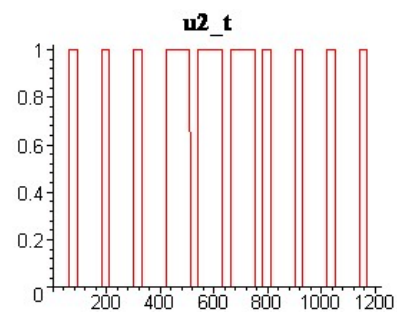
11. ábra: s_1 input sűrűség



12. ábra: s_2 input sűrűség

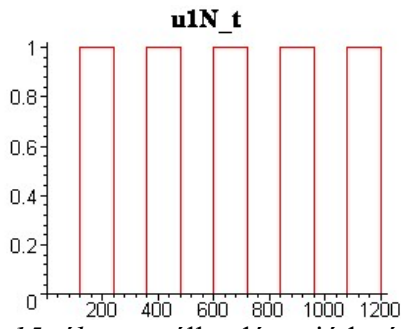


13. ábra: optimális u_1

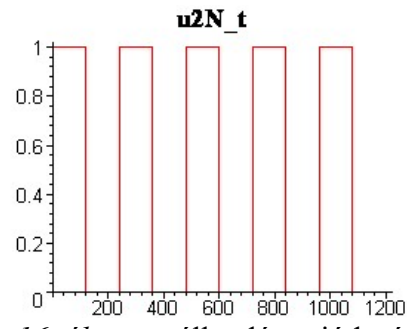


14. ábra: az optimális $u_2 = 1 - u_1$

A 13. és 14. ábra szemlélteti, hogy az irányítás nagyobb átbecsátási időkeresztmetszetet biztosított azon időintervallumokon, amelyeken nagyobb input sűrűségek léptek fel.

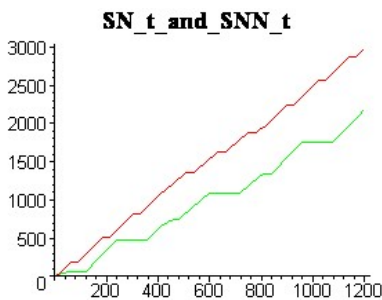


15. ábra: u_1 állandó periódusú

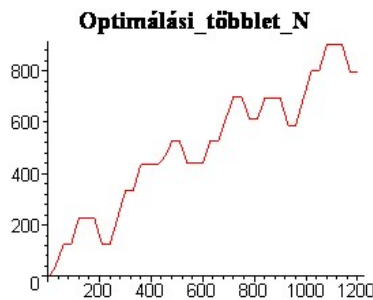


16. ábra: u_2 állandó periódusú

A 15. és 16. ábra az állandó periódusú forgalomirányítás szemlélteti



17. ábra: Összes átdott járműszám optimális és 120 sec-os zöld u_1 -nél



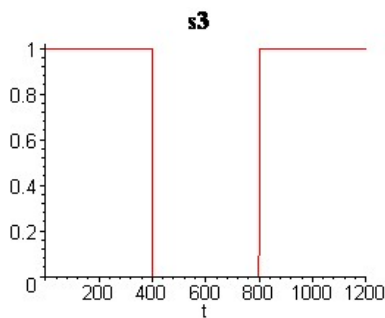
18. ábra: Összes optimális többlet alakulása



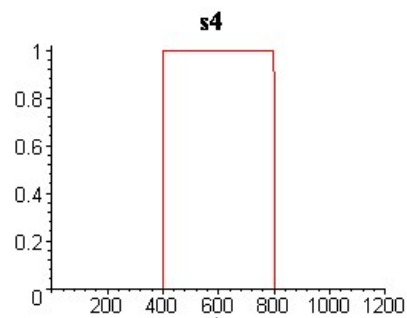
19. ábra: %-os többlet az optimális esetben

A 17. ábrán a felső görbe az optimális irányítás által átdott folyamatosan növekvő járműszámot, az alsó görbe pedig a normál periodikus irányítás mellett folyamatosan növekvő járműszámot szemlélteti. A 18. ábra a kettő különbségének – az optimalizálás által elért többlet átdadásnak – időbeni alakulását szemlélteti. A 19. ábra azt szemlélteti, hogy az egyes t időpontokban a többlet hány százaléka a normál periodikus irányítással átdott járműszámnak.

