A MAGYAR MÉRNÖKAKADÉMIA AJÁNLÁSAI

Közlekedésmenedzsment

Szerzők

Dr. Péter Tamás[1], Dr. Háry András[2], Dr. Szauter Ferenc[3], Dr. Vadvári Tibor[4], Dr. 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

Készült az MMA INNOKATALIZÁTOR 2022 Programját támogató NKFIH 2020-2.1.1-ED-2021-00156 számú szerződés keretében

Budapest, 2022. április 18.

Tartalomjegyzék

1. Fejezet ***Integrált közlekedés kutatás és fejlesztés a városi forgalmi és környezeti terhelések csökkentésére*** *3*

2. Fejezet ***Makroszkopikus forgalmi modell bázisú analízis és adatbank a levegő és zajszennyezés csökkentésére*** *24*

3. Fejezet ***Tartományszintű optimális közúti forgalomirányítás a környezetterhelés csökkentésére*** *36*

4. Fejezet ***Hálózati áthaladás vizsgálata és a trajektória értéke*** *51*

5. Fejezet ***IDM (Intelligens Vezetői Modell) modell-bázisú vizsgálata önvezető járműveknél az összetartozó sebesség és kormányzási szögjelek alapján*** *67*

6. Fejezet ***IDM-modell járműdinamikai bázisú vizsgálata a forgalmi paramétereinek optimálásához az autonóm járművek vezetés-támogatására*** *81*

7. Fejezet ***Az Univerzális IDM-modell matematikai felírása és alkalmazási területe*** *97*

Előszó a Közlekedési bizottság jelentéséhez

Az anyag a városi forgalommal és légszennyezéssel kapcsolatos problémákat tárgyal. A vizsgálatok a városi közlekedési hálózatok komplex dinamikus rendszerét veszik figyelembe. *Ezzel kapcsolatban, Zalaegerszeg városi közlekedésének forgalmi optimálását javasolja az ehhez kapcsolódó innovációs tevékenységek végrehajtásával.* A javasolt fejlesztés integrált megközelítéseket és módszereket alkalmaz. A munkához kitűnő lehetőségeket biztosít, hogy Zalaegerszeg város deklaráltan törekszik az intelligens város megvalósítására, amely jól kapcsolódik a közlekedés területén ehhez a projekthez. Ezeknek a speciális dinamikus rendszereknek közös sajátosságuk, hogy alapvető kritérium a folyamatok optimális lebonyolítása, amely egyszerre jelent komoly műszaki-környezeti és gazdasági kihívásokat. Az anyag elméleti részei egyaránt tartalmazzák a tartományszintű és a trajektóriák menti problémák vizsgálatát.

Budapest, 2022. 04. 18.

Dr. Péter Tamás
Közlekedési Munkacsoport vezető

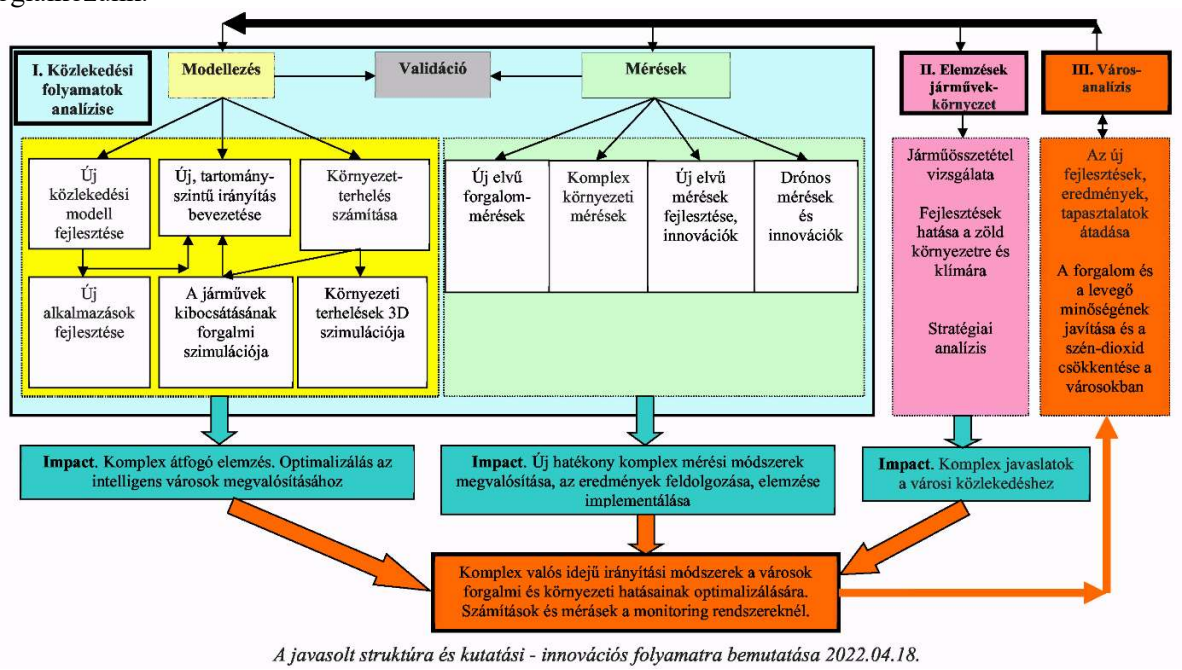
1. Integrált közlekedés kutatás és fejlesztés a városi forgalmi és környezeti terhelések csökkentésére

Az anyag átfogó, integrált kutatási és fejlesztési módszereket vizsgál a városi forgalommal és légszennyezéssel kapcsolatban, az optimális stratégiák meghatározásához. A vizsgálatok a városi közlekedési hálózatok komplex dinamikus rendszerét veszik figyelembe. Ezzel kapcsolatban összehangolt, és egymást is kontroláló mérések elvégzésén alapuló, korszerű mérőrendszer fejlesztéseket javasol. Ez egyben, a kidolgozásra kerülő új módszereknek a validálását is jelenti az adatok folyamatos feldolgozásával és elemzésével együtt.

Kulcsszavak: alacsony kibocsátású társadalom, hatékony környezet megvalósítása, optimálási stratégiák meghatározása, fejlett értékelési módszerek és eszközök integrálása, komplex rendszerek dinamikájának analízise, integrált gyakorlati megközelítés, innováció és technológiai fejlesztések, közúti hálózati rendszer, levegőszennyezettség meghatározása új mérési módszerekkel, aeroszolok vizsgálata, ráfordítás-haszon (cost-benefit) elemzés.

1. BEVEZETŐ

Az anyag Zalaegerszeg városi közlekedésének forgalmi optimálását és az ehhez kapcsolódó légszennyezést is csökkentő kutatást és innovációs tevékenységeket szorgalmaz. Ez javítja a levegő minőségét is, csökkentve a szén-dioxid és a káros (karcinogén) aeroszolok kibocsátását a város területein. A kutatás és fejlesztés integrált megközelítéseket és módszereket alkalmaz. A bonyolult komplex közlekedési hálózati rendszerek dinamikáját vizsgálva, figyelembe veszi a levegőminőség javítását is. Az anyagban szereplő integrált kutatási megközelítések, innovációs módszereket és technológiai fejlesztéseket javasolnak a levegő minőségének javítására. Ez által a szén-dioxid és az aeroszolok csökkentését szolgálják és az ezzel kapcsolatos optimális stratégiák kialakítását vizsgálja a városoknál. A méréséi módszerek a komplex légszennyezés meghatározására vonatkoznak és új technológiák alkalmazásával valósulnak meg. Mivel a városi tevékenységek között az egyik legnagyobb társadalmi és technológiai változásokat a közlekedés igényli, ezzel a problémával súlyozottan foglalkozunk.



1. ábra: A kutatás és innováció területe

Az 1. ábrán látható, hogy a javasolt projekt, teljes körű analízist kíván elvégezni.

Az I. blokk szemlélteti az egzakt hálózati folyamatmodellezést. Ez széles körben összehangolt és egymást is kontroláló méréseket és mérőrendszer fejlesztéseket, valamint a kidolgozásra kerülő új módszereknek a validálását is jelenti, továbbá az adatok feldolgozását és elemzését.

Az II. blokk tartalmazza, a folyamatokban résztvevő kibocsájtók szerepének rövid, közép és hosszú távú stratégiai kritikai elemzését.

Végül a III. blokk, a projektben résztvevő város analízisét és az innovatív fejlesztések bevezetésének rendszertervét foglalja magába, amely a levegő minőség fenntartható javítását és a szén-dioxid- és aeroszol-kibocsátás csökkentését szolgálja ezeknek a városoknak a területein.

A program témája: a megjelölt komplex területeken, új modellkutatások és innovatív mérőrendszer fejlesztéseknek a végrehajtása. További olyan innovatív mérési-számítási módszerek és rendszerterv elkészítése, amely Zalaegerszeg város kooperatív ITS megvalósítását kívánja szolgálni.
A munkánkhoz kitűnő lehetőségeket biztosít, hogy Zalaegerszeg város deklaráltan törekszik az intelligens város megvalósítására és ez jól kapcsolódik a közlekedés területén, a most meghatározott projekthez. A projekt rendkívüli motivációját és aktualitását jelenti, hogy Zalaegerszegen működik a ZALAZONE tesztpálya és a hozzá kapcsolódó kutatóközpont is. Ez kitűnő lehetőséget biztosít a projektünk sikeres megvalósításához, továbbá a tervezett ITS fejlesztések a közlekedési folyamatok optimális lebonyolítását és a torlódásokkal kapcsolatos problémák megoldását is szolgálják. Az innovatív módszerek rendkívül fontos szerepet játszanak a környezetterhelés és a közlekedésbiztonság területén fellépő gondok megoldásában is.

Zalaegerszeg Nyugat-Magyarországon megyeszékhely, 102,41 km^2 területen fekszik, lakóinak száma 55 470 fő. Jelentős átmenőforgalommal bír, fontos kulturális központ, egyetemváros és progresszíven fejlődő ipari centrum is, ahol kiemelkedő szerepet játszik az ipar és közlekedés fejlesztése. A várost ugyanazok a jelentős közlekedési, társadalmi kihívások érintik, mint Európa más nagyvárosait, ezért fontos cél itt is ezekre a válaszadás, amely a zöld és intelligens integrált közlekedés megvalósítását jelenti.

2. CÉLKITŰZÉSEK

1. Fontos cél a hatékonyság, az integrált megközelítés, új stratégiák és gyakorlatok megvalósítása. Ezért a nagyméretű bonyolult problémák modellezésére új paradigmákon alapuló dinamikus modellt alkalmazunk, és új elvű optimális irányítási módszerek bevezetését javasoljuk.

2. Célunk, a nagyméretű közúti hálózatok dinamikus modellezésre kifejlesztett és validált kutatási modell ipari továbbfejlesztése a város részvételével. A továbbfejlesztett alkalmazást felhasználóbarát módon kell bevezetni a nagyméretű közlekedési hálózatoknál a városokban, a szennyező források feltárására az intelligens közúti hálózatok esetén a valós idejű irányítási feladatok végrehajtásánál.

3. Cél, az alacsony kibocsátás érdekében a hatékony alkalmazási lehetőségek feltárása a közúti ás városi forgalmi folyamatok vizsgálatánál és ezzel kapcsolatos átfogó rendszerterv elkészítése az intelligens városi hálózati közlekedéséhez.

4. Cél, a városi trajektóriák menti komplex környezetterhelés analízisére gyorsított módszerek kifejlesztése.

5. Cél, a szükséges adatbank létrehozása a naprakész városi környezeti, közlekedési hálózati folyamatok online tárolására és irányítására. Monitoring-rendszer, szakértői-rendszer működtetésére. Vezetők számára a lakosságot tájékoztató publikus rendszer működtetésére. Ennél a munkapontnál kihasználjuk

a nagypontosságú, dinamikus térképek alkalmazásait is, a fejlett GNSS-t és a számítási felhőn alapuló technológiákat.

6. Cél a technológiai fejlesztések és a fejlett értékelési eszközök integrációja.

7. Cél az adatfeldolgozáshoz vegyes mérőrendszerekre támaszkodó forgalmi adatgyűjtő technológia fejlesztése, a technológiai és a nem technológiai, innovatív megoldások gyors piaci bevezetése.

8. Cél a forrásazonosítást szolgáló, egyidejűleg 5 paraméter meghatározására alkalmas, gyors mérési módszer továbbfejlesztése, alkalmazása, validálása és hasznosítása, a levegőszennyeződés eredetének és térbeli eloszlásának feltérképezése.

2. A MUNKAPROGRAM RÖVID ÁTTEKINTÉSE

Mára az európai lakosság többsége él városi környezetben. Jelentős technológiai fejlődés valósult meg az intelligens városok és községek prioritási terület, az innovatív technológiai lehetőségek és stratégiák terén, az infokommunikációs technikák és ITS területén. Valóban széles körű az igény a városok levegő minőségének javítására, a szén-dioxid és a porterhelés és aeroszol koncentráció csökkentése területén. Ez egyúttal jelentős kihívás is az innovatív városoknak, kutatóknak és cégeknek valóban szükséges bizonyítaniuk a maga szintű hatékonyságot.

