Közúti hálózati modell alkalmazása a környezeti terhelések optimálására

Dr. habil. **Péter Tamás**[1], **Dr. Háry András**[2], **Dr. Szauter Ferenc**[3], **Dr. Vadvári Tibor**[4], **Dr.** habil. **Lakatos István**[5]

[1] *Department of Control for Transportation and Vehicle Systems, Budapest University of Technology and Economics; Stoczek u. 2, H-1111 Budapest, Hungary; peter.tamas@kjk.bme.hu*
[2] *ZalaZONE; Industrial Park Ltd., Dr. Michelberger Pál u. 3., H-8900 Zalaegerszeg, Hungary; andras.hary@apnb.hu*
[3] *Széchenyi István University SZE KVJT and JKK; Egyetem tér 1. H-9026 Győr, Hungary; szauter@sze.hu*
[4] *University of Pannonia; Gasparich Márk u. 18/A, H-8900 Zalaegerszeg, Hungary; vadvari.tibor@zek.uni-pannon.hu*
[5] *Széchenyi István University SZE KVJT and JKK; Egyetem tér 1. H-9026, Győr, Hungary;lakatos@sze.hu*

A kutatás a többszakaszos, többdimenziós parametrikus sebesség-sűrűség függvények bevezetésével a bonyolult közúti forgalmi folyamatok analízisét segíti elő. Ennek alkalmazása olyan konkrét területeket támogat, mint pl., Zalaegerszeg városi forgalmi folyamatainak optimálása, a trajektóriákon történő haladások vizsgálatával. Ennek megfelelően alkalmazhatjuk a hálózati forgalom általános komplex matematikai modelljét és a szektorokon fellépő kapcsolatokat. Vizsgáljuk a parametrikus sebesség-sűrűség függvény bevezetését a hálózaton. A közúti hálózati forgalmi folyamatok ilyen irányban történő kiterjesztett modellezése, validált makroszkopikus hálózati modell használatán alapul.

1. BEVEZETÉS, A VIZSGÁLATOK ÁLTALÁNOS CÉLJA

Jelen vizsgálatok általános célja, új megoldások alkalmazása a közúti közlekedési hálózatok folyamatainak és a hálózatokon közlekedő járműdinamikai folyamatok kapcsolatára és egyesített rendszerben történő modellezésére. Az új modellalkotás fontos célja a valós környezeti terhelések optimálása.
A kutatás fontos célja egy olyan korszerű és pontos modellezési megközelítés kidolgozása, amely lehetővé teszi a területen az igen komplex vizsgálati módszereket elvégzését. Ez a kutatási módszer egyszerre vizsgálja a makroszkopikus elven működő nemlineáris nagyméretű közúti hálózati modellt és a vezető által érzékelt, dinamikai menetstabilitási hatást is, amely a 3D –s gépjármű dinamikából származik.
Ezzel kapcsolatban határozzuk meg a kutatáshoz szükséges komplex modellt, amelynek vizsgálata a valós közúti jármű-folyamatok figyelembevételével történik. Felhasználásra kerül a tetszőleges méretű és topológiájú közúti hálózat speciális matematikai modellezési technikája, továbbá felhasználjuk a járműsűrűség állapottérben a komplex rendszer működését leíró nemlineáris differenciálegyenlet-rendszert is, amely a pozitív rendszerek osztályába tartozó makroszkopikus közúti közlekedési modell.

2. A KUTATÁS MÓDSZERTANA, A FOLYAMATOK KOMPLEX ANALÍZISE

A járműdinamikai és közlekedési folyamatok integrált analízise magába foglalja a járművezetési folyamatokokat is. Az integrált szemléletet az alábbiakban foglaljuk össze. A közúti hálózatokon a közlekedési folyamatot tekintve, a járművek egy nagyméretű anyagáram résztvevői. A hálózati markoszkopikus mozgások, egy nagyméretű Euler-hálózat törvényeit követik. Ugyanakkor, a járműobkejtumok nem passzív résztvevők ebben a folyamatban, mert egyúttal önálló dinamikával rendelkező Lagrange-rendszerek is. Tehát, a közúti közlekedésben résztvevő járműveknek az a sajátosságuk, hogy a dinamikájuk egyszerre két rendszer-osztálynak is megfelel.
Az egyesített Euler és Lagrange rendszerek sebességfolyamatát, a mindkettő dinamikáját figyelembe vevő és azokhoz alkalmazkodó vezetők, illetve autonóm jármű esetén a robotpilóták sebességválasztása határozza meg.

Az alábbiakban tárgyaljuk, a közúti közlekedés komplex folyamatait meghatározó blokkok működése és ezek integrált rendszerét.

1.) EULER NETWORK SYSTEM blokk komplex modell, amelynek állapotjellemzői az általánosított hálózati szektorokon fellépő $\boldsymbol{x}(t) \in \Re^n$ járműsűrűségek és amelynél az általánosított szektorok körébe beletartoznak a parkolók is. Ennek megfelelően, ez a rendszer n részrendszerből felépített diszkrét dinamikus rendszer. A teljes közúti hálózati rendszer működését térben és időben, az $x_i(t)$ (i=1,2, … n) járműsűrűség állapotjellemzők írják le. A nagyméretű rendszer nagy volumenű járműáramlatok analízisére szolgál. Esetünkben a modell makroszkopikus modell. A rendszer figyelembe veszi a peremeken fellépő $\boldsymbol{s}(t) \in \Re^m$ járműsűrűséget, a hálózati gráf felépítését és annak geometriáját, a közlekedés rendjét, a jelzőlámpák működését, a parkolók elhelyezkedését és kapacitását.