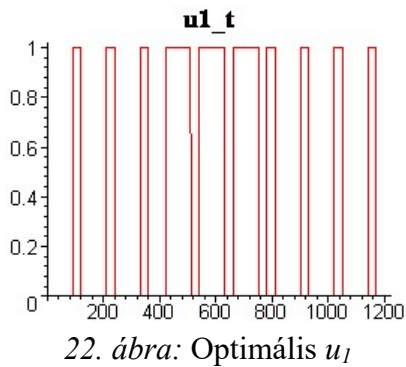
(II.) Esetben az s_3 outputsűrűségénél fellépő maximumok időtartományai térnek el az s_4 outputsűrűség maximumainak időtartományaitól és a fellépő maximumoknál torlódások lépnek fel a kereszteződés mögött (20. és 21. ábra) Ebben az esetben az inputok sűrűségeire az vonatkozott, hogy mindkét bemeneten egyformák és állandók: $s_1=s_2=0,5$.



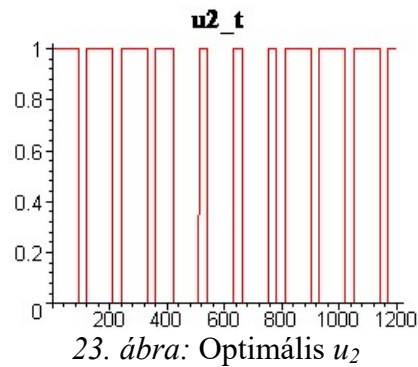
20. ábra: s_3 output sűrűség



21. ábra: s_4 output sűrűség



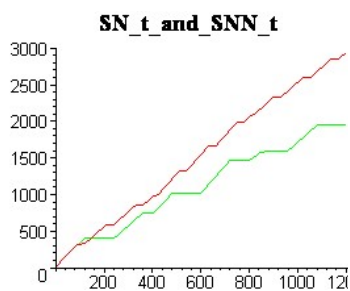
22. ábra: Optimális u_1



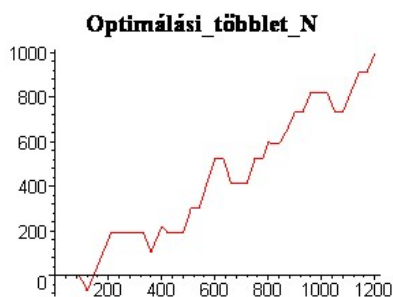
23. ábra: Optimális u_2

Az összehasonlítás ebben az esetben is a 15. és 16. ábrán látható periodikus forgalomirányítási módozatnál elért eredménnyel történt.

Az optimális forgalomirányítással elérhető százalékos többlet kiszámítása azonos az előbbivel.



24. ábra: Összes átadott járműszám optimális és 120 sec-os zöld u_1 -nél



25. ábra: Összes optimális többlet alakulása



26. ábra: %-os többlet az optimális esetben

Az optimális forgalomirányítás előnyei tehát akkor is jelentkeznek (24.,..., 26. ábrák), amikor az egyes irányokban „a kereszteződés mögött”, vagyis az outputoknál lépnek fel torlódások, ill. jelentős járműsűrűség értékek. Megállapítható, hogy ebben az esetben is megvalósulhat akár 45-50 %-os többlettartás a kereszteződésen áthaladó járműszám esetén az optimális irányítással a hagyományos, fix programmal működő forgalomirányításhoz képest.

11. Kérdés A nyolcadik fejezethez: kiterjeszhető-e az itt bemutatott modellalkalmazás nagyszámú kereszteződésekből álló általános topológiájú úthálózatra? Figyelembe véve a közös irányítási algoritmust, milyen korlátok léphetnek fel a valós idejű irányításban a bonyolultság növekedésével?

A forgalomirányításban két jól működő fő irányzatot különböztetnek meg a szakirodalomban, az egyik, amely a német rendszer alapja, a nagy forgalmú gerincútvonalakon a zöldhullámok biztosítása, a másik koncepció az általam alkalmazott területre közelebb áll, az angolszász rendszer, amelynek célja közlekedési optimum elérése hálózati szinten (általában a várakozási idő megtakarítása, közösségi járművek, egyéni közlekedési járművek esetén). Mindenképpen szükséges ezekhez a hálózati modell alkalmazása.