Esetünkben a fentiekhez szükséges rendszertervben, párhuzamosan működő automatikus adatgyűjtési és automatikus irányító rendszerek működnek. Mindezek célja az esetünkben GreenNet-ITS alkalmazásnak nevezett módszer minél gyorsabb felhasználása és széleskörű elterjesztése a gyakorlatban. Valós kihívást jelent a tervezett nagyméretű adatbank létrehozása és a gyors adatáramlás biztosítása, ezért szükséges alkalmazni a felhőn alapuló technológiákat.
Az eljárásunk egyes esetekben külön-külön is vizsgálja a közlekedési folyamatokat a trajektóriák mentén és a tartományokon is, így a környezeti kihívásokat mindkét esetben.
Forgalmas utak mentén fellépő környezetterhelésre, gyorsított számítási-előrejelzési módszereket dolgoztunk ki és vizsgáljuk az ehhez is kapcsolható ITS irányítást, amelynél IDM csoportok optimális átvezetésének hatékonyságát elemezzük. A környezetterhelés optimálása viszont lineáris Lyapunov–függvény alkalmazásával, tartományszinten történik. Ez utóbbinál, a megvalósítható automatikus irányítás elvezet a kooperatív ökoszisztémát ötvöző, integrált közlekedés és szállítás-irányításhoz. Az így meghatározott kritikus pontok megjelenése és vizsgálata tartományszinten történik.
A javasolt emissziós kutatásaink ösztönzik a további szabványosítást is és azon túl a kölcsönös átjárhatóságot. Céljaink szerint rámutatunk azokra a különbségekre is, amelyekkel a valós városi forgalomban számolni kell, és amelyektől a labormérések eltérhetnek.
A torlódásokkal kapcsolatos problémák megoldására gyakran hasznos figyelembe venni az aszimmetrikus forgalmi terhelések fellépését, amikor a kapacitásnövelés állapotfüggő optimális irányítással valósítható meg. Ez is figyelembe vehető a projektben a különböző területeken az MPC elvet alkalmazva pl., a változtatható irányú sávok működtetésével.
A javaslatunk támogatja a szoros koordinációt a kutatás és innováció terén egyaránt. A projektben résztvevők több mint 10 éve állnak folyamatos kutatási kapcsolatban és tudásbázisukkal jelentősen kiegészítik egymást. Zalaegerszeg várossal és a kapcsolódó világszínvonalú kutatóbázissal, kitűnő a lehetőség a fenti területeken a továbblépésre az innováció terén is. A kutatás és fejlesztés által, pontosan feltárhatók a városban szükséges innovatív mérő, számláló, tároló, kijelző, beavatkozó és irányítási eszközök és módszerek, amelyek piacképes lehetőségekkel is bírnak a további potenciális felhasználók részére. Ezeket közösen fogjuk analizálni és figyelembe is vesszük műszaki-gazdasági területen a megvalósítható lehetőségeket a rendszertervben. A közös kutatások során létrejött ITS módszerek, tapasztalatok és rendszerterv szintén átadható piaci értékkel bír további városok számára is.
A projektünk teljes mértékben támogatja a cross-systems/cross-border innovatív szolgáltatásokat és a globális - kimenet gyorsított átvételét és telepítését is. Támogatjuk a közös figyelemfelkeltést és tájékoztatásokat a városi szennyező források feltárására, a technológiai és a nem technológiai innovatív megoldások bevezetését és a kooperatív ITS megvalósítását.

3. KONCEPCIÓ ÉS MEGKÖZELÍTÉS

A projekt a járműforgalmi területen átfogó koncepciói és gondolatai, transz-diszciplináris szempontok a városok közlekedésének modellezéséhez, a zöld és alacsony széndioxid-kibocsátású gazdaságos működés megvalósítására.
- Az általunk alkalmazott új modell alkalmas a globális forgalmi és környezeti terhelések analízisére is. Ez a lehetőség igen értékes a hálózat és járműösszetétel jövőbeni fejlődéséből eredő következmények vizsgálatához, előrejelzések számításához és a modellek további kutatására is.
- A városi környezetre vonatkozó hatásokat tekintve, jelentős kibocsájtó a felszíni közlekedés. Eltérő mértékűek a különböző szennyezőanyagok, amelyek 42 % - 86 %-ban a közlekedésből származnak. Ezt a problémát vizsgálni kell az erre kifejlesztett matematikai forgalmi modellt felhasználásával is. A kutatások egyaránt vizsgálják a tartományszintű és trajektória menti problémákat is a városokban.
- A közúti forgalmi szennyezést döntően a szakaszokon fellépő járműsűrűség, jármű összetétel és sebesség determinálja. Ezért meghatározó tényező a komplex hálózati rendszerszemléleten alapuló innováció!
- A vizsgálatok komplexek, ezek különböző párhuzamos mérésekkel és modellszámításokkal ellenőrizhetők és segítik a validásokat.
- Új mérőeszközökkel, szétválasztható a közlekedés és az egyéb szennyező forrásokból származó légszennyezések. A kutatás a különböző típusú források kibocsájtásának hatékony csökkentésére irányul. Egyrészt, a városokra meghatározott dinamikus szennyezés eloszlások alapján hosszabbtávú optimális stratégiák dolgozhatók ki, másrészt hálózatszintű valós idejű optimális irányítás valósítható meg.
- Vizsgálatainknál figyelembe vesszük a jellemző meteorológiai hatásokat is. Egy kedvező helyzetű városnál a hatékony légáramlás ugyan lokálisan sokat segít, viszont ekkor sem lehet azt mondani, hogy a légszennyeződés rendben van! Kiemelendő, hogy a kibocsájtás légáramlástól függetlenül történik meg és a globális hatásai egyértelműen negatívak, tehát minden esetben a forrásnál kell csökkenteni a kibocsájtást!
- A fontos területeken, Climate change, Transport, Policy instruments, folyamatosan figyelembe vesszük a legújabb változásokat és adatokat is, pl. The European Environment Agency (EEA) is an agency of the European Union: http://eunis.eea.europa.eu/gis-tool.jsp; http://edktvf.zoldhatosag.hu/

4.1 A közlekedési hálózat analízise

Nagyméretű bonyolult hálózati problémák vizsgálata, új modellparadigmákon alapuló dinamikus modellel

Új forgalmi modellfejlesztés
A nagyméretű hálózatok modellezésére praktikusan makroszkopikus hálózati modellt építettünk fel. Ezzel kapcsolatban először foglaljuk össze az új modellparadigmákat.

P.1. A közúti járműforgalmi folyamatok egységes dinamikus modelljét egy új pulzáló irányított gráf határozza meg.
Kövessük azt az ismert eljárást, amely szerint a közlekedési-topológiai gráf éleit, (praktikusan a térképen látható út-sávokat) szektorokra bontjuk. Ekkor az úthálózaton létrejövő közlekedési folyamat a szektorok, mint hálózati elemek sokasága között fellépő dinamikus kooperációk eredménye.
Ebben a főszereplők a kooperáló szektorok és ők az új gráf csúcsai! Ezek a csúcsok egyúttal állapotjellemzőkkel (dinamikus járműsűrűségekkel) is rendelkeznek. A csúcsok közötti élek szintén dinamikusak. Ők egyszerre szabályozzák az anyagátadás (jármű-átadás) sebességét és mennyiségét is. A dinamikus éleknél az anyagáram-sebesség a kooperáló csúcsok állapotaitól, az őket körülvevő (segítő/akadályozó) környezettől és időtől is függenek. A dinamikus éleknél az anyagátadás-mennyiségét környezettől és időtől függő disztribúciók szabályozzák.

P.2. A járműsűrűség definiálására a szektorok térbeli lefedettségét használjuk, amely matematikailag egzakt fogalom és bármilyen hosszúságú szektor esetében [0,1] intervallumban helyezkedik el. Ez a definíció kiterjeszthető bármilyen alakú parkolóra is.
Ennek eredményeként a parkolók, mint (általánosított) szektorok vesznek részt a járműforgalmi folyamatok egységes dinamikus modelljében. Ők ugyanolyan (állapotjellemzővel és anyagátadás-kooperációval bíró) dinamikus elemek, mint a hagyományos szektorok. Nagyon fontos következmény, hogy a rendkívül bonyolult és nagyméretű közúti hálózatokhoz kapcsolódó járműforgalmi folyamatok egységes dinamikus modelljét, ily módon sikerült egyféle elemek sokaságából felépíteni.

P.3. A vizsgált tartományban elhelyezkedő valós közlekedési hálózati rendszert egy virtuális zárt görbével határoljuk körül. (A tartomány nem feltétlenül egyszeresen összefüggő). A virtuális zárt görbe megnevezés a modellezés igen fontos tulajdonságát emeli ki! Ily módon, a körülhatárolás következtében, nem szűnik meg az a dinamikus kapcsolatrendszer, amely a külső és belső hálózatok között, a vizsgálatunktól függetlenül létezik. A modellben ez azt jelenti, hogy az input szektorok és belső szektorok között, valamint az output szektorok és belső szektorok között ugyanazon típusú dinamikus átadási kapcsolatok valósulnak meg, mint a belső-belső szektorok között. Tehát, az u.n. „kapuknál" nem forgalom megadása történik, mint a hagyományos modelleknél.

P.4. A belső és külső hálózat szektorai között négyféle kapcsolat van. A teljes hálózat esetében alapvető fontossággal bír a hálózatot definiáló kapcsolati hipermátrix. A teljes (belső és külső) hálózat dinamikus működését a kapcsolati hipermátrix foglalja egy rendszerbe. A kapcsolati hipermátrix megadja bármely szektor esetében, hogy milyen más szektorokkal áll és milyen dinamikus átadási kapcsolatban. A kapcsolati hipermátrixot tartalmazó differenciálegyenlet-rendszer írja le a hálózat minden szektorának a működését, azaz a teljes hálózat működését. (A belső tartomány kapcsolatainál mindenféle kapcsolat fellép, kivéve a külső-külső kapcsolatokat. A külső tartomány kapcsolatainál mindenféle kapcsolat fellép, kivéve a belső-belső kapcsolatokat.)

P.5. A belső és külső hálózat járműforgalmi folyamatait egyszerre leíró univerzális hálózati modellt írunk fel. Módszerünk lényege, hogy egyszerre vizsgálunk egy tetszőleges belső hálózati szektor összes dinamikus átadási kapcsolatát és egy tetszőleges külső hálózati szektor összes dinamikus átadási kapcsolatát. Az univerzális hálózati modell nemlineáris pozitív differenciálegyenlet-rendszer.

P.6. Globális hálózati modellhez jutunk el, oly módon, hogy az univerzális hálózati modell belső hálózatát tartalmazó tartományát addig növeljük, amíg a külső tartomány üres halmazzá nem válik. Ezzel ekvivalens, ha a külső hálózatot tartalmazó tartományát addig növeljük, amíg a belső tartomány üres halmazzá nem válik. (Végeredményben az történik, hogy a korábbi n db. belső szektoron a sűrűségek jelölései megmaradtak: x_1, x_2, … ,x_n, a korábbi m db. külső hálózati szektornál viszont, átjelölést hajtunk végre: x_{1+m}, … ,x_{n+m}).

P.7. A szűkített hálózati modell esetében, a belső hálózati tartományban n db. x_1, x_2, … ,x_n, sűrűségű állapotjellemzővel rendelkező szektor van. A külső tartomány, azt az m db. s_1, s_2, …. ,s_m, mért sűrűséggel rendelkező szektort foglalja magában, amelyeknek közvetlen input vagy output átadási kapcsolata van valamely belső szektorral. (Ez utóbbi modellt alkalmazzuk pl. valós idejű modellezésre és irányításra. Az Univerzális és Globális modellek általános rendszerelméleti tulajdonságok vizsgálatára és megismerésére szolgálnak.)

A nagyméretű közúti hálózatokon a közlekedési folyamatok modellezése elvezet a pozitív nemlineáris rendszerek alkalmazásához.

A pozitív rendszerek első definícióját Luenberger, 1979. adta meg: *A pozitív rendszer egy olyan rendszer, amelyben az állapotváltozók nem negatívak.* A vizsgált közúti közlekedési folyamatok többségében az állapotok eredeti fizikai jelentése alapján megfelelnek ennek. A klasszikus irodalomban a közúti folyamatok leírása során a legtöbb esetben általános lineáris rendszer egyenleteket állítanak fel és nem használják ki a folyamat pozitív tulajdonságait. Azt gondolhatjuk, hogy az általános lineáris rendszereknél megismert tulajdonságok minden probléma nélkül igazak a pozitív rendszerekre is,

azonban ez nem így van. A pozitív rendszerek irányíthatóságának és a megfigyelhetőségének a feltételei nem vezethetők le egyértelműen az általános rendszereknél megismert módszerekből. A probléma különösen igaz, ha nemcsak az állapotokra, de még a beavatkozó jelre is nem negatív értékkészletet követelünk meg. Ezért, a közúti folyamatok tisztán pozitív rendszerként történő leírása az irányítástechnikai szempontból nem triviális feladat. Az irányítási feladat ebben az esetben azt jelenti, hogy úgy kell egy állapotból egy másik állapotba irányítani a rendszert, hogy az állapotátmenet közben is érvényes, hogy nem negatív értékeket vehetnek fel az állapotok. A tárgykörben a rendszerek leírását és irányíthatóságát Caccetta and Rumchev, 2000. és Farina and Rinaldi, 2000. rendszerező munkái, továbbá Bacciotti, 1983., Coxson and Shapiro, 1987. és Valcher, 1996. adták meg. Boothby, 1982. és Sachkov, 1997. publikációikban az irányításelméletben alkalmazott *A* valós mátrixot tekintve, kijelenthető a következő tétel: A rendszer pontosan akkor pozitív, ha az *A* mátrix Metzler mátrix, azaz a főátlón kívüli elemek mind nemnegatívak, a főátlóban lévő elemek pedig tetszőlegesek lehetnek.

Globális közlekedési folyamatok, környezeti és gazdasági kutatások a hálózaton

Különlegesen érdekes terület a Globális hálózati folyamat-analízis kiterjeszthetőségének kutatása más területekre is. A globális modell a közúti közlekedési áramlatokat tekintve egy nemlineáris autonóm rendszer. Dinamizmusát a szektorok között fennálló kooperáció intenzitását időben befolyásoló gama függvények szabályozzák a Földfelszín különböző pontjain, reggel feléled, estére lecsillapodik a dinamizmusa. Érdekes a globális hullámtulajdonságok vizsgálata. A modell kiterjeszthetőségének vizsgálata általános környezeti és gazdasági folyamatok leírására. Fontos, a prognosztizálható járműszám és összetétel várható hatásainak lokális és globális vizsgálata, a forgalom, a környezetterhelés az üvegházhatás továbbá az általános gazdasági tényezőket tekintve.