A rendszernek két inputja van. Az első input a hálózati tartományt körül határoló zárt görbe mentén, a belső tartománybeli szektorokhoz közvetlenül csatlakozó külső szektorok ***s(t)***$\in\Re^m$ járműsűrűség állapotvektor. Megjegyezzük, hogy a peremszektorok esetében, egyesek a járműmennyiség beszállításában, mások a kiszállításban működnek közre - pontosan lekövetve a hálózati forgalmi rendet. Következésképp mindkét esetben, a külső járműsűrűség befolyásolja a belső szektorokon fellépő ***x(t)*** járműsűrűség állapotvektor értékét. Ezt figyelembe véve, az ***s(t)*** perem járműsűrűség vektort általánosított input vektornak is tekinthetjük.

A második input a szektorokon fellépő ***v(t)*** járműsebesség vektor. Ezzel kapcsolatban kiemeljük, hogy a hálózati közlekedési folyamatokat leíró általunk alkalmazott modell makroszkopikus modell. Ebben az esetben, ha az egyes szektoroknál a külső mérésekből beérkező járműsebességeket a valós időben kívánunk figyelembe venni, akkor járunk el helyesen, ha a szektorokon minden időpontban, a járműhosszakkal súlyozott sebesség átlagot vesszük figyelembe,

A rendszernek egy outputja van: A belső szektorokon fellépő ***x(t)*** járműsűrűség vektor.

2.) A DRIVER MAN/ROBOT SYSTEMS blokk a vezető, illetve - autonóm jármű esetén - a robotpilóta sebességválasztását veszi figyelembe. A vezető/robotpilóta a megfelelő sebességválasztásnál figyelembe veszi a hálózatról érkező, a pozíciójára jellemző ***x(t)***$\in\Re^n$ járműsűrűséget, a trajektória adott szektorában érzékelt ***e***$\in\Re^5$ környezeti paramétereket. Az ***e*** környezeti paraméter vektor tehát szektorfüggő. Esetünkben az ***e*** paramétervektor az elméleti vizsgálatok során öt paramétert vesz figyelembe: e_1: útminőség, e_2: kanyargós út, e_3: csúszós út, e_4: biztonságérzet, látási viszonyok és az e_5: út szélessége paraméter. Fontos kiemelni modellünk azon új tulajdonságát, hogy a sebesség-sűrűség függvények a járműsűrűség mellett függenek az ***e*** környezeti paraméter vektortól is: $v_i=f(x_i,\mathbf{e})$. A klasszikus makroszkopikus modellek ezt nem veszik figyelembe. A fentieken kívül a vezető/robotpilóta figyelembe veszi a saját járművének ***q***(*t*) állapotjellemzői által determinált dinamikus hatásait is. Mára ezen összetett folyamatoknál, egyre nagyobb szerepet játszanak az infokommunikációs rendszerek, Adam Titrik, István Lakatos, David Czegledi (2015), Adam Titrik (2016).

A rendszernek három inputja van:
Az első input a hálózati szektorokon fellépő ***x(t)*** járműsűrűség vektor.
A második input a hálózati szektorokra vonatkozó ***e(t)***$\in\Re^5$ környezeti vektor.
A harmadik input a Lagrange systems által meghatározott járműdinamikai rendszer ***q(t)*** állapotjellemző vektora.

A rendszernek egy outputja van: A belső szektorokon áramlásirányban fellépő ***v(t)***$\in\Re^n$ járműsebesség vektor.

3.) **EMISSION BLOCK** számítja az egyes járműtípusok kibocsájtását és energia felhasználását.

A rendszernek egy inputja van: A belső szektorokon fellépő ***v(t)*** járműsebesség vektor.
A rendszernek egy outputja van: A belső szektorokon, a forgalom hatására fellépő ***Emissio****(t)* vektor.
Aktuális és fontos feladat, a nagy volumenű közlekedési áramlatok és környezeti terhelések együttes analízise. Ez hatékonyan elvégezhető a nagyméretű hálózati modellezéssel, amely előállítja a sebességfolyamatokat. A számításokhoz rendelkezésre kell, hogy álljon a hálózati elemekre vonatkozó jármű típus eloszlás/statisztika is, (pl., intelligens kamera rendszerek és infokommunikációs technikák alkalmazásával). Lakatos, I (2010), I. Lakatos, Á. Titrik T. Orbán (2011). Egyes esetekben figyelembe kell venni az intelligens elektromos hajtáslánc rendszereket is, PUP Dániel, TITRIK Ádám, SZAUTER Ferenc, BISITS László (2013).