Az én modellezési technikám alapján még további két koncepciót tudok a fentiek mellett említeni. Az egyik (1) a tartományszintű intelligens irányítás bevezetése, amely a teljes hálózaton modell prediktív módszerrel előre számolja a járműsűrűségeket. Ez alapján folyamatosan és rugalmasan definiálja azoknak a tartományoknak a határgörbéit, amelyekben már várható a járműsűrűség növekedése. Itt input-output peremirányítást alkalmazva szinten tartja, ill. előzi meg és mérsékli a torlódásokat. Természetesen fontos feltétel a megfelelő kapacitású modern úthálózat, a modern infrastruktúra és akár a változtatható forgalmi irányok

alkalmazása is. A módszer jól kombinálható, vagy helyettesíthető is a peremeken végzett valós idejű méréseket alkalmazó intelligens irányítás megvalósításával is. (2) Ha a csomópontok optimális működtetését tekintjük a hálózatban, annak a csomópontnak a működése az ideális, amely bármely rajta átáramló forgalmat akadályoztatás nélkül enged át. Mivel minden keresztező forgalom akadályozza a másikat, az ideális eset csak oly módon valósul meg, ha minden keresztező forgalom szintben eltoltan működik. Ez az intelligens csomópontoknál azon általános követelmény megvalósítását jelenti, hogy minden csomópont minimális akadályoztatással bocsátsa át a rajta átáramló forgalmat. Tehát az irányítás adaptív legyen és ily módon a csomópontok irányítása forgalom- és környezetfüggő valós idejű irányítás legyen.

11. Megállapítás *A 9. fejezet trajektórián történő mozgás optimalizálását bemutató alkalmazást tartalmaz. Az optimalizálás variáció számításal valósul meg, a jelölt egy korábbi publikációjában ismertetett módon.*

11. Kérdés: *mennyiben újszerű, amennyiben új, miért nem került tézisbeli megfogalmazásba? Hogyan kapcsolódik ez a modell a tézisben szereplő modellhez?*

A légi és vízi közlekedés esetén jól alkalmazhatók a variációszámítási módszerek, pl. az extrémális célba érési időt biztosító trajektóriák meghatározásánál. A közúti hálózati trajektóriákhoz is kapcsolódhatnak ilyen jellegű vizsgálatok, elsősorban a mikroszkopikus modellezések esetén, pl., extrémális célba érési idő, energiafogyasztási kritériumok stb.

Esetemben az az újszerű, hogy makroszkopikus modellezést alkalmazva, a körülhatárolt tartományban a tézisben szereplő hálózati modell belső kapcsolati mátrixának speciális alkalmazásával, meghatározható a hálózat tetszőleges A és B pontjai közötti összes útvonal-trajektória. A modell ezen alkalmazásával viszont egyszerűen látható, hogy a probléma véges számú trajektória vizsgálatára vezet és ily módon a variációszámítási feladatot egyszerű optimalizálási problémára vezethetjük vissza.

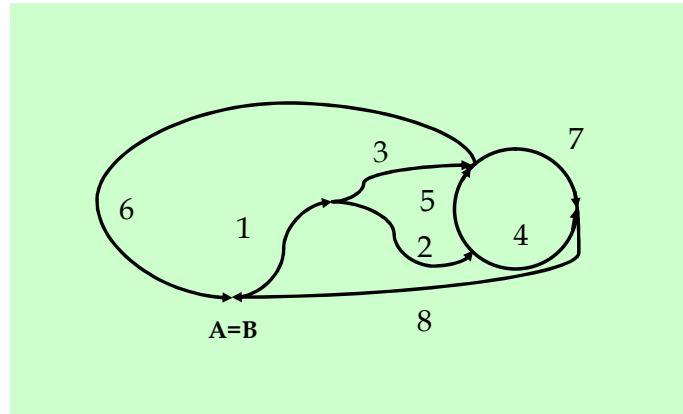
Esetünkben a hálózati pontoknál az $A \equiv B$ is megengedett, valamint a trajektóriához, a célba érési idő hozzárendelésén kívül, a trajektóriához hozzárendelhető a jármű által a célba érésig felhasznált energia, vagy tesztpálya esetén a szektorokból összeállított trajektória tesztelési értéke is, amelyet az egyes szektorokon elvégzett manőverek összetettsége és nehézsége határoz meg. (A ZalaZone pálya esetén ennek célja lehet pl. az ideális tesztprogramok összeállításának elősegítése, amely a megfelelő súlyok alkalmazásával figyelembe veszi a valós pályageometriát és a kialakított SmartCity pályarészt is.)