A globális közlekedési hálózatot vizsgálva, nem állandó anyagáramot is figyelembe véve, a közlekedési hálózati modellre általánosított leírást adott Péter T., 2011.3. Felírta a globális hálózati folyamatok működését leíró nemlineáris pozitív differenciálegyenlet-rendszert és vizsgálta a stabilitását is.

A Föld felszínén elhelyezkedő n elemű hálózat közlekedési folyamatait egy horizontális folyamatnak tekintve, lezajlik egy másik jelentős vertikális folyamat is, amely egyrészt a járműgyártásból eredő ráterhelés, másrészt az amortizáció következtében lép fel! Az autógyárak folyamatos termelése beszállítóként jelenik meg a hálózaton: együttes hatásuk szerint olyan forrás-szektorként, amely elvben bármely más forgalmi szektorral kapcsolatban áll, arra rászállíthat, - azonban ez a hiány nála, mint szektornál nem jelentkezik! (Ezeket a szektort elvben bármelyik sorszámmal megjelölhetjük, praktikusan jelöljük őket az n+1, ..., $n+k$ szektoroknak. Ezeket figyelembe véve bővülnek a kapcsolati hipermátrix sorai és oszlopai.)

Ezzel párhuzamosan működik a hálózatban egy nyelő-szektor is, amely az amortizált, használatból kivont járműveket fogadja be folyamatosan anélkül, hogy megtelne. A Föld felszínén elhelyezkedő hálózati szektorokra tehát befolyik az új járműáradat, de ezek a szektorok „ki is vannak lyukasztva”, ezáltal az amortizált járművek ki is folynak róluk. Milyen változást idéz elő ez a kapcsolati hipermátrixban?

A forrás szektorból a járművek a többi szektorokba úgy lépnek be, hogy nem a forgalomban együttműködő szektorok valamelyikéről áramlanak be, tehát nem forgalomból kerülnek be, ez által sértik a klasszikus modelleknél fennálló Euleri anyagmegmaradás törvényét.

A forrás-szektornál az elvételekből nem jelentkezik hiány, mindig pótolja a gyártó a kiszállítást, amíg folyik a termelés. A modellben ezek olyan speciális „parkoló” szektorok, amelynek mindig nem negatív a sűrűsége. A nyelő szektor szerepét is szükséges vizsgálni! Erre bármely szektor szállíthat járművet, az 1,2, …, n-ik szektorok köréből, rendre $v_{1\,A}$, $v_{2\,A}$, $v_{r\,A}$, $v_{n\,A}$ nem negatív átadási sebességekkel. Ezek veszteségek az egyes szektoroknál, tehát a kapcsolati hipermátrix főátlójában egy további negatív tagként szerepelnek. Ezek a járművek a szektorokból úgy lépnek ki, hogy nem a forgalomban együttműködő szektorok valamelyikére áramlanak, tehát nem forgalomba kerülnek, ezáltal szintén sértik az anyagmegmaradás törvényét! A globális hálózaton ténylegesen az állandó járműszám-növekedés mellett történő nem Euleri közlekedési áramlatokat kell vizsgálni! Erre utal áttételesen a motorizációs ráta is. A hálózat változást a globális mátrix n méret-indexeinek időtől történő függőségével és az elemek közti kapcsolatok változásának figyelembevételével adhatjuk meg. A

javasolt további kutatás feladata a modell kiterjeszthetőségének vizsgálata infokommunikációs eszközök alkalmazásával és a globális közúti közlekedési áramlatok nemlineáris modellezése, külön kitérve a globális hullámtulajdonságok vizsgálatára.

A projektben bemutatásra kerülő kutatás egy új elvű, és rendkívül hatékony megközelítést ad a közúti hálózati folyamatok leírására és a nagyméretű intelligens hálózatok megvalósítására. A kutatás a hálózat általános dinamikus működését vizsgálja. A gyakorlatban, a hálózatfejlesztés és tervezés azon problémáira összpontosít, amelyeknek a megoldásai választ adnak arra, hogy egy meglévő, vagy fejlesztendő hálózaton milyen konkrét folyamatok zajlanak le? Megfelel-e az adott hálózat, (ill. a fejlesztéseket követően) a fenntartható fejlődés kritériumainak?

Az infokommunikációs technológiák és a modell által, a hálózatok irányításával optimális járműsűrűségek és ez által, optimális sebesség értékek tarhatók fent. A környezeti terhelések tartomány szinten történő kedvező értéken tartására új, tartomány szintű optimálás irányítás adható meg. Ez a központi forgalomirányító rendszer által dinamikusan alkalmazható a teljes tartományon, illetve azokon a szub-tartományokon, ahol kritikus helyzet lép fel.

4.2 Új, tartomány szintű irányítás

A nagyméretű nemlineáris közúti közlekedési hálózatok optimális irányításának vizsgálata

Lyapunov függvények módszerével Péter T., 2009., Péter, T., and Bokor, J., 2010. és Péter, T., and Bokor, J., 2011. kimutattuk, hogy a tetszőleges zárt görbe által körülhatárolt tartományban (szűkített modell), az autonóm rendszer aszimptotikusan stabilis. A nem autonóm rendszernél, a peremekre vonatkozó Lyapunov függvényt alkalmazó irányítási törvényt adtunk meg, amely elégséges feltételt ad a rendszer aszimptotikus stabilitására és dinamikusan alkalmazható a teljes tartományon, illetve, azokon a szubtartományokon, ahol kritikus helyzet lép fel.
Az alkalmazott $V(x_1, x_2, \ldots, x_n)= l_1*x_1+ l_2*x_2+ \ldots+ l_n*x_n$, *lineáris Lyapunov függvény fizikai jelentése* a körülhatárol úthálózaton, a *t* időpontban, a járművek által elfoglalt összes úthossz. (Ez a tartományban tartózkodó összes jármű számával, közel arányos.)

Ebből adódóan *dV(t)/dt* -derivált negatív értéke, az elfoglalt összes úthossz csökkenését jelenti a belső úthálózaton. (Ha egy optimális járműsűrűség fenntartása a cél a derivált értéke zérus, ekkor nem változik a járművek által elfoglalt összes úthossz.)
Ez a vizsgálati eredmény, a *Lyapunov függvényt alkalmazó* irányítási törvényt ad meg a teljes tartományon, illetve azokon a szubtartományokon, ahol kritikus helyzet lép fel. Az irányítás, a peremeken kifele mutató és a peremeken befele mutató összes fluxus (forgalom) számítása alapján történik. A módszer tartományon történő optimális járműsűrűség fenntartására alkalmas.

Sebességfolyamatokat is figyelembe véve, a módszer közvetlen kapcsolatba hozható a környezeti terhelések optimálásával is, ezért a további kutatások ebben az irányban folytathatók a projektben.

További alkalmazási terület a csomópontok optimális irányítása, a csomópontot körülkerítő zárt görbével határolt tartományt tekintve, a maximális járműszám átáramlásának biztosítása. Ez rámutat arra, hogy a tartományban elhelyezkedő csomópontok optimálása önmagában szükséges, de nem elégséges feltétele a forgalom optimálásának. A tartomány „mögött” is kialakulhat torlódás és hibát követünk el, ha ezt nem vesszük figyelembe.

A csomópontok optimális működtetése további lehetőség, a modell prediktív irányítási (MPC) módszer. Ez olyan numerikus, optimalizáláson alapuló irányítási módszer, amelynél – diszkrét időt feltételezve – a beavatkozó jel jövőbeni étékeit (véges időhorizonton előretekintve) minden diszkrét időlépésben egy előírt célfüggvény optimálása révén határozzuk meg. A célfüggvény értéke függ a rendszer jövőbeni állapotaitól, melyeket a rendszer fent említett modellje alapján, a beavatkozó jelek és a kezdőállapot

függvényében számolni tudunk. Az ily módon működő irányítási eljárás esetén, a programalkotó rendszer már teljesen forgalomtól függő és a fő jellemzője az adaptivitás. A célfüggvény meghatározására számos kritérium adható. Pl. idealizált működés megközelítése: „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. Nyilván, ahol ez építészeti és környezeti szempontokat is figyelembe véve gazdaságosan megoldható, ott ezt célszerű alkalmazni. Az extrém forgalmú bonyolult csomópontoknál ez rendkívül költséges, de egyben lehet gazdaságos megoldás is. Minden más esetben reális követelmény, a csomóponton átáramló forgalom akadályozásának minimálását előírni! Természetesen, szem előtt tartjuk azt is, hogy a jelzőlámpás csomóponti irányításnak léteznek teljesítőképességi határai.

A bevezetőben tárgyalt új szemléletmód alapján minden csomópont a nagy hálózat részgráfjaként jelenik meg, az őt alkotó általánosított szakaszok (ívdarabok, szektorok) kooperációjaként. Modellünk sajátossága tehát, hogy teljes hálózatot vizsgál, amelyben nincs kitüntetett szerepe a csomópontoknak, illetve a kereszteződéseknek. A teljes hálózat optimálásánál ez különleges lehetőségeket biztosít olyan elvek alkalmazására, mint a Bellman-elv, a rendszer pozitív tulajdonsága pedig a tartományok irányításánál, a lineáris Lyapunov módszer alkalmazására.

4.3 Új eljárás fejlesztése

A modellezésre kifejlesztett eljárás jelen állapotában már alkalmas a gyakorlati felhasználásra a városi járműforgalom optimálásánál

A projektben olyan intelligens modell-alkotó rendszer kifejlesztése valósul meg, amely az emberi oldal igénybevételét lehetőség szerint minimalizálja. Fontos feladat egyúttal ezen eszköz ipari alkalmazásának hatékony bevezetése, továbbá az új eredményeknek további kutatásokban és az egyetemi oktatásban történő hasznosítása is.

A modellezés céljaira kifejlesztett hatékony alkalmazásával város szintű optimális forgalomirányítási modellt kívánunk működésbe hozni és javaslatot kidolgozni ennek valós idejű alkalmazására is.

A nagyméretű hálózati modell jelenleg alkalmas a közúti közlekedési hálózatok átfogó modellezésére és analízisére is. A jelenleg kutatásra alkalmas szoftver által reprodukált közlekedési hálózat a valóságnak megfelelően képes – a felmért hálózat paramétereinek ismeretében, azt – a nap 24 órájára vonatkoztatva – szimulálni, majd az eredményeket grafikon formában is rendelkezésre bocsátani. A felvett hálózat egyes elemei tetszőlegesen módosíthatók, ill. a hálózat bővíthető is. Az egyes forgalmi paraméterek változása után beálló állapotot és annak a hálózat egészére gyakorolt hatását is vizsgálhatjuk. A Engineer alkalmazás nagyfokú rugalmassága miatt, valóban költség-hatékony módon végezhetjük el vele az infrastruktúrafejlesztést is.

Az Engineert három fő egység építi fel; a tervezési, a szimuláció-analízis és a vezérlés. Tervezési szakaszban, pontosan elhelyezhetjük az egyes útszakaszokat, parkolókat a különböző forgalombefolyásoló eszközöket, gyalogátkelőhely, kerékpárút, elsőbbségadást jelző táblák, forgalmi jelzőlámpák, stb. A képernyőn ilyenkor látható térképen elhelyezett úthálózati elemek mind egy-egy interaktív felületet jelentenek, melyek paramétereit egyedi ablakokban állíthatjuk be. Az egyes elemekhez tartozó dinamikus disztribúciók és forgalombefolyásoló tényezők, akadályozó-ill. segítő tényezők figyelembevétele a modell alkalmazása során igen nagy szerepet játszik, ezért különös gondot fordítottunk ezekre az algoritmizálás során. A dinamikus kapcsolatot realizáló objektumban identifikálva kerülnek tárolásra. A hálózati elemek hozzáadása során a háttérben a leírt modell szerinti hipermátrix dinamikusan bővül a megfelelő elemekkel; az egyes kapcsolatok, lámpa koordináták stb. beírásra kerülnek.

A szimuláció indításakor jelentős háttérszámítások kezdődnek meg. Ezért a szimuláció megkezdésekor már egy speciális adatstruktúra áll rendelkezésre, amelyet az alkalmazás a leggyorsabb feldolgozhatóság érdekében hoz létre. Szimuláció közben - gyors információt ad - a felvitt útszakaszok terheltségét folyamatosan jelzi, így a problémás útszakaszok nem csak könnyen kiszűrhetők, de a teljes hálózat állapotáról is áttekintést kaphatunk. Mivel az így is tekintélyes volumenű számítások jelentős hardverigényt támasztanak, szükségszerű a megjelenítés és a számítások külön szálakra történő szétválasztása a processzorban. A szimuláció végeztével analízis következik. A kívánt útszakaszok jellemző grafikonjait részletesen vizsgálhatjuk, korábbi teszteredményekkel összehasonlíthatjuk egyazon grafikonban, ill. ezek más szakaszokkal is összevethetők.

Az eljárás segítséget nyújt közúti közlekedési hálózatokon végbemenő járműáramlási folyamatok analízisében, továbbá már tervezési szakaszban az egész hálózatra kiterjedő hatástanulmány is készíthető. Szimulálhatók közlekedési balesetek, forgalomelterelések, vagy forgalmi-rend változások, jelzőlámpa-programozási változások, parkolók létesítésének, megszüntetésének hatása, továbbá a hálózat új útszakasszal történő bővítése, egyes útszakaszok szélesítése stb.

A modellhez kapcsolódó verifikáció megtörtént és különböző kutatási projektekben is sikerrel használták az eszköz nyújtotta lehetőségeket, pl. változtatható irányú forgalmi sávok alkalmazása; sebességprofilok kinyerése alternatív hajtásrendszerű járművek választásához.

Útvonalválasztás optimálása, két tetszőlegesen kiválasztott pont között a különböző szempontok – idő, fogyasztás, útvonal hossza – szerinti optimális útvonalra javaslatot tesz.
Jármű nyomkövetés, egy kijelölt útvonalon haladó jármű menetidő karakterisztikái számíthatók a nap bármely időpontjában meghatározott indulást feltételezve.
Olyan innovatív technikákat is képes alkalmazni a működésében, mint az adaptív lámpák, intelligens online szabályozás visszacsatolással, vagy a zárt görbével körülhatárolt tartomány esetében a görbe menti peremlámpák irányítása egész tartományokba történő behajtás-korlátozás és kilépés engedélyezésének szabályozása.