4.) LAGRANGE SYSTEM a térbeli trajektóriákon haladó 3D-s nemlineáris járműdinamikai modellek előállítása és analízise történik computer-algebrai úton. Ezen modelleknél a jármű súlypontja változó $v(t)$ sebességgel mozog egy trajektórián. Ekkor a $v(t)$ sebesség ismeretében kiszámítható, hogy a *t* időpontban a $\widetilde{g}(t)$ trajektória mely pontjában van a súlypont. Abban az esetben, ha a trajaktória nem vízszintes irányú egyenes vonal, hanem kereszt és függőleges irányú kitérésekkel is rendelkezik és hosszirányban a sebesség sem állandó, akkor a hossz, kereszt és függőleges irányú sebességváltozások miatt háromirányú erők, un. Q_i generált erők lépnek fel és ezek a tömegpontokban gerjesztik a rendszert. A rendszert, függőleges irányban az útprofil egyenetlenségek is gerjesztik az abroncsok talppontjainál. Az erőhatást az abroncsok függőleges irányú rúgóerő-és csillapítóerő karakterisztikái adják át a járműszerkezetnek. (Ez utóbbinál viszont, célszerű figyelembe venni azt, hogy a trajektóriára függőleges irányban szuperponálódó útprofil gerjesztéseinél fellép egy kisebb mérvű torzítás, az abroncs talpponti felfekvése és a változó sebességek hatásainak következtében.)
Az útpálya egyenetlenségét alapvetően sztochasztikus, véletlenszerű komponensek alkotják, amelyre rászuperponálódnak - az általában rövid ideig tartó - egyszeri zavarásból származó determinisztikus komponensek is. Az útpálya modellezésének célja olyan jelek generálása, amelyek jól reprezentálják az útpálya felületét, s így a vezetés tervezés eredményeként kapott szabályozó szimulációs vizsgálatában felhasználható, pl.: Péter, T (1977, 1997).
A trajektória menti változó sebességeket is figyelembevétele, instacionárius sztochasztikus útprofil-gerjesztés hat a jármű függőleges irányú dinamikai folyamataira, amelyet szintén érzékel a vezető. Ebben a kutatásban nem feladatunk az úttest dinamikai és rezgéseiből fellépő károsodási folyamatok vizsgálata, de megjegyezzük, hogy ezen a területen is kiemelten fontos a változó forgalom és a különböző sebességfolyamatok szerepe, ugyanis ennek következtében még a homogénnek tekinthető úttest esetében is a különböző pontokban, különböző károsodási folyamatok figyelhetők meg. Ez szintén kihat az útminőség és útfelület állapotára. Mindezeket tekintve, a járműdinamikai blokknál, a sztochasztikus útprofil-folyamatok modellezésénél

figyelembe vesszük a haladás során a változó sebességfolyamatokat is.
A járműdinamikai hatások különböző szintű kényelem-érzetet, stabilitás-érzetet, biztonságérzetet, illetve veszélyhelyzet-érzetet generálnak a vezetőben. Ezek alapján, valamint a forgalmi és külső környezeti, hatások alapján tartja meg, vagy dönt új sebesség választása mellett. Vezetéstechnikai szempontból a pályát és ennek változását, a jármű vezetője, vagy a robotpilóta minden pillanatban figyelembe veszi és ily módon állandóan egy komplex vezető-út-környezet-járműdinamikai rendszer tulajdonságai-nak hatásai érvényesülnek a vezetés során.
A rendszernek két inputja van:
Az első input a belső szektorokon fellépő ***v(t)*** járműsebesség vektor.
A második input szektoronként, az útfelületből származó, a keréktalppontok mozgását leíró térbeli trajektória függvények vektora.
A rendszernek egy outputja van:
A Lagrange systems által meghatározott járműdinamikai rendszerek ***q(t)*** állapotjellemző vektora.

A kutatás során egy komplex blokkba, a **VEHICLE SYSTEMS blokkba** integrálható a **LAGRANGE SYSTEM** blokk (amely a térbeli trajektóriákon haladó 3D-s nemlineáris járműdinamikai modelleket reprezentálja), valamint a járműveket vezető **DRIVER MAN/ROBOT SYSTEMS** blokk. Abban az esetben viszont, ha nem vesszük figyelembe a komplex modellben az egyedi járművek hatását, amelyet a **LAGRANGE SYSTEM** blokk szolgáltat, akkor a **DRIVER MAN/ROBOT SYSTEMS** blokknak még mindig van szerepe a szektorokra vonatkozó sebességválasztásoknál. Ekkor ez a blokk szektoronként a járműsűrűséget és az **e** környezeti paramétereket veszi figyelembe a sebességválasztásoknál és ezeket továbbítja az **EULER NETWORK SYSTEM** blokknak a nagyméretű hálózati modellezéshez.
Végül, ha a **DRIVER MAN/ROBOT SYSTEMS** blokk működését is kiiktatjuk, akkor az **EULER NETWORK SYSTEM**, az egyes szektorokon az adott időszakra és adott szektorra jellemző $v = f(x(t), e)$ sebességfüggvényt veszi figyelembe a számításainál.

3. A KÖZÚTI HÁLÓZATI FORGALOM MODELLEZÉSÉNÉL ALKALMAZOTT MEGKÖZELÍTÉSEK ÉS A MÓDSZERTANI KÜLÖNBSÉGEK

Egy közlekedési hálózat belső forgalom-lebonyolódását, a forgalom törvényszerűségeinek feltárását, a terepen végzett mérések időben és finanszírozási szempontból igen korlátolt jellegéből fakadóan, sok esetben szimulációs szoftverek segítségével szokás megállapítani. A forgalmi szimulációk futtatásához azonban, szükség van bizonyos mennyiségű és minőségű mérésre, amelyek a számítások kezdeti értékeit meghatározzák. A bemenő paraméterek szimulációs szoftverenként jelentősen eltérhetnek, ezért tekintsük át a hagyományos módszert alkalmazó szoftverek által várt adatstruktúrát és annak alapvető jellemzőit.