Egyszerű példaként tekintsük a 27. ábrán bemutatott mintapályát, amelynél a szektorelemek irányított görbedarabok. Ennek megfelelően kialakíthatók a különböző, zárt görbéjű véges pályaszektorokból álló trajektóriák is a tesztelések céljára és ezzel vizsgálhatók az értékelési módszerek is. Ennek az a célja, hogy meghatározhatók legyenek a tesztelők szempontjainak legjobban megfelelő, legértékesebb pálya trajektóriák.

Az útvonal trajektóriák meghatározásához a hálózati modell K_{11} kapcsolati mátrixából képezzük a P mátrixot (1), amely a kapcsolati mátrix főátlón kívüli elemeinél csak a:

$$0 < \alpha_{i,j} \leq 1$$

disztribúciós paramétereket tartja meg, (amely a $j \rightarrow i$ -re vonatkozó áramlási arányt jelenti). A K_{11} főátlójában szereplő nemzérus elemeket töröljük és ezek helyére is zérust írunk. (Ezáltal az oszlopokat tekintve egy Diszkrét Markov lánchoz kapcsolódó Markov mátrixot határoztunk meg.) Az alkalmazott eljárásnál figyelembe kell venni az A kezdeti szektor sorszámát is, amely 1 ezen modellenél (27. ábra).



27. ábra: Az 1. – 8., irányított rész-pályagörbékből kialakított trajektória halmaz

Ezt az értéket veszi fel a főátlóban lévő (j,j) index és erre a helyre írjuk be az 1 értéket. Az így felépített mátrixot jelöltük \mathbf{P} -vel (13).

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{2,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{3,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{4,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{5,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{6,3} & 0 & \alpha_{6,5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{7,3} & 0 & \alpha_{7,5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_{8,4} & 0 & 0 & \alpha_{8,7} & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{P1} = \begin{bmatrix} p \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

A $\mathbf{P1}$ indulási járműmennyiség vektornál (14) ugyancsak a $j=1$ koordinátánál az inputnak tekintett 1-es szektoron nemzérus p járműmennyiséget állítunk be, a többi szektoron pedig (így a $\mathbf{P1}$ többi koordinátájánál is) 0 értéket vesznek fel a járműmennyiség állapotjellemzők. Ezt a kiindulási állapotot határozza meg a $\mathbf{P1}$ vektor:

Ezt követően az átadási folyamatot figyelembe véve lépésenként határozzuk meg a továbbhaladási útvonalakat, tehát az útvonalak fejlődését.

Ily módon, rendre számítjuk a továbbhaladás során a szektorokon a járműmennyiséget (a járműmennyiségek szétosztását), amelyet a következő vektorsorozat határoz meg: $p_2 = P \cdot p_1$, $p_3 = P \cdot p_2$, ..., $p_n = P \cdot p_{n-1}$.

Ezeknek a számításoknak az eredményei láthatók az alábbiakban a 27. ábrán látható modell esetében.

$$\begin{array}{c}
\begin{array}{c} p \\ \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{3,1} p \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \\
P2 =
\end{array}
\quad
\begin{array}{c}
\begin{array}{c} p \\ \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{3,1} p \\ \alpha_{4,2} \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{5,2} \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{6,3} \alpha_{3,1} p \\ \alpha_{7,3} \alpha_{3,1} p \\ \alpha_{8,4} \alpha_{4,2} \alpha_{2,1} p \\ 0 \end{array} \\
P3 =
\end{array}
\quad
\begin{array}{c}
\begin{array}{c} p \\ \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{3,1} p \\ \alpha_{4,2} \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{5,2} \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{6,3} \alpha_{3,1} p + \alpha_{6,5} \alpha_{5,2} \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{7,3} \alpha_{3,1} p + \alpha_{7,5} \alpha_{5,2} \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{8,4} \alpha_{4,2} \alpha_{2,1} p + \alpha_{8,7} \alpha_{7,3} \alpha_{3,1} p \end{array} \\
P4 =
\end{array}
\end{array}$$