A modern reprezentációs igényhez igazodva, 3D-s környezetet alakítottunk ki a forgalom-vizualizációhoz. A kifejlesztett módszer emulációs technikát alkalmaz. A számított makroszkopikus folyamatok és valós járműmozgások lekövetése alapján, mikroszkopikus forgalmi folyamatokat állít elő a környezetnek megfelelő háttérképek alkalmazásával. Architekturális és performancia szempontjából is előnyös, hogy ezt a forgalom-vizualizációt nem a szimulációs rendszerbe integráltuk, hanem egy külső alkalmazást, Traffic Visualization-t fejlesztettünk ki a feladatra.

4.4 Környezetterhelés számítása

Lehetőség van a *városi trajektóriák menti környezetterhelés analízisére a közúti járművek károsanyag-kibocsátásának modellezésével, gyorsított módszert is alkalmazni és így vizsgálni az emisszió csökkentésének lehetőségét.*
Ennél a vizsgálatnál, a járműforgalom emissziós környezeti hatásának a becslése a feladat, többkritériumú optimális forgalomszabályozás kialakításához. A jármű-emissziós modellek előzetesen definiált emisszió térképek alapján számítják a kibocsátott károsanyagok mennyiségét. Ugyanezen az elven előre definiálhatunk fogyasztási térképeket is és számíthatunk fogyasztást is. Mivel a fogyasztás a járműves mérés során is rögzíthető, ez lehetőséget ad a számítással nyert fogyasztás validálásra is. Az alkalmazás során egyedi jármű-emissziós modellt és a nagyméretű hálózatra kidolgozott közúti forgalmi folyamatot leíró modellt kapcsoljuk össze, felhasználva a trajektoriák mentén számított sebesség profilokat. Ez a validálás, a forgalomra jellemző sebességek figyelembevételével történik. Ezt azonos trajektória mentén szimulált, és mért sebességfolyamatokra dolgoztuk ki, biztosítva az azonos forgalmi körülményeket és azonos időszakokat, *Bede, Péter; 2010.1*., *Bede, Péter; 2010.2*.
A vizsgálat a motorteljesítmény és fogyasztási értékekre vonatkozik. A járműmodell bemenete a forgalmi szimulációból nyert sebességprofil. Ezzel párhuzamosan elvégzett valós mérésnél történik a

motorteljesítmény és fogyasztás mérése és a sebességprofil meghatározása is. A validálás nemparamáteres statisztikai vizsgálattal, u.n. homogenitás vizsgálattal és korrelációs analízissel történik. A járműmodellek, járművenkénti egyedi sebességprofillal dolgoznak és ezekből a sebességprofilokból származtatható a kibocsátott károsanyagok mennyisége.
Esetünkben a járműmodell három, sorba kapcsolt modulból áll: Vezető modul, Jármű modul és Emisszió modul.
Vezetőmodul: Mivel a járműmodul bemenete gyorsulás, ezért szükség van a vezetőmodulra, amely a sebességprofilnak megfelelően előállítja a gyorsulásfüggvényt a járműmodul számára. A vezetőmodul egy egyszerű szabályozó, amely a számított járműsebesség és a sebességprofil pillanatnyi eltérés-értékei alapján egy hibajelet képez és ezt a hibát minimalizálja. Ennek eredményeként gyorsítja, vagy lassítja a járművet.
Járműmodul: Fontos kiemelni, hogy a járműmodul csak a hosszirányú dinamikát tartalmazza. A járműmodul bemenete egy gyorsulás érték, amely meghatározott maximum és minimum érték között bármilyen valós szám lehet. A járműmodul kimeneteként a jármű és a modellezett járműrendszerek bármelyik állapotváltozóját ki lehet vezetni. Vizsgálatunk szempontjából elsősorban a motor üzemállapota a lényeges. Ebből adódóan a járműmodul kimenete a motor fordulatszáma és a nyomatéka. Ezeket a jeleket az emisszió modul dolgozza fel és az előzetesen definiált emisszió térképek alapján adja meg a kibocsátott károsanyagok mennyiségét.
Maga a járműmodul alapvetően három részből áll: a *járműdinamikai blokkból*, a *hajtásrendszer blokkból* és a *fékrendszer blokkból*.
A járműdinamikai blokk: tartalmazza az abroncsmodellt is. A gumiabroncson keresztül tud mind a hajtás, mind pedig a fékrendszer erőt kifejteni a jármű és az útprofil között. Ezáltal lehet gyorsítani és fékezni a járművet. A gumiabroncs segítségével lehet a legpontosabban figyelembe venni a tapadás által meghatározott korlátokat. Az abroncsmodell tartalmazza a gördülési ellenállást is. A járműdinamikai blokk számítja ezen kívül a légellenállást is. A kocsi testre ható összes erő összegzésével számítja ki a jármű pillanatnyi gyorsulását, amelyből integrálással lehet a sebességeket és a mozgásfüggvényeket meghatározni. *A hajtásrendszer modellje:* tartalmaz egy nyomatéki karakterisztikát, amelyből az aktuális terhelés és motorfordulatszám alapján határozza meg a pillanatnyi nyomatékot. Ezt a nyomatékot a nyomatékváltó és a véghajtás módosítja, így jut a nyomaték a kerekekhez. *A fékrendszer:* is egyszerűsítve működik, a negatív lassuláshoz egy fékezőnyomatékot rendel az algoritmus.
Az emisszió modul: egy algoritmus, amely a különböző emisszió-térképekből a motor üzemállapota alapján interpolálással határozza meg az adott időpillanatban kibocsátott különböző károsanyagok mennyiségét.
A járműszimuláció történhet az Advisor (Advanced Vehicle Simulator) nevű szoftver segítségével is, amely egy Matlab/Simulink környezetben írt modell. Manapság széles körben elterjedt ez a szoftver, mivel nem csak hagyományos (könnyű és nehéz), hanem hibrid, illetve üzemanyagcellás járműveket is képes szimulálni és elemezni. Az ADVISOR bármilyen módosítás hatását meg tudja vizsgálni, legyen az alkatrész változtatás (pl.: motor, akkumulátor, katalizátor, légkondicionáló stb.) vagy egyéb módosítások, melyek kihatnak a gazdaságosságra, teljesítményre vagy emisszióra. A szoftver alapvető fizikai számításokat és mért komponens teljesítményeket használ a járművek modellezéséhez. A felhasználó definiál egy járművet az adatokat felhasználva, illetve meghatároz egy sebességprofilt, valamint egy útminőséget, majd a jármű leköveti azt. Eredményként a várható nyomatékot, sebességet, feszültséget, áramot és teljesítményt kapjuk meg.
Mindegyik emisszió modell alapja egy adatbázis, amelyet felhasználva a jármű vagy a motor üzemállapota alapján számíthatjuk a kibocsátott károsanyagok mennyiségét. Ezeknek az adatbázisoknak a létrehozása mérések ezreinek az elvégzését követeli meg. A modell kiválasztásának elsődleges szempontja, a szükséges adatbázis hozzáférhetősége. Az egyik ilyen hozzáférhető adatbázis az Artemis modell, *André, et al.; 2008*.

A kumulátor blokk minden egyes kategóriára meghatározza az emissziót, ezeket az értékeket megszorozza az adott kategóriára megadott aránnyal. Ezeket a szorzatokat károsanyagonként kell összegezni, és így kapjuk meg az adott járműösszetételre és sebességre jellemző egységnyi távolságra (*km*) kibocsátott károsanyagok mennyiségét.

Az emissziós modellek általában, sebességváltási modellek szimulációi alapján, kiszámítják az egyes járművek fogyasztását és károsanyag kibocsátását. Esetünkben az emissziós modell bemeneti

paraméterei tehát a járműmodulból nyert $n_i(t)$ és $M_i(t)$ motorfordulat és nyomatékértékek, a kimeneten pedig a tüzelőanyag fogyasztást nyerjük, a *HC*, NO_x, *CO* és dízel járművek estén *PM* kibocsátást.

Az emissziós modell lelke az Advisor programból nyert emissziós térképek sora *Wipke, et al.; 1999*. Ezek a térképek a terhelés és fordulatszám függvényében tartalmazzák a tüzelőanyag fogyasztás, a szénhidrogén kibocsátást, a szén-monoxid, nitrogén-oxid kibocsátást és dízelmotorok esetén a részecske kibocsátást konkrét motorokra. Ezek az emissziós értékek nyersek, tehát semmiféle kipufogógáz kezelő berendezésen nem haladtak keresztül. Nyilvánvaló, hogy az egyre szigorodó emissziós normákat csupán motorikus fejlesztésekkel nem lehet betartani, ezért a forgalomban lévő járművek kipufogógáz kezelő eszközökkel vannak felszerelve – hármas hatású katalizátor, NOx tárolós katalizátor, SCR katalizátor, stb – melyeket szintén számításba kell venni a kibocsátás modellezésekor.

Összefoglalva: az általunk alkalmazott nagyméretű hálózati modellből korábbi validálások alapján, kinyerhetők a trajektóra menti sebességprofilok, amelyek a valóságnak megfelelően bonyolultak, összetettek, gyorsulások, lassulások és gyakori megállások sorozatából állnak. A valóságos folyamatok ilyenek, amelyek eltérnek a laboratóriumban, a görgős fékpadon alkalmazottaktól. Az új európai menetciklus (NEDC), az EU-ban jóváhagyott laboratóriumi teszteket alkalmaz, amelyeknek kiindulópontjai két európai főváros (Párizs és Róma) forgalmi adatai voltak. A valóságban azonban a járművek károsanyag kibocsátása nagymértékben függ a vezetési stílustól, továbbá nagy hatással van rá az adott forgalom alakulása is! Jelentős eltérések léphetnek fel a különböző régiókban és országokban is. Ma már egyre több helyen alkalmaznak zárt láncú forgalomszabályozást. A különböző csomópontokban elhelyezett detektorok információit feldolgozva úgy szabályozzák a jelzőlámpák működését, hogy az optimális legyen a járműfolyamot tekintetében. A projektben a környezetterhelés optimálására is új szabályozási módszert kívánunk kidolgozni, a valós forgalomban elhaladó járművek kategóriáinak azonosításával és a jellemző sebességprofil figyelembe vételével meghatározott emissziója alapján. Természetesen a módszert mérések sorozatával is validálni fogjuk.

5. ÚJ ELVŰ FORGALOMMÉRÉSEK

Trajektóriák mentén fellépő dinamikai hatások komplex analízise járműsokaság esetében. A dinamikus folyamatok analízise, adatelemzés, a járművek és környezet dinamikus terhelések csökkentése

A vizsgálatok új komplex modellt alkalmaznak a közúti közlekedés forgalmi folyamatainak és a térbeli nemlineáris járműdinamika együttes analízisére. Ez alapján, a hálózati forgalmi folyamatok és a hálózatokon közlekedő 3D–s járműdinamikai folyamatok egyesített rendszerben történő analízisét valósítjuk meg. Ennek során, a tetszőleges méretű és topológiájú közúti hálózat speciális matematikai modellezési technikáját használjuk fel. A járműsűrűség állapottérben vizsgáljuk a komplex forgalmi rendszer működését. A szimuláció a PannonTraffic Engineer szoftver alkalmazásával történik, amely szoftvercsalád a nagyméretű közúti közlekedési hálózatok komplex modellezésére és analízisére kifejlesztett eszköz. A gépjárművek összetett, nemlineáris dinamikus modellezéséhez számítógépes algebrai módszert alkalmazó intelligens modell-alkotó rendszer kifejlesztését mutatjuk be. Ennek felhasználásával, az emberi oldalon fellépő modell-tervezés időszükségletét minimalizáljuk. A rendelkezésre álló hálózati IT eszközök és a járművekbe beépített számos elektronikus és elektromechanikai alkatrésznek köszönhetően a komplexitásra kitűzött célok java része ma már elérhetők. Fontos feladat lesz majd az új eszközök ipari alkalmazása, ill., bevezetésének a vizsgálata is, továbbá az új eredményeknek az egyetemi oktatásban történő hasznosítása is.

Kiemelendő, hogy a valós közúti trajektóriákon történő járműmozgás és a forgalmi események számos olyan összetett dinamikai folyamatot eredményeznek, ill. helyzetet idéznek elő, amely a kutatás jelentőségét kiemeli és az általunk tárgyalt módon modellezhető. Ilyen például a járműgeometria anomáliák elemzése a trajektóriák mentén (pl. körgeometriában való haladásnál). Ez esetben a nagyméretű hálózati modell egy részhálózati eleme a körforgalmi elem, amelyen valamely trajektória választáskor áthalad a jármű. A Zalaegerszegen megépült körforgalmakban számos esetben

megfigyelhetők a valós tehergépjárművek és autóbuszok okozta ilyen típusú legkritikusabb konfliktusok**.** Ezek a konfliktusok a valós trajektórián fellépő járműdinamikai folyamatok körébe tartoznak. Gyakran detektálható, hogy a tehergépjárművek ívben haladásakor az üldözőgörbe a szomszédos forgalmi sávok területeire is kiterjed, ezért ezekre a kockázatokra a tehergépjárművek, autóbuszok és a közlekedő partnerek dinamikai folyamatainak vizsgálatainál különös figyelmet kell fordítani. A vizsgálatok szélesebb körben kiterjednek a hálózat szerkezetében rosszul tervezett trajektóriák, hibás útfelületek, extrém körülmények okozta váratlan kockázatok analízise és a veszélyek kiszűrésére. Minden esetben felmerül az optimális járműirányítás szerepe is ezen a területen!

Ugyanez megállapítható a káros anyag kibocsájtások (pl. karcinogén aeroszol) környezeti terheléseire és a járművek környezet dinamikus terhelései vonatkozásában is a hossz, függőleges és keresztirányú járműdinamikák hatásaival kapcsolatban.