A hagyományos módszeren alapuló forgalmi szimulációk, utazás-felvételi vagy klasszikus forgalomszámlálási módszerekből indulnak ki. Előbbi esetben forgalomkeltés és forgalomvonzás esetéről beszélhetünk legtöbbször, amelyet honnan-hová mátrixok formájában is ki tudunk fejezni. Ez a felmérési módszer igen alapos körültekintést igényel, hiszen reprezentatívnak kell lennie, ugyanakkor a reprezentativitásnak megfelelő számú felmérés elvégzése rendkívül költséges lehet, ezért általában csak valamilyen előre meghatározott szisztéma szerint elvégzett mintavételezésről beszélhetünk csupán. A városi körzetek modellezése során számos modellt ismerünk (Lill-féle utazástörvény, Stouffer-féle hipotézis, Detroit módszer, Fratar módszer, Furness módszer, Voorhees modell, Alkalom-modell, /Intervening Opporutnities Model/. Versengő lehetőségek modellje /Competing Opportunities Model/, többszörös regressziós modell, utazási költség-modell, elektrosztatikus modell, egyéb szintetikus modellek), Jakab Tibor (1974), amelyek nehezen vagy egyáltalán nem mérhető növekedési tényezőkkel, indexekkel, empirikus kitevőkkel stb. operálnak. A modellezés bemenő paraméterei tehát sok esetben csak mértékadónak tekinthetők, így természetesen a szimulációs produktuma is csak az ennek megfelelő szignifikanciával vehető figyelembe.
A második típusú modellek csomóponti, illetve keresztmetszeti forgalomszámlálásokon alapulnak, amelyek jól definiált, útügyi szabványban is rögzített módszereket alkalmaznak, és a közlekedés tervezése során is általánosan elfogadottnak tekinthetők. A forgalom számlálása járműfajták szerint történik, amelyeket egységjárműben kifejezve szorzótényezőkkel súlyoznak. A forgalomszámlálás különböző napszakokban, szezonálisan végzendő, és eredményeként napi gépjárműforgalom, mértékadó óraforgalom (MOF), amelynek definíciója: *az az óraforgalom, amelynél nagyobb, az egész naptári év folyamán legfeljebb 50 órán át fordul elő*. E-mellett még nappali és éjszakai forgalom is számítható. Az ilyen jellegű forgalomszámlálásokkal operáló szimulációs szoftverek előnye az, hogy az elfogadható biztonsággal megállapított bemeneti értékekhez, a szakma számára jól értelmezhető, megfelelő minőségű eredmények párosulhatnak. A forgalomszámlálásokat alkalmazó rendszerek hátránya ugyanakkor az, hogy a forgalomnagyság, az átlagsebesség és a járműsűrűség közötti összefüggések nem adnak egyértelmű hozzárendelést; így pl., egy adott forgalomnagysághoz több átlagsebesség érték is tartozik. A rendszer tehát határozatlanságokat hordoz magában, ami abból adódik, hogy a hagyományos keresztmetszeti vagy csomóponti forgalomszámlálás módja információ veszteséggel jár.
A jelzőlámpás csomópontokban a lámpabeállítások meghatározásakor különös tekintettel kell lenni a mikroszkopikus és makroszkopikus forgalmi jellemzőkre is.
Mikroszkopikus jellemzők között említhető a járművek indulásának késlekedése, a jármű, kereszteződésen való áthaladásának időszükséglete, az ívben haladás sebesség csökkentő hatása stb.
Makroszkopikus jellemzők között a leglényegesebb tényező az egymáshoz kapcsolódó jelzőlámpával szabályozott csomópontok egymáshoz hangolásának megvalósítása. Az ún. zöldhullám kialakítása számos ismert előnnyel jár, a

forgalomszabályozó hatásától, a károsanyag kibocsátás csökkentésén át az üzemanyag fogyasztás és forgalomban töltött idő csökkenéséig.
Győrött pl., jól megfigyelhető a város szerkezetének felépítése a jelzőlámpák elhelyezéséből is. A várost átszelő főutak (első és másodrendű) és a velük párhuzamosan futó néhány út vezetik le a közúti forgalomnak jelentős részét, míg az őket összekötő utcák csupán parkolóhelyül szolgálnak vagy lakófunkciót látnak el. A kutatást több olyan alapkérdés motiválta, amelyeket a jelenlegi modellezési technikákban elhanyagolnak, viszont a gazdaságilag jelentős problémákra választ kereső nagyméretű hálózati modellek alkalmazásakor már nem hanyagolhatunk el és nem kerülhetünk meg. Ez a motiváció igen fontos az egyes projektek szempontjából, mert új irányt szab a közlekedés, mint kiemelt iparágakhoz kapcsolódó célzott alapkutatások folytatása területén. Rá kell mutatnunk arra is, hogy a hagyományos modellezési szemlélet alkalmazása igen sok megválaszolatlan kérdést vet fel és állandóan méretproblémákkal küzd. Természetesen, maga a feladat is igen összetett: a közlekedési hálózat rendkívül bonyolult, belső automatizmusok, humán tényezők, sokféle szabály, geometriai, adat, szezonalítás stb. jellemzi. Minden részhálózat más, sokféle az egyedi szabály, ennek kapcsán, bármely részhálózat önmagában vizsgálva, csak egy nagyon kis rész az egészből és minden esetben csak a nagy hálózatból kivett példa lehet!
Ezen a területen a hagyományos modellezési technikában eddig fel nem vetett kérdés, hogy lehet-e ezekből - a példákból - következtetni az egészre, a teljesre? Ha megoldjuk egy résznek az optimálását, nincs válasz arra, hogy mi van a komplementerrel, nem tudjuk, hogy nem toltuk-e át oda a problémát? Ha csupán szoftveresen algoritmizált modelleket alkalmazunk, ezek nem alkalmasak arra, hogy szélesebb körű egzakt matematikai következtetéseket, ill. eredmények adjanak! A nagyméretű globális hálózat nem állandó anyagáramú tiszta Euler hálózat, amely további új irányt szab a kutatásoknak.
Hagyományos modelleknél probléma a parkolók szerepe is a modellekben, mivel más típusú szereplők, mint az útszakaszok, u.n. idegen elemek.