$$\begin{array}{c}
\begin{array}{c} p \\ \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{3,1} p \\ \alpha_{4,2} \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{5,2} \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{6,3} \alpha_{3,1} p + \alpha_{6,5} \alpha_{5,2} \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{7,3} \alpha_{3,1} p + \alpha_{7,5} \alpha_{5,2} \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{8,4} \alpha_{4,2} \alpha_{2,1} p + \alpha_{8,7} (\alpha_{7,3} \alpha_{3,1} p + \alpha_{7,5} \alpha_{5,2} \alpha_{2,1} p) \end{array} \\
P5 =
\end{array}
\quad
\begin{array}{c}
\begin{array}{c} p \\ \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{3,1} p \\ \alpha_{4,2} \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{5,2} \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{6,3} \alpha_{3,1} p + \alpha_{6,5} \alpha_{5,2} \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{7,3} \alpha_{3,1} p + \alpha_{7,5} \alpha_{5,2} \alpha_{2,1} p \\ \alpha_{8,4} \alpha_{4,2} \alpha_{2,1} p + \alpha_{8,7} (\alpha_{7,3} \alpha_{3,1} p + \alpha_{7,5} \alpha_{5,2} \alpha_{2,1} p) \end{array} \\
P6 =
\end{array}
\end{array}$$

A számítás során az 5. transzformációs lépés után (már megtörtént az összes lehetséges átadási útvonal meghatározása) már nem változik a P_j járműmennyiség vektor. Ez abból következik, hogy az alkalmazott disztribúciós mátrix oly módon lett felírva, hogy a 6-os és a 8-as vég-szektorok már nem adnak tovább járművet egyetlen más szektorra sem.

Az utolsó, 5-ik lépést követően az oszlopvektorból már kiolvashatóak az útvonalak az alábbi speciális karakterlánc analízissel.

Az 1. inputból kiinduló összes útvonalat az határozza meg, hogy hány útvonal vezet külön-külön a vég-szektorokhoz, esetünkben az 1-től a 6. outputhoz és az 1-től a 8. outputhoz.

Az 1-től a 6. outputhoz vezető útvonalak a **P5** vektor 6. koordinátájából olvashatók ki. Ennél két összeget látunk, amely azt jelenti, hogy 6-hoz két párhuzamos útvonalon jutottunk el.

Ezeket az útvonalakat az egymás után következő szektorszámok határozzák meg az $\alpha_{i,j}$ disztribúciók második indexeinek jobbról balra történő kiolvasásával:

1-ből a 6-ra vezető útvonalak:

$$P5[6] = \alpha_{6,3} \alpha_{3,1} p + \alpha_{6,5} \alpha_{5,2} \alpha_{2,1} p \quad (15)$$

I. Az első út: 1-ről 3-ra és 3-ról 6-ra vezet

II. A második út: 1-ről 2-re, majd 2 -ről 5-re, végül 5-ről 6-ra vezet

Az 1-ből a 8-ra vezető útvonalakat az előbbihez hasonlóan, a **P5** vektor 8. koordinátája mutatja meg. Ennél 3 tagból álló összeget látunk, tehát 3 eltérő, párhuzamos úton juthatunk el 1-ből 8-hoz.

$$P5[8] = \alpha_{8,4}\alpha_{4,2}\alpha_{2,1}p + \alpha_{8,7}(\alpha_{7,3}\alpha_{3,1}p + \alpha_{7,5}\alpha_{5,2}\alpha_{2,1}p) \quad (16)$$

III. Az első út: 1-ből 2-re, majd 2-ről 4-re végül, 4-ről 8-ra vezet

IV. A második út: 1-ről 3-ra, 3-ról 7-re és 7-ről 8-ra vezet

V. A harmadik út: 1-ről 2-re, 2-ről 5-re, 5-ről 7-re, végül 7-ről 8-ra vezet

A szétosztott járműarány: $\frac{P5[6]}{P5[8]}$ és az összes jármű mennyiség: $P5[6] + P5[8] = p$

Összefoglalva: A Computer-algebrai módszerrel előállított (3) és (4) képletek paraméteres matematikai formulák. A nagyobb méretű feladatoknál az útvonalkódok meghatározására vonatkozó kiértékelések stringek és karakterláncok feldolgozásával történnek és az egymás utáni két azonos indexeket csak egyszer vesszük figyelembe. Az így meghatározott számsorozat az útvonalat alkotó, egymást követő és egymáshoz csatlakozó szektorelemek sorszámából adódik.

Esetünkben összesen 5 db különböző útvonal vezet 1-ről vissza az 1-re úgy, hogy az egy-egy útvonalon található szektorok mindegyike csak egyszer kerül felhasználásra.

Az algoritmus alapkonceptiója az, hogy minden korábbi szétválás végig pontos nyomot hagyjon a továbbiakban azoknál az útvonalaknál, amelyek a szétválásból származtak. Tehát a jól azonosítható $0 < \alpha_{i,j}$ disztribúciók, **mint markerek** határozzák meg minden egyes útvonal kialakulását.