A környezet-kutatásban az úttest dinamikát és a rezgéseiből fellépő károsodások folyamatainak vizsgálatát emeljük ki. Megjegyezzük, hogy ezen a területen is kiemelten fontos a változó forgalom és sebességfolyamatok szerepe, ugyanis ennek következtében még a homogénnek tekinthető úttest esetében is, különböző pontokban, különböző károsodási folyamatok lépnek fel és figyelhetők meg.

A feladatot összefoglalva: A tárgyalt közlekedési hálózati állapot-modellből kiindulva, analitikus megoldást tudunk adni a sávszakaszokra vonatkozó folytonos sebességfolyamatok és folytonos gyorsulásfolyamatok meghatározására. Ez alapján, felírhatók a hálózat tetszőleges trajektóriáján, a trajektória-irányú sebesség és gyorsulás folyamatok. A fentieket és a trajektória geometriáját figyelembe véve egyúttal a keresztirányú gyorsulásfolyamatok is felírhatók. A módszer figyelembe veszi a teljes hálózaton a valóságos forgalmat és a forgalomirányító lámpák tényleges működését. A vezetők reakcióidő-késedelem idejét, a teljes hálózat szerkezetét és a parkolók valós hatását is. Figyelembe vesszük az így nyert valós sebességfolyamatok karakterisztikus hatását is - a Michelberger féle spektrum-torzulást – a sztochasztikus útprofilok előállításnál, amelynek meghatározó szerepe van a függőleges jármű-dinamikánál. Az így nyert valós gyorsulásfolyamatok hatása meghatározó jelentőségű a függőleges, a hosszirányú és keresztirányú jármű-dinamikánál.

Computer-algebrai modellezési technikán alapuló térbeli komplex jármű modellt hoztunk létre a jármű és úttest gyorsulásterhelések analízisére. Ez figyelembe veszi, a hálózati állapot-modellből nyert, a trajektóriákra vonatkozó hosszirányú sebesség továbbá hossz és keresztirányú gyorsulás-folyamatokat is. A munka gyakorlati eredményeként, kiszámítható a kiválasztott trajektória mentés az s(t) út-idő diagram, amely meghatározza a gépjármű tartózkodási helyét is a t időpontban. A fentiek alapján, a komplex hálózati forgalmi modell már fontos adatokat szolgáltat a jármű és útdinamikai vizsgálatokhoz is. A komplex modell optimális irányítása is modellezhető. A bemutatott analízis a gyorsasága és nagyszámú járműre vonatkozó statisztikai szolgáltatása miatt, gyakorol fontos hatást a további járműipari kutatásokra is.

6. ÚJ ELVŰ KOMPLEX KÖRNYEZETMÉRÉSEK ÉS FEJLESZTÉSE

Ebben a munkapontba és innovatív fejlesztésekbe bevonandó **Czitrovszky Aladár és munkatársai, valamint Akusztika Kft.** Az optimalizált közlekedés kedvező hatása a légszennyező anyagok kibocsátásban is megmutatkozik. Várható, hogy a kritikus légszennyezőanyagok koncentrációjában is kimutatható lesz a kedvező hatás. Ezen összefüggés mértékét több méréssorozattal lehet nyomon követni és vizsgálni. A környezeti levegő mérésének célja, hogy a jelenleg is üzemeltetett nemzeti mérőhálózat adatait kiegészítve mobil mérésekkel megállapítsunk a szezonalitás-függő dinamikus légszennyezési állapotjellemzőket a vizsgálandó közlekedési vonalak, csomópontok mentén. A mérendő komponensek a közlekedés eredetű kritikus szennyező anyagokat NOx, NO_2, CO, PM_{10}, és meteorológiai adatokat. A mérési módszerek szabványos referenciamódszerek. Az alapmérések kibővített információt szolgáltatnak a forgalomszámlálásokból származó adatok és légszennyezettség összefüggéséről. Ezek a vizsgálatok nyújtanak segítséget abban, hogy megállapítható legyen, mely csomópontok környezetében ajánlott telepíteni az intelligens, zöld irányítási rendszer fix levegőminőség monitorozó elemeit.

Az intelligens, zöld közlekedésirányítás lényeges eleme, hogy környezeti adatok monitorozása révén van lehetőség beavatkozni a forgalomirányításba. Az irányítási rendszer része egy kitelepített folyamatos részecskemonitor, mely regisztrálja a szennyező részecskék darabszámát, tulajdonságait és visszacsatoló információt küld az integrált informatikai rendszeren keresztül a forgalomirányításnak. A telepített monitorozó rendszer méréseit a rendszer tesztje és kezdeti működtetése során referenciamódszerekkel történő szabványos mérésekkel hasonlítjuk össze. Ezzel alátámasztva az üzemszerű és megfelelő működést, továbbá a telepített monitorrendszer adatainak minőségbiztosítását. Az összeméréssel történő „megfelelő működés" igazolására a tesztüzemeltetés során nagy hangsúlyt fektetünk. A részecskéken kívül a közlekedés eredetű gázkomponenseket is monitorozzuk, hogy teljes képet kapjunk a forgalomból adódó levegőterhelésről.

A jelenlegi Légszennyezettségi Mérőhálózatok (OLM), olyan szabványos mérési módszereket és műszereket alkalmaznak, amelyek ***nem adnak lehetőséget különböző szennyező-források azonosítására, mivel*** a koncentrációk ***integrális*** értékét ***határozzák meg***, ugyanakkor szükség lenne a különböző forrásokból származó kibocsátások felmérésére és azok feltérképezésére, amely lehetővé tenné a különböző forrásokból származó, különböző frakciójú és összetételű szennyeződések mennyiségének és azok arányainak meghatározását. Ehhez új mérési módszerek alkalmazására, forrás-azonosítási algoritmusok kidolgozására és új lokális monitorozó hálózatok kiépítésére van szükség a szennyező források környezetében.

A projektben az általunk kifejlesztett új mérési módszerek, műszerek, algoritmusok és protokollok alkalmazásával lehetővé válik a különböző forrásokból (pl. a forgalomból és az ipari üzemekből) származó aeroszol frakciók koncentrációjának és azok arányainak számszerű meghatározása, ennek megfelelően azonosíthatók a szennyezőforrások és felmérhető azok intenzitása, feltérképezhető a szennyeződések terjedése.

A projekt résztvevői által javasolt és kidolgozott két-hullámhosszú négydetektoros (előre-hátraszórást mérő) lézeres aeroszol részecske analizátor (Dual Wavelength Optical Particle Spectrometer - DWOPS) egy olyan új fejlesztés, amely az általunk javasolt módszer alapján lehetővé teszi az eddigiekhez képest, új aeroszol részecske-paraméterek egyidejű meghatározását - pl. a komplex törésmutatóét, amelynek imaginárius tagja nagyban különbözik a fémes és nem fémes, illetve kormot tartalmazó- vagy szulfát-részecskék esetén, a törésmutató valós része pedig a fénytörési tulajdonságokat jellemezve, összefüggésben van az aeroszol részecskék összetételével és struktúrájával (A. Nagy, W. W. Szymanski, A. Czitrovszky, C. Schindler, P. Jani: Modelling of a dual wavelength optical system for the estimation of the refractive index of aerosol particles in APC, ***Journal of Aerosol Science***, vol. 32, pp.1028-1029, 2001., W. Szymanski, A. Nagy, A. Czitrovszky, P. Jani: A new method for the simultaneous measurement of aerosol particle size, complex refractive index and particle density. ***Measurement Science and Technology***, vol. 13, pp. 303-308 2002.).

A kifejlesztett műszer másik előnye, hogy a hagyományos műszerektől eltérően, igen rövid (néhány perces) mintavételezési idővel egyidejűleg meghatározható 5 olyan paraméter, amely lehetőséget ad a légkörben együtt jelenlévő különböző forrásokból származó és ezért különböző paraméterekkel rendelkező aeroszol frakciók megkülönböztetésére és ezek egymáshoz viszonyított számszerű koncentráció-arányainak meghatározására.

A harmadik előny, hogy a mérések után nincs szükség utólagos analízisre vagy kiértékelésre - az eredmény közvetlenül a méréssel egyidejűleg jelenik meg. A berendezés mobilitása és, szükség szerint, autonóm tápellátása, lehetőséget ad egy mozgó laboratóriumba (mikrobuszban) való beépítésre és folyamatos mérések megvalósítására. Szisztematikus méréssorozat elvégzése által, a városi hálózatra is felvihető a szennyezési források megoszlása.

A mérési eljárás ennél az új módszernél azon alapul, hogy két különböző hullámhosszú lézersugárral hozunk létre egy-egy mérő-térfogatot, és több irányból mérjük az ezen áthaladó részecskék fényszórását. A részecskék áthaladását a mérendő térfogaton egy szűrt, tiszta levegővel aerodinamikusan fókuszált minta-aeroszol áramból mintavételezzük, közben folyamatosan mérve az aeroszol áram térfogatát. A

minden egyes részecskéről két hullámhosszon, több irányban (előre- és hátra-szórásban) megfigyelt szórt intenzitásból, több paraméter határozható meg, mint a 90º-os szórásból, amelyet a hagyományos részecske-számlálókban egy hullámhosszon mérnek. A mérő-térfogatot a különböző hullámhosszú lézersugarakból megfelelő fókuszálással hozzuk létre, oly módon, hogy a mérendő részecskék izointenzitású felületen haladjanak át. Ez lehetővé teszi a már említett komplex törésmutató meghatározásán kívül az aeroszol részecskék méreteloszlásának mérését is.
A tervezett mérések során, más mérési módszereket is alkalmazunk – optikai részecskeszámlálókkal mérjük az aeroszolok számszerinti koncentrációját, amelyet összehasonlítunk a hagyományos gravimetriás, vagy béta-sugaras pormonitorok tömeg-koncentráció adataival (az átlagos sűrűség ismeretében a számszerinti koncentráció átszámítható tömeg-koncentrációra).
A mérések előtt elvégezzük a különböző elven mérő műszerek kalibrálását, összemérését, és validálását.

A méréseket mind lokálisan telepített, mind mobilis (mikrobuszba épített) mérőállomásokkal kívánjuk elvégezni, ami lehetővé tenné a forgalmas útvonalak és azok környezetének levegőszennyezettségi monitorozását és a vizsgált trajektóriák teljeskörű jellemzését, oly módon, hogy szétválasztható volna a fogalomból és az egység szennyező forrásokból származó frakciók azonosítása és az ezekhez tartozó koncentrációk számszerűsítése is. Ez lehetővé teszi a forgalom intenzitása és összetétele, valamint az ezzel kapcsolatos légszennyeződés korrelációjának vizsgálatát/meghatározását az adott nagyvárosi környezetben.

A tervezett méréseket kükönböző évszakokban, más-más meteorológiai körülmények között végezzük el, ezek feldolgozásából és elemzéséből határozzuk meg a jellemző adathalmazokat és dolgozzuk ki a megfelelő koncentráció-csökkentési protokolokat (cost-benefit elemzések).
Mindez lehetővé teszi az aktuális környezetvédelmi adatokon kívül a jellemző évszakos változások és trajektóriák meghatározását is.

7. DRÓNOS MÉRÉSEK ALKALMAZÁSA ÉS KAPCSOLÓDÓ INNOVATÍV FEJLESZTÉSEK

Ebben a munkapontba és innovatív fejlesztésekbe bevonandók az Óbudai Egyetem (OE) **és a ZalaZone munkatársai is.** A fejlesztésnél fontos egy validált univerzális mérőmodul alkalmazása, amely a szükséges légköri összetevő értékét határozta meg a levegőben valós időben. Fontos, hogy a mérőmodul szenzorjai széles határok közt cserélhetők legyenek, így lehetőség nyíljon új felhasználók esetében további speciális igények kiszolgálására is. Fontos a drón képalkotó alkalmazásinak egy jelentős szegmense, az ortofotók készítése is. Erre a célra jellemzően, speciális stabilizált kamera felfüggesztésre van szükség. Az elkészített felvétel minőségi követelménye az, hogy a kép a Google Earth műholdképére is illeszthető legyen továbbá az is, hogy a kép alkalmas legyen a rajta látható objektumok kiterjedésének mérésére is. A kép felbontásának lehetővé kellett tennie, tetszőleges méretű személygépkocsi objektum felismerését is. Megoldottnak kell lenni a távirányítás megbízhatóságának növelésének is és a szigorúan vett elektronika, illetve vezérlés megbízható áramellátásának is. A repülési idő min. 1-2 óra között mozogjon. Nagy biztonsággal kell, hogy történjen a fedélzeten mért jellemző adatok és a telemetriai adatokat tárolása és továbbítása is a földi központ felé is. A kidolgozott és alkalmazott módszer több, konkrét kutatási feladat megoldása során kerüljön már tesztelésre is. Adott területekre összefüggő felvételeket kellett elkészítenie, hogy a mérésnél nyert képek feldolgozása egyetlen nagyméretű ortofotót eredményezzen. Ezen eszköz rendszerszintű alkalmazását természetesen oly módon kell szabályozni, hogy egyben lehetővé kell tenni ennek jogszerű használatát is.