4. AZ ALKALMAZOTT DINAMIKUS HÁLÓZATI MODELL

Ezen kutatásainkban a szűkített hálózati forgalmi modellt alkalmazzuk, Péter and Bokor J (2010, 2011), amely egy tartományban elhelyezkedő „*n*” szektorból álló *x* állapotvektorral jellemzett belső hálózati elemet tartalmaz. A modellhez „m” darab külső szektorok is tartozik, amelyek közvetlen kapcsolatokkal rendelkeznek valamely belső szektorral, ill., szektorokkal. Ez utóbbiak *s* állapotvektorát mérés alapján ismertnek tekintjük. Ennél a modellnél a kapcsolati hipermátrixot alkotó mátrixok közül, csak a $\boldsymbol{K}_{11}$ és $\boldsymbol{K}_{12}$ mátrixok játszanak szerepet, mert általuk képviselve van minden átadás, amely a belső szektorokra vonatkozik Péter, T. (2012,2019).

$$\dot{x} = \langle L \rangle^{-1} [K_{11}(x,s)x + K_{12}(x,s)s] \qquad (1)$$

Ahol: $x \in \Re^n$, $\dot{x} \in \Re^n$, $s \in \Re^m$, $L = \mathrm{diag}\{l_1, \dots, l_n\}$, l_i a főátlóban a belső szakaszok hossza ($\forall l_i > 0$, $i=1,2,\dots,n$), $K_{11} \in \Re^{n\times n}$, $K_{12} \in \Re^{n\times m}$.

Ennél a modellnél figyelembe vesszük, a gyakorlatban fellépő késleltetések is, amelyek nagy részben a reakció időből (*észlelés, döntés, cselekvés:* 0,6…0,7 s időtartam) és működtetésétől a hatás kialakulásáig eltelt időből (*értéke:* 0,15…0,3 [s]) származtatható időveszteségek figyelembe-vétele, a valóságot pontosabban leíró matematikai modellt eredményeznek.

Ez esetben feltesszük, hogy az *S*(x) és *E*(x) belső automatizmusok *x* szerint, az $u_{i,j}(t)$ forgalomirányítási lámpa függvények pedig *t* szerint folytonosan differenciálható függvények. Ez a modellezésnél különösebb megszorítás nélkül teljesíthető

5. A SEBESSÉGFOLYAMATOK ANALÍZISE

Modell-feltételezés, hogy $\forall x_i$, ($x_i \in [0,1]$, $i=1,2,\dots,n$) állapotjellemzőhöz hozzárendelhető a $v_i \geq 0$ sebesség érték is, egy x_i szerint folytonosan differenciálható f_i függvény alkalmazásával:

$$v_i = f_i(x_i(t)) \qquad (2)$$

A makroszlópikus hálózati modellből az egyedi sebességfolyamatok kinyerésével és egy vezető-jármű modell felhasználásával, vizsgálni lehet az egyes járművek motor teljesítményigényét és károsanyag kibocsátását is. A sebességfolyamatok alkalmasak modell-validálásra is. Ennél az első modell validálása Budapesten történt a Petőfi híd és Nyugati térig terjedő körúton Peter, Fülep and Bede (2011), lámpás kereszteződéseknél aktuális lámpa-beállítási adatok mellett és a helyszínen elvégzett forgalomszámlálási adatok alapján. A vizsgált útvonal, a különböző szimulációs időpontokban bejárásra került GPS készülékkel felszeret gépjárművekkel is és a járműves mérés során rögzítettük a mért sebességprofilokat is. A szimuláció és a járműves mérés során kinyert sebesség-idő diagramok összehasonlítása természetesen megmutatta, hogy az idődiagramokat egy sztochasztikus folyamat egy-egy realizációjának kell tekinteni és valószínűségelméleti, ill. statisztikai analízis útján kell őket vizsgálni

Nagyszámú, nemparaméteres statisztikai analízissel, u.n. homogenitás vizsgálattal megállapítást nyert, hogy a sebességprofiloknál a mért és szimulációval kapott két-két minta 95% -os szinten homogénnek tekinthető. A sebesség adatokból az adott jármű motorteljesítmény igényére is hasonló eredményt kaptunk. A modell validálása során, így megállapítható volt az alkalmazhatóságával kapcsolatban, hogy a modell lehetővé teszi olyan egyedi sebességfolyamatok kinyerését, amelyek a valóságnak megfelelnek, Peter, Fülep and Bede (2011). A modellből a fentiek alapján közvetlenül kinyerhetők a sebességfolyamatok a hálózat tetszőleges trajektoriáin is. Ekkor a hálózat egy tetszőleges „A” pontjából t_0 időpontban elindulunk a hálózat egy másik „B” pontjába egy megválasztott trajektória mentén. A továbbiakban ezen az útvonalon vizsgáljuk a járműdinamikai hatásokat. A kijelölt trajektória mentén kiszámolható a haladás szempontjából fontos X(t) út-idő függvény is és a hozzá tartozó *T* - célba érési idő is. Az állapotegyenlet által kiszámítható a kiegyenesített X trajektóriához és t időponthoz tartozó *V(t,X)* kétváltozós sebesség függvény egy kiegyenesített *X* trajektóriához és t időponthoz tartozó V(t,X) függvény.