Több (A_1, A_2, \dots, A_n) input esetében a módszer alkalmazásával meghatározhatók a tartományon történő áthaladási útvonalak, amelyek közvetlen output kapcsolatokkal rendelkező (B_1, B_2, \dots, B_m) szakaszoknál végződnek. Ezáltal a módszer direkt matematikai eljárást is szolgáltat az O-D, honnan-hova probléma megoldására is.

Mivel ezt alkalmazásnak tekintetem, ezért nem került tézisbeli megfogalmazásba ez a módszer.

12. Megállapítás Irodalomjegyzékkel kapcsolatban

2010 utáni megjelent tételek között csekély számú található.

Tisztelt bírálóm hivatkozásokkal kapcsolatos észrevételét, hogy nagyrészt 2010-ig történtek az irodalmi hivatkozások elfogadom, valóban tehettem volna több hivatkozást a későbbi időszakban megjelent anyagokra is.

Ez egyrészt azzal magyarázható, hogy a szakirodalom elemzése során megállapítható volt a kutató területén, hogy már 2000-2010 között lejajlottak azok a jelentős változások a modellezés, a számítások és a szimuláció területén, amelyek megfelelő alapot nyújtottak a kutatásaimhoz.

Másrészt az én kutatásaimmal kapcsolatban is körvonalazódott és kialakult 2006-2010 között az a terület, amelynek további vizsgálatát a közlekedés-modellezés fejlesztése szempontjából fontosnak tartottam. Ezen a területen a kutatásaimra Markos Papageorgiou eredményei voltak a legnagyobb hatással.

Ezzel együtt természetesen figyelemmel kísértem a különböző helyeken megjelent új eredményeket is. Azokat, amelyek valamilyen új információt nyújtottak a kutatásaimhoz. Ilyen volt pl., *Arneson and Langbort (2009): Heather Arneson, Cédric Langbort, Linear Programming Based Routing Design for a Class of Positive Systems with integral and Capacity Constraints. Proceedings of the 1st IFAC Workshop on Estimation and Control of Networked Systems, Venice, Italy, September 24-26, 2009.* légi hálózati modellt alkalmazó

pozitív rendszer osztályba tartozó konferencia cikke is, amelyre Bokor József Professor úr hívta fel a figyelmemet. Ezt áttanulmányozva megállapítható volt, hogy a modell konstans sebességet alkalmazó, egyszerű szerkezetű, lineáris homogén differenciálegyenlet-rendszert alkalmaz. Ezt a munkát is természetesen meghivatkoztam a disszertációban.

Ugyanakkor a konferencia cikk hasznos volt arra is, hogy megvizsgáljam az általam kidolgozott modell légiforgalmi hálózati modellekre vonatkozó további fejlesztésének lehetőségét is. Az eredményt a *Periodica Polytechnica, Transportation Engineering*-ben publikáltuk.

Péter, T., Szabó, K. A new network model for the analysis of air traffic networks. Periodica Polytechnica, Transportation Engineering. 40, 1(2012), pp. 39-44. DOI: 10.3311/pp.tr.2012-1.07

Nagy örömmre a cikk 2016. évben bekerült a Markos Papageorgiou ajánlásával kiadott: Dusan Teodorovic, Routledge Handbook of Transportation, ISBN: 978-1-138-7982-12 (hbk) Publisher: New York and London. Routledge, Taylor & Francis Group, 2016; 18. The ATC (Air Traffic Control) system / Milan Janic DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY4. Modeling the Operational Performances of the ATC System 484 page.

Közlekedési Kézikönyv Légiforgalmi irányítási rendszer fejezetében az irodalmi hivatkozások közé.

Összefoglalva: megköszönöm Dr. Kóczy László Tamás egyetemi tanár, MTA Doktora nagyon részletes bírálatát, az értékes megjegyzéseit és kérdéseit, amelyeket igen hasznosnak tartok! A kérdések több vonatkozásban is rámutatnak a téma bonyolultságára és a további kutatások fontosságára is.

Megköszönöm a doktori értekezés eredményeivel kapcsolatos megállapításait is, amelyeket szintén fontosnak ítélek és figyelembe veszek a kutatásom folytatásakor.

Budapest, 2021. 12. 07.

Tisztelettel:



.....
Dr. Péter Tamás

a műszaki tudomány kandidátusa