Fontos, hogy alkalmas legyen a légszennyezettség mérésére és 3D megjelenítésére kidolgozott eljárás és eszköze (a P1300413 sz. szabadalmi szám alatt)
A mérés egy olyan adatgyűjtő és az adatokat célszerűen feldolgozó alkalmazás legyen, amely képes a környezet és a mért jellemzők háromdimenziós ábrázolására, illetve az időt, - mint negyedik dimenziót felhasználva - a mért adatok változásainak vizsgálatára is. Az eszköz fő jellemzője legyen, hogy kis kiterjedésű - néhány négyzetkilométer területű - alacsony magasságú - néhány 100 méter - térrészben

pontos mérési eredményeket szolgáltasson, melyeket kis időközönként - akár 15 perces ismétlési periódussal - frissíteni is képes legyen. A rendszer által szolgáltatott adatok elemzése alapján azonnali információhoz lehessen jutni az adott terület szennyezettségét illetően, valamint a szennyezettség időbeli változását is figyelembe véve. A hordozó eszköz és annak fedélzetén elhelyezett nagy intelligenciájú mérésadatgyűjtő-rendszer, valamint az adatok elemzését végző szoftver együtteséből álló rendszer, képes legyen a horizontális és vertikális pozíciók rögzítése alapján, a környezet jellemzőiről mérési adatokat rögzíteni, pl. páratartalom, hőmérséklet, szálló por, sugárzás, vegyi szennyezettség stb. Az így rögzített adatok feldolgozása során 3D térkép álljon rendelkezésre, mely jól szemlélteti a vizsgált szennyezettség eloszlását és ismételt mérések esetén a terjedési irányát és sebességet is. Az Intelligens mérőmodul, magába kell, hogy foglalja a levegőben mérni kívánt szennyezők érzékelőit, a mért adatok elő-feldolgozását, átmeneti tárolását biztosító mikrokontrollert, valamint az adatok valósidejű továbbítását biztosító MODEM egységet. A mérőmodul a térbeli pozíciót, a légnyomásból számított magasságot és sebességet közvetlenül a repülőeszköz repülését biztosító repülésstabilizáló egységtől kapja és a szenzorok által mért adatokkal egyesítve egy speciális struktúrájú adatsort állítson elő. A legfontosabbak a modul esetében, az alábbi légköri alkotóelemek, illetve szennyezőkre vonatkozó mérésének elvégzése: Oxigén (O_2), Ózon (O_3), Szén-dioxid (CO_2), Szén-monoxid (CO), Nitrogén-dioxid (NO_2), Nitrogén-monoxid (NO), hőmérséklet, vízpára, szálló por, gammasugárzás, UVA sugárzás, UVB sugárzás.

Hasznos, ha a mérőmodul legalább további 10 szenzor fogadására is képes, illetve a gázérzékelők cseréjével más gázok mérése is megvalósítható, mivel ez a nagyfokú szabadság széleskörű további felhasználást is biztosíthat. Szükséges, hogy a mérőmodul vezérlőelektronikája közvetlen kapcsolatban álljon a hordozó vezérlő elektronikájával, ahonnan a légnyomás, sebesség, GPS valamint inerciális adatokat is kaphat, mivel ezeket az adatokat rendeli a mérőmodul az egyes szenzor-adatokhoz. A hordozó drón fedélzeti elektronikája az eszköz önálló repülését is lehetővé teszi, ami biztosítja azt, hogy a berendezést biztonságos távolságból lehessen indítani, de a mérést az emberre nézve veszélyes területen is el lehessen végezni.
A fentiek alapján, a kisméretű robotrepülőgépek olcsón és gyorsan szállíthatók a felhasználás helyére. További előnyük, hogy nem szükséges közvetlenül a megfigyelni kívánt helyszínhez szállítani, elegendő annak egy jól meghatározható körzetéből indítani. Az így nyert légifelvételek, vagy élő videók, alkalmasak a hálózaton kialakuló forgalom, járműsűrűség, járműösszetétel és sebességek, valamint környezeti terhelések kapcsolatainak hatékony elemzésére.

Felhasználható még természetesen egyéb területeken is, amelyek szintén kihatnak a környezetterhelésekre is, pl. baleset helyszínének átfogó elemzésére és a kialakult torlódások feloldására célirányos forgalomterelésekhez, alternatív útvonalak megadására.

Az analízisek terén tehát, egy átfogó, valós idejű képi információ nagymértékű segítséget jelent. Ennek az információnak mind a forgalomirányítás, mind az utak környezetterhelése számítása során igen nagy szerepe van. Kimutatható a sávonkénti haladási sebesség is, amely további tervezési teret jelent a zöld optimális irányításhoz.
A robotrepülőgépes rendszerek a felszíni közlekedés környezetterhelésének mérésében nagyon hatékony segítséget nyújthatnak. Megfelelő szenzorokkal felszerelt repülő eszközök alkalmasak egy útszakasz vagy forgalmi terület térbeli légszennyezésének kimutatására

Végezetül, az eszköz rendszeres használata esetén, a szennyező anyagok eloszlásának időbeli változása is monitorozható.

8. AZ ÁLTALUNK ALKALMAZOTT KOMPLEX KÖZLEKEDÉSDINAMIKAI MODELL VALIDÁLÁSA, VIZSGÁLATA ÉS AZ ADATOK TÁROLÁSA

A felszíni közlekedés egy rendkívül komplex dinamikus rendszer. Ennek korszerű vizsgálata is komplex módszereket igényel. Ma már elválaszthatatlan a hálózati folyamatok és a hálózatokon közlekedő járművek egy rendszerben történő vizsgálata.
Ez a környezet – annak ellenére, hogy makroszkopikus a modell – alkalmas lesz arra is, hogy a valós közlekedési folyamatokat, lámpákat, torlódásokat stb., figyelembe véve, egy tetszőleges indulási időpontban a hálózat bármely A pontjából egy, kiválasztott B pontjára történő valós eljutási folyamatot leírjon, T. Peter, and M. Basset 2009. Ez, az útvonal ajánlásokon kívül az intelliges jármű vizsgálati területen is fontos eredmény, pl. a gépjárművek dinamikai analízise, méretezése, környezeti terhelése, emisszió vizsgálatok stb. vonatkozásokban, mivel a különböző időpontokban és helyeken nagyszámú járműre rendkívül gyorsan elvégezhetők a számítások.

8.1 A modell validálása

Az általunk alkalmazott modell és kifejlesztett szoftver **első validálása Budapesten történt** a Petőfi híd és Nyugati térig terjedő körúton, Peter, Fülep and Bede 2011. Ez, a lámpás kereszteződéseknél aktuális lámpa-programok beállítási adatok mellett és a helyszínen elvégzett forgalomszámlálási adatok alapján történt. A vizsgált útvonal a különböző szimulációs időpontokban bejárásra került GPS készülékkel felszeret gépjárművekkel is. A járműves mérés során rögzítettük a valódi 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 ezt 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 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 **második igen fontos modell-validálás Győr városközpontban történt** és a modell a legnagyobb forgalmat lebonyolító Szent István út (1. sz. főút) és környéke területét foglalta magában. A validálás a mért és számított keresztmetszeti forgalmi adatok vizsgálata alapján történt.
Ez a forgalmi modell természetesen fontos szerepet játszik majd a továbbiakban, a környezetterhelések vizsgálatainak szempontjából is. A validálásnál figyelembe vett hálózatot jellemző fő adatok: 228 db útszakasz, 9 jelzőlámpával irányított csomópont, 38 egyéb csomópont, 18 input szakasz és 15 output szakasz. A forgalmat irányító jelzőlámpák fázisterveit a Magyar Közút Zrt. Győri Igazgatósága és Győr város Önkormányzata bocsátotta a rendelkezésünkre. A modell adatoknál támaszkodtunk a város által 2012. évben elvégzett keresztmetszeti forgalommérésekre. A modellünk esetében, 63 keresztmetszeti mérési adatot vettünk figyelembe a vizsgálatoknál és a validálásnál.
A szimuláció 24h-s időtartamra vonatkozó futtatási ideje 2 perc 14 másodperc. A validálást követően a mért és modell alapján számított, óránkénti keresztmetszeti forgalom közötti korrelációs együttható $r_{xy}=0.9925070033$ értéket adott, amely a gyakorlatban már 100%-os korrelációnak tekinthető.

8.2 A város forgalmi analízise

Ez magában foglalja a kritikus városrészek modellezését és ezeknél a monitoring tevékenységet is. A városban ez kiegészül a szükséges felvilágosító intézkedések meghozatalával és ennek dokumentálásával, amely párosul a városvezetések politikai támogatásával is. A kutatási projekt eredményei között a város esetében nem elhanyagolandó a légszennyezés elleni stratégia kidolgozása is, amely fontos az éghajlatváltozás elleni intézkedések körében is az adott városi környezetben. Fontos a városok közúti forgalmi folyamatainak vizsgálatánál egy átfogó rendszerterv elkészítésére, az intelligens városi hálózati közlekedéséhez.

A rendszerterv elkészítésével a projektben kiemelten fontos cél, az innovatív megoldások meghatározása a kooperatív zöld hálózati irányítás területén, a multimodális közlekedési szolgáltatások biztosítása, valamint a biztonsági alkalmazásokra és a környezetterhelési veszélyre történő figyelmeztetések. A rendszertervben a város szerkezeti analízise struktúra-analízis, továbbá folyamatanalízis is történik az alábbi célok érdekében:

1.Új, tartományszintű zöld irányítási lehetőségek feltárása, (amelyek vonatkozhatnak járműsűrűsége és környezetterhelésre is)
2. MPC alapú optimálások lehetőségeinek feltárása
3. Változtatható forgalmi sávok alkalmazási lehetőségeinek feltárása
4. Kettős irányítások feltárása, optimális trajektóriákon IDM csoportok átvezetésére, modellezés szempontok (érzékenységvizsgálat, rendeléscsökkentés, a jármű-vezető modellező alkalmazás)
5. Biztonsági alkalmazások rendszertetve és a veszélyekre történő figyelmeztetések hatásának nyomkövetése.

8.3. Adatbank létrehozása

A naprakész egységes közlekedési hálózati forgalmi és környezetterhelési informatikai adatbázis és erre rászervezett szabályozott szervezeti kapcsolatrendszer számos előnyt és új lehetőségeket biztosít. A fejlesztésénél nagyon fontos az információhoz való gyors és egyszerű hozzáférés. Az újonnan kialakítandó rendszernél alapvető szempont, a már működő rendszerek tapasztalatainak felhasználása is, pl., European Transport Information System.
A klasszikus adatszolgáltatási körből hiányoznak azok az értékes információk, amelyek a közlekedési hatóságok, biztosítók és civil szervezetek működése során válnak ismertté. Ennek érdekében, rendszerszemléletű, káros környezetterhelési folyamat-analizátort is beépítünk a rendszerbe.
A fenti struktúrában a hálózati folyamatok online tárolása valósul meg. Erre épül rá az irányítási, a monitoring és szakértői-rendszer. Az utast, vezetőt, lakosságot tájékoztató publikus rendszer. Mindezeknél kihasználva a nagypontosságú, dinamikus térképek közlekedési -környezeti alkalmazásait, a fejlett GNSS-t és a számítási felhőn alapuló technológiákat.

Az adatfeldolgozáshoz vegyes mérőrendszerekre támaszkodó, forgalmi adatgyűjtő technológia fejlesztése.
Fontos cél a térben és időben különböző helyen keletkezett, különböző típusú és relevanciájú forgalmi és környezeti adatforrások hatékony, forgalomtechnikai felhasználhatóságának vizsgálata is. A projekt keretén belül, a következő forgalmi adatok együttes alkalmazhatóságát vizsgáljuk.

Fontos környezeti adatforrások: A meglévő városi automata mérőhálózat adatai (CO, CO_2, NOx-NO_2, SO_2, O_3 PM_{10}). A saját mobil mérőrendszerekkel végzett környezeti levegő mérések az EU-ban elfogadott referenciamódszerek alapján (CO, CO_2, NOx-NO_2, SO_2, O_3 PM_{10}, meteorológiai adatok)

A közlekedési hálózattal kapcsolatos további adatok: Szükségesek a floating car adatok, hurokdetektoros mérések, kamerás adatok, vezeték nélküli mobilitási adatok.
Hasonlóan fontosak az aggregálása mellett, a megfelelő becslési és forgalommodellező eljárások felhasználásával történő jó minőségű és valós idejű előre becsléssel keletkező, adatok a dinamikus ráterhelések megvalósításénál. A hatékony becsléshez különböző szűrési és adatfúziós eljárásokat alkalmazunk. A módszertan kidolgozása mellett a saját hálózati szoftveren kívül további korszerű forgalom-szimulációs eszközökkel is sor kerül az eredmények validálására. Az intelligens járművek és közlekedési rendszerek kommunikációs módszereinek és technológiáinak alkalmazása során alapvetően fontos, hogy a nemzetközileg harmonizált és egységesített ITS kommunikációs architektúrához kapcsolódjunk.

A fentiekhez kapcsolódó különböző átfogó módszertani megközelítések: Egy közlekedési hálózat belső forgalomi lebonyolódását a forgalom törvényszerűségeinek feltárását, a terepen végzett mérések időben és finanszírozási szempontból igen korlátolt jellegéből fakadóan sok esetben szimulációs szoftverek segítségével szükséges 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, ennek megfelelően 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), 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 szimuláció 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), nappali és éjszakai forgalom 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.
Általában 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 projektben javasolt új eljárást több olyan alapkérdés motiválja, amelyeket a jelenlegi modellezési technikákban elhanyagolnak, viszont a gazdaságilag jelentős problémákra választ kereső nagyméretű ITS - hálózati modellek alkalmazásakor már nem hanyagolhatunk el és nem kerülhetünk meg. Ez a motiváció igen fontos a projekt 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 modellezés 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.

9. A PROJEKT CÉLJÁNAK RÖVID ÖSSZEFOGLALÁSA

Az általunk alkalmazott megközelítések, kutatási módszerek és fejlesztési tevékenységek a folyamatok mélyebb megértésében és a komplex forgalomirányítási problémák új megoldásaiban kívánnak előre lépni és segíteni. Kiemelt feladat az integrált levegőminőség analízis, az ezzel kapcsolatos technológiai és a nem technológiai, innovatív megoldások gyors piaci bevezetése. A projekt hozzá kíván járulni a területen a nemzetközi versenyképességünk növeléséhez is. Az innovatív kutatási munkánk - összhangban a hazai és EU-s innovációs célkitűzésekkel - hozzá kíván járulni a zöld és az alacsony széndioxid-kibocsátású gazdasági irányában a fejlődéshez. Ezen a téren a városi közlekedéshez kapcsolódó ITS technikák - amelyek, az infrastruktúra-jármű-irányítás kapcsolatrendszerét szolgálják - kiemelt területet képviselnek. A projekt új modell-bázisú folyamat-kutatásai a közlekedési hálózatok és közlekedési rendszer komplex környezeti-társadalmi hatásaira, mint kihívásokra fókuszálnak. Az innovatív mérőrendszer és mérési módszereket fejlesztő kutatások a közlekedési terheléseken túl, a teljes körű integrált levegőminőség analízisét és javítását is szolgálják.