Ezt követően az X(t) út-idő függvényt kiszámíthatjuk a meghatározott V(t,X) kétváltozós sebesség függvény ismeretében, az alábbi (3) integrál-egyenletet megoldásával:

$$\mathrm{x}(t) = \int_{t_0}^{t} \mathrm{V}(\tau, \mathrm{x}(\tau))\, d\tau \qquad (3)$$

A (3) feladat az alábbi elsőrendű nemlineáris differenciálegyenlet megoldását igényli, az $X(t_0) = x_0$ kezdeti feltétel mellett:

$$\frac{dX(t)}{dt} = V(t, X(t)) - V(t_0, X(t_0)) \qquad (4)$$

$$\mathrm{x}(t_0) = x_0$$

A megoldás, numerikus módszer alkalmazásával történik és ily módon a rendelkezésünkre áll a t_1 célba érési időpont és $T=t_1-t_0$ célba érési időtartam.

Ha több trajektória esetén vizsgáljuk az optimális célba érést, a probléma egy variációszámítási feladat megoldását igényli T. Peter, and M. Basset (2009). Minden trajektória mentén, a *t* időpontig befutott X hosszúságú út egy X(t) útvonal-függvényt eredményez, amelyhez a „B”- pontba érkezéskor, egy *T* eljutási idő tartozik és ez a leképezés szolgáltatja a J valós funkcionált:

$$\mathrm{J}:\ X(\mathrm{t}) \rightarrow T \qquad (5)$$

A nagyméretű közlekedési hálózatokat leíró modell tehát alkalmazható valós idejű, a forgalom alakulást figyelembe vevő útvonalajánláshoz is.

6. A GYORSULÁSFOLYAMATOK ANALÍZISE

A fenti sebességfolyamatok ismerete alapján az i-ik szakaszokon a forgalom változásokból eredő és fellépő hosszirányú gyorsulások is számíthatók a forgalmi modell alkalmazásával:

$$\dot{v}_i(t) = a_i(t) = \frac{df_i(x_i(t))}{dx_i} \cdot \dot{x}_i(t) = f_i' \cdot \dot{x}_i\,; \qquad (6)$$

(*i=1,2,…,n*).

Ekkor, a teljes belső tartományon a sebességvektor az alábbi (7) vektor:

$$v(t) = f(x(t)) = \begin{bmatrix} f_1(x_1) \\ f_2(x_2) \\ \dots \\ f_n(x_n) \end{bmatrix} \qquad (7)$$

Ezt a vektort az idő szerint deriválva, felirható minden szektoron a gyorsulásvektor is:

$$a(t) = \dot{v}(t) = \begin{bmatrix} f_1'(x_1)\cdot\dot{x}_1 \\ f_2'(x_2)\cdot\dot{x}_2 \\ \dots \\ f_n'(x_n)\cdot\dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1' & & & \\ & f_2' & & \\ & & \dots & \\ & & & f_n' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} \qquad (8)$$

Ily módon a rendszer állapotegyenlete alapján, közvetlenül számítható az egyes szektorokon, a szektorirányú folytonos gyorsulásvektor:

$$a(t) = \langle f_i' \rangle \cdot \dot{x} = \left\langle \frac{f_i'}{l_i} \right\rangle \cdot [K_{11}(x,s)x + K_{12}(x,s)s] \qquad (9)$$

Ahol: $a \in \Re^n$, $\langle f_i' \rangle = diag\{f_1', f_2', \dots, f_n'\}$ és l_i az *i*-ik szektor hossza (*i=1,2,…,n*).

7. A SEBESSÉG-SŰRŰSÉG FÜGGVÉNY VIZSGÁLATA A HÁLÓZATON

Tekintsük azt az esetet, amikor egy hálózaton modellezési hipotézisként valamely, a szakirodalomban validált, pl. a leggyakrabban alkalmazott Greenshields-féle lineáris törvényt tekintenek érvényesnek a sebesség és járműsűrűség közötti összefüggés felírásánál Greenshields (1935). Az egyszerűség kedvéért ezen a hálózaton legyen V_{max} a legnagyobb megengedett sebesség:

$$v_G(x) = V_{\max}(1-x)$$

Ekkor, a hálózaton bármely két l_1 és l_2 hosszúságú és x_1 és x_2 sűrűségű egymáshoz csatlakozó szektoron külön-külön érvényes a Greenshields-féle lineáris törvény. Vizsgáljuk meg, hogy az uniójukon is érvényes-e a Greenshields-féle lineáris törvény? A közös szektoron a sűrűség értéke:

$$x = \frac{l_1 x_1 + l_2 x_2}{l_1 + l_2}$$

Ez esetben a hipotézis alapján a két szektor unióján a kétváltozós sebesség-sűrűség függvény szintén lineáris és azt mondhatjuk, hogy az alábbi formában felírható a kétváltozós Greenshields-féle sebesség-sűrűség törvény:

$$v_G(x_1,x_2)=V_{\max}\left(1-\frac{l_1x_1+l_2x_2}{l_1+l_2}\right)$$

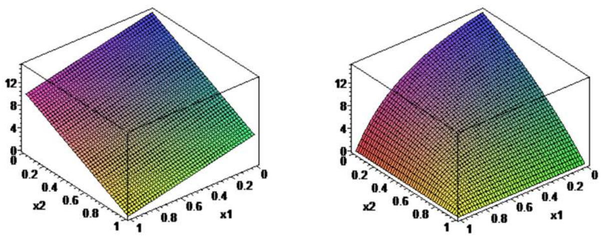
Ismeretes azonban, hogy a közös szektoron a várható (átlag) sebesség az egyes szektorokon mért várható sebességek, a szektorok hosszaival súlyozott harmonikus középértéke, ahol az egyes szektorokon az érvényben lévő hipotézis szerint külön-külön a Greenshields törvény érvényes:

$$v(x_1,x_2)=\frac{l_1+l_2}{\frac{l_1}{v_1}+\frac{l_2}{v_2}}=\frac{(l_1+l_2)v_1v_2}{l_1v_2+l_2v_1}=\frac{(l_1+l_2)\cdot V_{\max}(1-x_1)\cdot(1-x_2)}{l_1(1-x_2)+l_2(1-x_1)}$$

Látható tehát, hogy általános esetben (kivéve azt a speciális esetet, amikor $x_1 = x_2$) a kétféle módon meghatározott kétváltozós sebesség-sűrűség függvény nem azonos. Tehát a hipotézis ellentmondásra vezetett. Ugyanez az ellentmondás mutatható ki akkor is, ha az irodalomban ismert Kladek, Greenberg (logaritmikus) Greenberg (1959), Pipes-Munjal, Drake and Zachor, Drew, Underwood törvényeket vizsgáljuk, Kövesné Gilicze É. és Debreczeni G. (2003.3).
Tehát közúti hálózati trajektórián az irodalomból ismert sebesség-sűrűség törvények a hálózat egyes szektoraira mondhatók ki, de nem általános érvényűek a trajektória bármely egymáshoz csatlakozó kettő, vagy több szektorán.

$$v_G(x_1,x_2)\neq v(x_1,x_2)$$

$v_G(x_1,x_2)$ $\qquad$ $v(x_1,x_2)$



1. ábra: Kétváltozós sebesség-sűrűség függvények

Ez a lényegét tekintve egy paradoxon és a valódi ellentmondás típusba tartozik, amely a valóságról alkotott kép esetében a rendszer-modell koncepcionálisan hibás voltára hívja fel a figyelmet. Ez a típus igen hasznos, mivel a modell finomítását, továbbfejlesztését eredményezheti, de akár rámutathat a használhatatlanságára is. Jól látható tehát, hogy a két szektor unióján már egy kétváltozós nemlineáris függvény írja le a várható sebesség értékét. Vizsgáljuk meg a továbbiakban azt, hogy a sebesség-sűrűség függvények milyen általánosabb típusú családba sorolhatóak? A harmonikus közép fellépése miatt célszerű szakaszonként az alábbi típusú sebesség-sűrűség függvényt vizsgálni:

$$v(x)=\frac{V}{1+f(x)} \qquad (10)$$

Ahol:

V>0, a szektoron megengedett maximális sebesség értéke.

f(x) valós függvényt magfüggvénynek nevezzük, amelyre teljesül, hogy: $f(x)\geq0$, $f(0)=0$ és *f(x)* a [0,1] intervallumon szigorúan monoton növekvő és *x*-szerint folytonosan differenciálható függvény. Ha *v(1)*=0 akkor a [0,1) intervallumon értelmezzük *f(x)*–et.

Ezt követően az (10) szerint megadott függvénytípus alkalmazása mellett kimondható, hogy ha a hálózat minden részszektora fenti típusú sebesség-sűrűség függvénnyel rendelkezik, akkor a hálózaton bármely n≥1 szektorból álló trajektóriájára érvényes, hogy a szabadáramlás feltétele esetén az *n* változós sebesség-sűrűség függvény az alábbi formában írható fel:

$$v(x_1,x_2,\dots,x_n;e_1,e_2,\dots,e_n)=\frac{\sum_{i=1}^{n}l_i}{\sum_{i=1}^{n}\frac{l_i}{V_i}[1+f_i(x_i,e_i,)]} \qquad (11)$$

Ahol:

V_i az *i*-edik szektoron megengedett maximális sebesség
l_i az *i*-edik szektor hossza
$f_i(x_i,\boldsymbol{e_i})$ az *i*-edik szektorra érvényes, $\boldsymbol{e_i}$ környezeti paramétervektort is figyelembe vevő magfüggvény
$x_i = x_i(t)$ az *i*-edik szektoron *t* időpillanatban fellépő sűrűség érték

A (11) alapján a teljes trajektóriára érvényes maximális sebesség érték is felírható:

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

Míg a hagyományos modellek esetében különböző típusú matematikai függvényeket definiálnak a forgalom sebessége és a járműsűrűség közötti összefüggések felírására, (Greenshields-lineáris, Kladek, Pipes and Munjal, Drake and Zachor, Drew, Underwood) addig a fentiek alapján ezekhez mind-mind meghatározhatók a hozzájuk tartozó *f*(*x*) magfüggvények és ily módon ezek egységes szerkezeti formában tárgyalhatók a modellezések során. Általános esetben az f_i magfüggvényeknél figyelembe vesszük az egyes szektoroknál a környezeti hatásokat is az e_i környezeti paraméter vektorral. Péter T. (2019). Ily módon az *i*-edik magfüggvénynél az alábbi általános felírást alkalmazzuk:

$$f_i = f_i(x_i,e_i), \quad (i=1,2,\dots,n)$$

A trajektória menti sebesség általános alkalmazási lehetőségén kívül (pl. célba érési idő folyamatos becslése) a tárgyalt hálózati modellnél alapvető fontossággal bír a két tetszőleges csatlakozó általános szektor között történő átadásnál az áramlási-sebesség meghatározása. Ebben az esetben ugyanis, figyelembe kell venni mindkét szektoron a sebesség-sűrűség törvényt, továbbá a környezeti paramétereket, ideértve az általános szektorok hosszait is. A modell validálásánál az e_i, e_j környezeti paraméter vektorok és a β_{ij} akadályozási, vagy rásegítési tényező megfelelő beállítása segíti a valós folyamatok legjobb megközelítését az egyes szektor-párok esetében.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatási módszer egyszerre vizsgálja a makroszkopikus elven működő nemlineáris nagyméretű közúti hálózati modellt és a vezető által érzékelt járműdinamikai menetstabilitási hatás is, amely a 3D –s gépjármű dinamikából származik. A közúti hálózati és járműdinamikai modellezéssel kapcsolatos új kutatás alkalmazásai, egyszerre szolgálják a forgalom és a környezeti terhelések optimálását. Ez a területen igen komplex vizsgálati módszerek elvégzését teszi lehetővé.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A konferencia cikk a TKP2021-NKTA-48 számú projekt a Technológiai és Ipari Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

IRODALOM

Greenberg (1959): Greenberg, H.: "An Analysis of Traffic Flow", Operations Research, Vol.7, pp.79-85, 1959.

Greenshields (1935): Greenshields, B.D.: A study of traffic capacity. Proceedings of the highway Research Board, Proc. Vol. 14. pp. 448-477. 1934.

Jakab Tibor (1974) Közúti és városi forgalomvizsgálatok Tankönyvkiadó Vállalat, Budapest

Kövesné Gilicze É. és Debreczeni G. (2003.3): Kövesné Gilicze É. – Debreczeni G. Intelligens közúti közlekedési rendszerek és út-jármű rendszerek matematikai modellezése és analízise, Kutatási jelentés BME Közlekedésüzemi Tanszék. Budapest, 2003. pp 1-49.

Lakatos, I (2010): *Instacioner üzemállapotú motorteljesítmény-mérés görgős járműfékpadon* In: Bikfalvi, MicroCAD 2010: XXIV. microCad International Scientific Conference: E szekció: Anyagtudomány és -technológia. Miskolci Egyetem (2010) pp. 33-38. , 6 p.

I. Lakatos, Á. Titrik T. Orbán (2011): Data determination of an internal combustion engine for model set-up. (2011) HUNGARIAN JOURNAL OF INDUSTRY AND CHEMISTRY 0133-0276 2450-5102 39 1 35-40

Péter,Tamás (1997): Gépjármű lengőrendszerek felfüggesztésparamétereinek optimálása 120 p. Budapesti Műszaki Egyetem, 1997 Kandidátus Disszertáció

Péter,Tamás (1977): Nemlineáris sztochasztikus differenciálegyenlet-rendszerekkel leírt gépjármű lengéstani modellek linearizálhatóságának vizsgálata 128 p. 1977 Egyetemi doktori Disszertáció

T. Peter, and M. Basset (2009): Tamas PETER, Michel BASSET Application of new traffic models for determine optimal trajectories, pp. 89-94. Sessions 1 Automation and Mechatronics. (1-C-1 Sistem Modelling and Control). Oct.21-Oct.23, INTERNATIONAL FORUM ON STRATEGIC TECHNOLOGIES (IFOST 2009) HoChiMinh City University of Technology, Viertnam.

Péter and Bokor (2010): Péter, T., and Bokor, J. Modeling road traffic networks for control. Annual international conference on network technologies & communications: NTC 2010. Thaiföld, 2010.11.30-2010.11.30. *pp. 18-22. Paper 21.* (ISBN:978-981-08-7654-8)

Peter, Fülep and Bede (2011): Peter T., Fülep T. and Bede Zs.: The application of a new principled optimal control for the dynamic change of the road network graph structure and the analysis of risk factors, 13th EAEC European Automotive Congress 13th-16th June 2011. Valencia – SPAIN

Péter and Bokor (2011): T. Peter, J. and Bokor: New road traffic networks models for control, *GSTF International Journal on Computing*, vol. 1, Number 2. pp. 227 -232. DOI: 10.5176_2010-2283_1.2.65 February 2011.

Péter, T. (2012): Peter, T, Modeling nonlinear road traffic networks for junction control, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science (AMCS), 2012, Vol. 22, No. 3. pp. 723-732. DOI: 10.2478/v1006-012-0054-1

Péter T. (2019): Péter Tamás, Közúti járműforgalmi folyamatok nemlineáris modellezése nagyméretű hálózatokon, MTA Doktori értekezés pp 1-42

PUP Dániel, TITRIK Ádám, SZAUTER Ferenc, BISITS László (2013): Intelligens elektromos hajtáslánc illesztése és optimalizálása egy meglévő városi járműbe. (2013) Megjelent: OGÉT 2013 XXI Nemzetközi Gépészeti Találkozó pp. 330-333,

Adam Titrik, István Lakatos, David Czegledi (2015): Saturation Optimization of Selective Waste Collection Vehicles Based on Real-Time Info-Communication System. ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference

Adam Titrik (2016): Ádám Titrik. Sign-in-time Based Info-communication System for Collecting Selective Waste. (2016) PERIODICA POLYTECHNICA TRANSPORTATION ENGINEERING 0303-7800 1587-3811 44 1 1-4