10. VÁRHATÓ HATÁSOK

A nagyméretű bonyolult városi hálózatok forgalmi-környezetterhelési folyamatokat generáló tényezők jobb megismerése, elvezet egy új és egzakt eszközrendszerhez, az új elvű flexibilis optimális irányítási módszer bevezetéséhez. Ennek birtokában, hatékonyan alkalmazhatók az innovatív monitoring rendszerek és a velük kombinált MPC módszerek.

A teljeskörű komplex analízis és optimálás elvezet az intelligens zöld hálózat megvalósításához. Új, hatékony komplex mérési módszerek valósíthatók meg. Lehetővé válnak komplex stratégiai hatásanalízisek és új javaslatok meghatározása, a járművek és forgalom területén. Valós idejű komplex irányítási módszerek valósíthatók meg a városok forgalmi és környezetterhelésének optimálására. Új számláló, mérő és monitoring rendszer valósítható meg.

A fentieknek megfelelően a hálózat egyes tartományain fellépő különböző állapotok alapján, rugalmasan változhat az irányítás célja is. A hálózati zöld ITS egy olyan variábilis hálózatot jelent, amely működése során egyszerre értékeli a forgalmat, a környezetterhelést, a biztonságot és az energiatakarékos működést. Gyakorlati tapasztalat az is, hogy az optimális irányítás hatására egy-egy csomópontnál, a kapacitásnövekedés forgalomtól függően 25%-45% közötti növekedést is elérhet.

A projektben elvégzendő fejlesztés, eszközt kíván biztosítani a nagyméretű zöld intelligens városi hálózatok esetén valós idejű ipari irányítási feladatok ellátására.

Az ily módon megvalósítható intelligens városi forgalmi rendszerterve amely egy iránytű a zöld ITS hálózat megvalósításához. Ebbe a közreműködő partnerek közös tudása és felhalmozott műszaki tapasztalatai is be lesznek integrálva. Rendkívül pozitív a fellépő szinergia és az eredmények további hasznosításának lehetősége.

Új, gyorsított vizsgálati módszerek születnek a trajektórák menti környezetterhelés analízisére.

Ugrásszerűen új minőséget és sebességet biztosít a számítási felhőn alapuló technológia és a fejlett GNSS alkalmazása a nagy volumenű adatfeldolgozásnál. A modern, nagypontosságú dinamikus térképek alkalmazásai, meghatározó jelentőségűek az új monitoring-rendszer, a szakértői-rendszer és a publikus tájékoztató rendszer működtetésénél. A projektnek fontos hatása van a városi levegő minőségének javulását előidéző társadalmi és technológiai változásokra. Pozitív hatással van az egészségre és az éghajlatváltozást előidéző folyamatokra, valamint a kapcsolódó költségekre is, amelyeket a légszennyezés okoz az EU-ban. Ez növeli az uniós levegőminőségi jogszabályok szerinti megfelelést. Támogatja az EU levegőminőség politikát az uniós és a tagállami szinten is, hogy megtaláljuk a hosszú távú, fenntartható megoldást az EU-ban. A projekt rövid távú közvetlen hatása

természetesen az innovatív megoldások gyors piaci bevezetésében mérhető és ez fontossá teszi a kkv-k részvételét is a megvalósításoknál. Az általános gazdasági hatást tekintve, a 21. század egyik legfontosabb kérdése az, hogy az emberiség meg tud-e birkózni az egyre súlyosabbá váló globális környezeti és társadalmi problémákkal? Képes-e a globalizáció negatív folyamatait megváltoztatni, a fosszilis energiára épülő gazdasági modellt? Át tudja-e alakítani gondolkodását és magatartását? Képes-e a globális probléma megoldásához meghatározni azt az optimális irányítást, amelynek igénye már 1992-ben, a Riode de Janeirói ENSZ világkonferenciát követően oly elemi erővel hatolt be a nemzetközi politika erőterébe?

A világ olyan összetett válságban van, melyből a kiutat csak rendszerszintű átalakításokkal lehet kezelni. Az átfogó változások eléréséhez a jelenleg uralkodó rendszerszemléleten kell változtatni. Elsősorban automatikus önszabályozásokra és magas szintű kooperációkra van szükség. Feladat a fejlesztési képességek katalizálása, a különböző források és szereplők integrálása, a hálózatok kiépítése és segítése. A valós fejlesztések politikai, civil, gazdasági háromszögben valósíthatók meg az érintettek ésszerű bevonásával.

A kutatási munkánk és stratégiai elemzéseink figyelembe veszik az OECD kompakt város fenntarthatósági elemeire vonatkozó ajánlásait is: így pl. több alközpont, kisebb távolságok, minél alacsonyabb természet-használat, optimális tájhasználat, tömegközlekedés és kerékpárút hálózat fejlesztése, energia hatékonyság és helyi energiaforrások használata és elemzése. A környezeti fenntarthatóságot szolgálja a járműforgalom optimálása, kevesebb CO_2 és egyéb káros kibocsájtás, ökológiai lábnyom csökkentése és a biodiverzitás védelme.

Társadalmi fenntarthatóságot: kiadáscsökkentések, egészségügyi állapot javítás, életminőség javítás és társadalmi alkalmazkodó képesség javítása.
Gazdasági fenntarthatóságot: az innovációra való törekvés növelése, zöldtechnológia fejlesztések, zöld munkahelyek létesítése, lokális és regionális önellátás, megújuló energiák, helyi befektetések növelése. Szélesebb kontextust tekintve, természetesen tudjuk, hogy súlyos helyzetbe sodorhat bármely országot a jóindulatú, de rugalmatlan környezetvédelem-politika is! Gazdaságilag és stratégiailag kifejezetten veszélyes, ha ez EU egymagában olyan többletterheket vállal magára, amelyeket a világ más országai nem (pl. a zöldenergia támogatásához kapcsolódó költségekkel és a CO_2-kibocsátás megadóztatásával), mert ennek egyenes következménye, hogy az EU lemarad az Egyesült Államokkal és Kínával vívott globális gazdasági versenyben.A szakértők kevésnek tartják az USA és Kína - a világ két legnagyobb széndioxid kibocsátója - között 2014 novemberében létrejött klíma megállapodást. A kutatásaink a konkrét problémák minél pontosabb feltárására, mérése, modellezésére és a konkrét műszaki-fizikai környezeti feladatok kapcsán az optimális energiahasznosítás mellett megvalósuló minimális környezeti terhelések elérését szolgálják. A kutatás motorjai: új modell-paradigmák, a széleskörű innováció és kooperáció, valamint a modern irányításelméleten alapuló integrált intelligens rendszerek alkalmazásai.

A projektünk ezirányú felhasználás-orientált kutatás-fejlesztési program további célja az is, hogy erősítse a résztvevő vállalkozások innovatív képességét, hozzájáruljon a résztvevő cégek hosszú távú kutatás-fejlesztési stratégiai céljainak eléréséhez és a nemzetközi együttműködésének erősödéséhez. Biztosítsa a gazdaságban hasznosuló versenyképes termékek hazai és külföldi alkalmazását - ezzel növelje a magyar gazdaság versenyképességét és hozzájáruljon a további tudásintenzív és emberközpontú munkahelyek teremtéséhez. A projekt résztvevői fontosnak tartják, hogy a kutatás-fejlesztési eredmények hasznosuló termékek és szolgáltatások legyenek, így feladatuknak érzik a területen az innovációs lánc átkarolását is. A tevékenység során a fenntarthatóság elvét szeretnénk előtérbe helyezni, amely a környezet megóvásának és a gazdaság fejlődésének érdekeit egyeztetve, vállalható jó kompromisszumok keresésével kíván egyensúlyt teremteni a meghatározó tényezők között és így biztosítja a területen a hosszú távú fejlődését is.

Mivel az alkalmazott rendszerrel csökkenteni lehet a káros anyag kibocsátást, az ezzel összefüggő egészségügyi kiadások csökkenése mellett, javul a nagyvárosok lakosságának életminősége, amely társadalmi szinten nagy jelentőségű, mivel jelenleg az európai népesség több mint fele él városokban és ez jelentős populációt érint. A fentieket tekintve, további jelentős eredmény az egészségvédelmi

szempontból kiemelkedően fontos tisztább városi környezet biztosítása, amely jelentősen hozzájárul a társadalombiztosítási ráfordítások csökkentéséhez. - *figyelembe véve azt, hogy a porkoncentráció csökkenésével a légúti megbetegedések -amelyek a 2. leggyakoribb megbetegedések közé tartoznak- gyakorisága is csökken* (P. Rudnai, Z. Virágh, M. J. Varró, É. Vaskövi, T. Beregszászi, M. Náray, A. Czitrovszky: Impact of air pollution on the children's health near a communal waste incinerator; *Epidemiology*; vol. 17 S, pp. 414-415, 2006*), akkor becsléseink szerint az ilyen projekt ráfordításai 1,5 éven belül is megtérülhetnek.*)

2 Makroszkopikus forgalmi modell bázisú analízis és adatbank a levegő és zajszennyezés csökkentésére

A kutatás a közúti közlekedés által okozott városi levegő és zajszennyezés problémáját vizsgálja. Ezzel kapcsolatban, az alkalmazhatóság szempontjából áttekintjük a fontosabb légszennyezési modelleket és azok paraméterigényeit, továbbá a zajszennyezések modellezéséhez szükséges jellemzőket. Tárgyaljuk a közúti közlekedés okozta zaj- és légszennyezés-modellezés kérdéseit is. Javaslatot teszünk egy átfogó közúti közlekedési hálózati modell alkalmazására, amely a forgalomtól függően figyelembe veszi a zaj és levegőszennyezést. Vizsgáljuk a városi közlekedéssel összefüggő zajszennyezést és az ezzel kapcsolatos problémákat. Tárgyaljuk a korábbi makroszkopikus közúti közlekedési modell továbbfejlesztési lehetőségét a zajterhelésszint számítási módszerrel. Vizsgáljuk a megoldási lehetőséget a számított forgalmi helyzetekből készíthető stratégiai kivitelezésére. Áttekintjük a városi közlekedés forgalmi adatbankjának tervezésekor felmerülő kérdéseket és megoldásokat. Az adatbankkal szemben támasztott elvárásokat, a megvalósítandó architektúrát, a felhasználásra kerülő technológiákat. Megvizsgáljuk az Adatbank funkcióit és azt, hogyan viszonyulnak ezek a forgalmi modellezéshez. Az Adatbank terveink szerint egy általános megoldást kínál a közlekedési hálózatok adatainak tárolására és vizsgálatára

1. KÖZLEKEDÉSI ZAJSZENNYEZÉS

A motorizáció fokozódásával azonos ütemben nőtt a közlekedési zaj annak ellenére, hogy az egyes közlekedési eszközök egyedi zajkibocsátása csökkent. Ennek következményeképp ma a városi zajterhelés 70-80%-a a közlekedésből származik. „Az ENSZ adatai szerint a civilizációs zajterhelés évtizedenként 1 dB-lel növekszik, a nagyvárosi zaj ma harmincszor akkora, mint a 30-as években volt.” Tulipánt Gergely (2007).

Jelen kutatásunk áttekinti a felmerült problémákat és egy ezekhez kapcsolódó modell integrálását tűztük ki célul a közúti forgalom modellezésével Péter Tamás (2007).

A nagyméretű nemlineáris közúti közlekedési hálózatok modellezésére kifejlesztett módszerünk gyorsasága révén lehetőség nyílik olyan további nagy számításigényű modellek integrálására is, mint a levegőszennyezést vagy zajszennyezést leíró folyamatok modelljei.

Ezt követően, áttekintjük a levegő és zajszennyezés kapcsán felmerülő legsúlyosabb problémákat, amelyek a kutatás különös aktualitását alátámasztják.

Az Európai Gazdasági Közösségben a környezetvédelem kérdése viszonylag későn, a hatvanas évek végére, a hetvenesek évek elejére került a figyelem középpontjába. Az Uniós szabályozás központi forrásának a Bizottság által kidolgozott környezeti akcióprogram-rendszert tekinthetjük. A zaj elleni közösségi küzdelem eddig elért eredményeit, és korántsem kevés hiányosságait a 1996 novemberében elkészült „Zöld Könyv” deklarálta. A Könyv reális képet festett a közvetett szabályozási elv- mely szerint a környezeti zaj helyi probléma, aminek felszámolása tagországi kötelezettség- kudarcra van ítélve. A Zöld Könyv elsőként rögzítette egy olyan keretszabályozás szükségességét, amely a környezeti zaj kezelésére vonatkozó kötelező direktívákat tartalmazza.

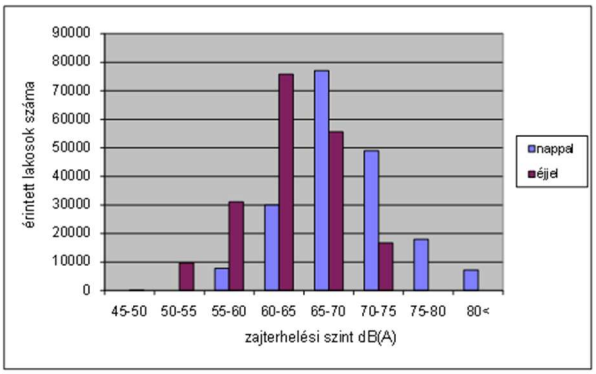
A zajvédelem területén a legfontosabb intézkedési feladatként:

- a zajforrás kibocsátási jellemzőinek megváltoztatását
- a zajtól védendő területeknek a zajforrás-területektől való geográfiai elkülönítését
- passzív eszközök igénybevételét jelölte meg.

A korábbi szabályozással ellentétben, már nemcsak egyes meghatározott termékek zajkibocsátásának mérési módszerei és határértékei egységesítésében látták a zajszennyezettség csökkentésének lehetőségét, hanem a passzív védelem, a közlekedéstervezési intézkedések támogatásában és a gazdasági eszközök figyelembevételében egyaránt. 2002 júniusában fogadták el a 2002/49/ EK irányelvet, mely a stratégiai zajtérkép - készítés kötelezettségét rótta a tagállamokra. A térképek a

nagyvárosi agglomerációtól a nagy forgalmú közutak és vasútvonalakon keresztül a fontosabb repülőterek körét fogják át.

Az egyes országok a stratégiai zajtérképek mellett az egyes lokális problémák kezelésére intézkedési tervek elkészítését vállalták.



1. ábra: A zajban érintett lakosok számának eloszlása az őket érő zajterhelési szint szerint Paár István – Csöndes Géza – Lakatos István – Nagyszokolyai Iván (2005)

Az irányelvben a Bizottság további célokat fogalmazott meg az „elzajosodott Európa" problémájának csökkentésére:

- zajterhelés mértékére vonatkozó megbízható adatbázis
- az egyes zajforrások külön irányelvekben történő szabályozása
- a tagállami zajszintekre vonatkozó adatok összehasonlító kritériumoknak történő alávetése
- széles körű nyilvánosság

A zajimmisszió feltérképezésére, megállapítására irányuló igény (és kötelezettség) jelen van Magyarországon és Európában is. Kézenfekvő tehát a lehetőség, hogy a megfogalmazott Péter T., Bokor J. (2007), Péter T. (2005), Péter T. (2011) makroszkopikus közúti közlekedést leíró modellre fejlesztett Traffic szoftverünket Péter T., Stróbl A., Fazekas S. (2007), (2009) ilyen irányban bővítsük.

Az Egészségügyi Világszervezet álláspontja szerint jelenleg nem ismeretes a PM10 olyan alacsony koncentrációja, amelynél nem kellene az egészségkárosodás kockázatával számolni.

A közlekedésen belül elsősorban a dízelüzemű járművek a felelősek a PM10-kibocsátásáért: túlnyomó részben a tehergépkocsik, kisebb mértékben a személyautók, és a legkevésbé – mindössze tizedéért – az autóbuszok.

Világszerte a zaj által okozott hallóképesség-csökkenés a legelterjedtebb irreverzibilis foglalkozási ártalom, becslések szerint szerte a világon mintegy 120 millió ember szenved munkaképtelenséget okozó halláskárosodásban. A fejlődő országokban nemcsak a munkahelyi zaj, hanem a környezeti zaj is növekvő szerepű hallóképesség-csökkenést okozó rizikótényező. A zaj egyrészt az alvás ideje alatt elsődleges hatásokat fejthet ki, másrészt az éjszakai zajbehatás utáni napon megállapítható másodlagos hatásokat okozhat.

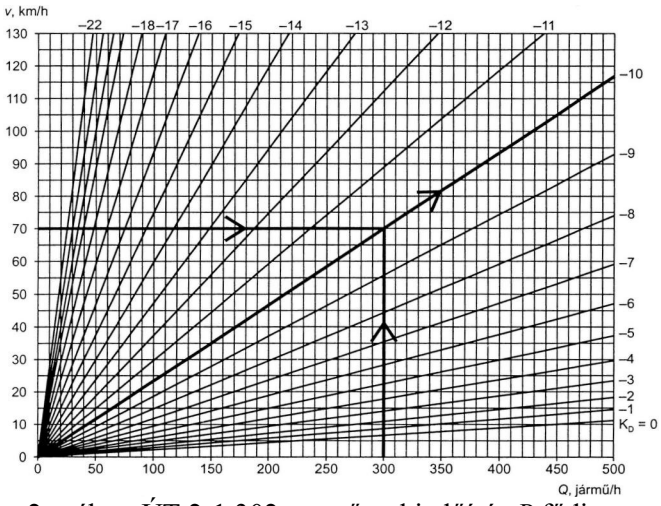
A zavartalan alvás a jó fiziológiai és mentális funkció előfeltétele. Az alvás zavarásának elsődleges hatásai: elalvási nehézségek, felébredések és az alvás fázisainak vagy az alvás mélységének változásai, vérnyomás-emelkedés, pulzus- és ujjpulzus-amplitúdó növekedés, vasoconstrictio, a légzés megváltozása, szív arrhythmia és hevesebb testmozgás. A reakció fellépésének valószínűségét feltehetően inkább a zajesemény hangereje és a háttérzajok hangereje közötti különbség, mint az abszolút zajszint határozza meg.

2. A ZAJTERHELÉSSZINT SZÁMÍTÁSA

Az ÚT 2-1.302:2003 számú útügyi műszaki előírás részletesen leírja az országos közutak kezelői számára kötelezően alkalmazandó számítás menetét a zajterhelésszint megállapítására.
A következőkben kiemeljük a szoftveres alkalmazás szempontjából jelentősebb részeit a számításnak, tekintettel az alábbiakra:
MSZ 15036 2002.(Hangterjedés a szabadban). MSZ 18150-1:1998 (A környezeti zaj vizsgálata és értékelése). MSZ 18150-2:1984 (Immissziós zajjellemzők vizsgálata).
A zajterhelésszint számításakor ún. akusztikaijárműkategóriák kerülnek megállapításra, amely az egyes forgalmi járműkategóriák összevonásával történik. Ily módon pl. a motorkerékpár akusztikai szempontból egy kategóriába kerül a könnyű tehergépkocsival és a szóló autóbusszal. A szoftverben egységjárművek, ill. jármű-méter mértékegységben állnak rendelkezésre a forgalmi adatok, ezért célszerű bővíteni a szoftvert egy modullal, melyben a modellezett terület egyes részeire a forgalmi járműkategóriák megoszlása beállítható. A továbbiakban a műszaki előírás – kevés kivétellel – minden paraméter és korrekciós tényező megállapításánál erre az akusztikai járműkategória besorolásra támaszkodik, így alkalmazása megkerülhetetlen.
Az útkategóriák megállapítására (Autópálya, autóút, egyéb út: 4 ill. 2 forgalmi sávos) a felhasználó által felvitt útgeometriai adatok alapján egyértelműen lehetséges. A terhelési paraméterek értéke – az akusztikai járműkategórián túl – két tényezőtől függ. Egyfelől tudnunk kell, hogy egyenletesen áramló, gyorsuló, avagy lassuló forgalom jelentkezik az adott útszakaszon, másfelől az útszakasz emelkedésének (lejtésének) %-os értékének ismerete szükséges (előbbi adatok a jelzőlámpák és egyéb forgalombefolyásoló elemek statikus helyzetéből adódóan rendelkezésre állnak).
Az A osztálynál rosszabb besorolású útburkolatoknál korrigálás szükséges, amely a következő képlet szerint történik:

$$K_{t,korrigált} = 10 \log [\ 10^{0,1Kt} - 10^{0,1Gi} + 10^{0,1(Gi+K)}] \quad (1)$$

ahol G_i értékek az előírás *2.ábra* jelű segéddiagramjából olvashatók le, a K tényezők pedig az akusztikai érdességi kategóriára vonatkozó, a műszaki előírásban megadott értékek.



2. ábra: ÚT 2-1.302 sz. műszaki előírás *B* fődiagramja

Az egyenértékű A-hangnyomásszint számításához ki kell számolni még K_D értékét is, amely az előírás *B* jelű fődiagramjából olvasható le a mértékadó sebesség és az akusztikai járműkategóriához tartozó forgalomnagyság (jármű/h) függvényében. A forgalomnagyságot az útkategóriának, napszaknak (nappali vagy éjjeli) és akusztikai járműkategóriának megfelelően egy A_{in} tényezővel kell csökkenteni, továbbá nappali időszakban 16 órás, éjjel 8 órás időtartamra vonatkoztatva számolni.

Az akusztikai járműkategóriánként kapott egyenértékű zajszinteket összegezzük, és az összeg logaritmusának tízszerese adja (1) alapján azt az L_{eq} hangnyomásszintet, amely ideálisnak tekinthető körülmények között az előírásban definiált pontban mérhető.

Az előbbiekben felsorolt korrekciós tényezők magyarázata során láthattuk, hogy a környezeti tényezők összessége nem elhanyagolható mértékű zajnövekedést (csökkenést) okozhat az előzetesen kiszámított zajszint mértékében.
A legjelentősebb korrekciót adó tényezőkkel (távolság, hangvisszaverődés és hangárnyékolás) kapcsolatos létesítmények térinformatikai paramétereit a szoftverben rögzíteni kell, erre egy külön felületet kell létrehozni.

3. LÉGSZENNYEZÉSI MODELLEK

Valójában a városi légszennyezettség széles tér- és időskálán lejátszódó fizikai és levegőkémiai folyamatokat foglal magában. A városok jellemző kiterjedése 10-20 km, illetve még nagyobb, amennyiben a várost körülölelő agglomeráció levegőminőségére gyakorolt hatásait is figyelembe vesszük. A probléma nem egyszerű, mert a kibocsátás abban a légköri rétegben történik (canopy layer), ahol a légáramlásokat az épületek és egyéb mesterséges akadályok jelentős mértékben módosítják. Ennek következtében az adott pontban kialakuló koncentráció értéke akár nagyságrendileg is különbözhet egy hasonló mértékű emisszió sűrűséggel jellemezhető, de beépítéssel nem rendelkező területen kialakuló koncentrációtól. Ebből következően, ha a lokális számítások során az egyedi akadályok hatásait csak leegyszerűsítve, például egy átlagos érdességi paraméteren keresztül vesszük figyelembe, jelentős hibát követünk el.

- A mérőpontok („receptor pontok”) szükségszerűen a források közelében helyezkednek el. Az áramlási mező természetes, illetve épített akadályok által gerjesztett változékonysága következtében a koncentráció értéke viszonylag kis távolságon belül is jelentősen változhat. Az erős koncentráció gradiens miatt gyakran szinte megoldhatatlan feladat a reprezentatív méréspontok kijelölése a városi monitoring hálózat állomásai számára. A nyomanyagok koncentrációja egy adott receptor pontban rövid intervallumokban is igen jelentős időbeli változékonyságot mutat.

A városi, lokális környezetben lezajló levegőkémiai átalakulások különböző időléptékben mennek végbe, és a kialakuló koncentrációmezőt a keveredési folyamatok intenzitása, illetve annak tér- és időbeni kiterjedtsége is nagymértékben befolyásolja.

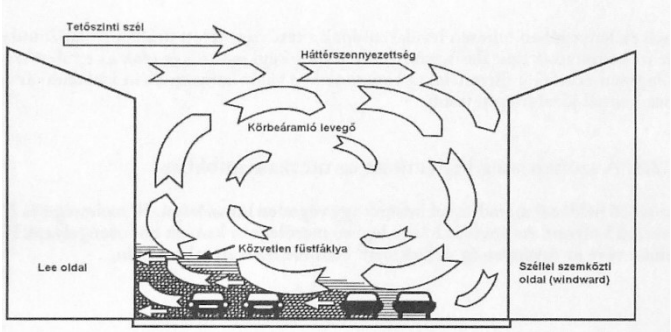
3.1 A Gauss-modell

A jelentős kibocsátással rendelkező magas pontforrásból származó környezeti terhelés vizsgálatára a Gauss-féle eloszlási modellt alkalmazhatjuk. Felhasználása során számos feltételezéssel kell élnünk, de egyszerűsége, kis számítási igénye miatt azonban a mérnöki gyakorlatban ez a módszer igen elterjedt. Az elnevezés a szennyezőanyagok szélre merőleges irányú koncentráció eloszlása és a matematikai statisztikából ismert normális (Gauss-féle) eloszlás hasonlóságából származik. A véletlenszerű mozgások ugyanis közel semleges légrétegződés, továbbá az ülepedési folyamatok elhanyagolása esetén, a szélirányra merőleges vízszintes és függőleges síkokban normális eloszlást alakítanak ki.

3.2 A levegő áramlása az utcákban

A levegő áramlásának legjellemzőbb tulajdonsága az utcák szintjén („street canyon”) az, hogy az épületek áramlásmódosító hatására örvények keletkeznek, és a talajszinti szél iránya ellentétes a tetők szintje felett tapasztalható széliránnyal. Annak ellenére, hogy ez a jelenség régóta ismert, leírására igen

kevés közvetlen mérési eredmény áll rendelkezésünkre. Az utcákban uralkodó áramlási viszonyokra, szélprofilokra vonatkozó ismereteink nagy része szélcsatornában végzett kísérletekből származik.



3. ábra: Az áramlás és a diszperzió sematikus rajza utcakanyonban

3.3 A STREET modell

Ez egyike, a legkorábban szerkesztett lokális diszperzió modellek kutatásain alapul, amelyet az alábbi szerzők cikke tartalmaz:
Johnson, W.B., Ludwig, F.L., Dabbert, W.F. and Allen, R.J. (1973) An urban diffusion simulation model for carbon monoxide. JAPCA, 23,490-498.
https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00022470.1973.10469794?needAccess=true

További részletesebb összefoglaló tárgyalást adnak a témában a következő szerzők, az alábbi munkájukban:
R. Berkowicz, O. Hertel, S.E. Larsen, N.N. Sorensen, M. Nielsen (1997) Modelling traffic pollution in streets, Ministry of Environment and Energy National Environmental Research Institute DK-4000, Denmark, 1-52.
https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/438467

A számítási elv több USA-beli nagyvárosban végzett mérési sorozat eredményeinek értékeléséből származtatott empirikus összefüggés azokra az esetekre, amikor a szélirány 30°-nál nagyobb szöget zár be a vizsgált utca irányával.

3.4 A CPMB modell

Újszerű közelítést jelentett a lokális diszperzió becsléséhez a Yamartino és Wiegand (1986) által fejlesztett Canyon Plume-Boksz Model (CPMB).
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0004698186903070
A koncentráció eloszlás meghatározásához a gépjárművekből származó közvetlen légszennyezés hatását számító füstfáklya modellt kapcsolták össze egy olyan dobozmodellel, amely a szennyezőanyagok kanyonon belüli, örvényáramok által előidézett keveredését, újra eloszlását szimulálja. A közvetlen mérésekkel történt összehasonlítás eredményei alapján elmondható, hogy ez a modell abban az esetben ad a valóságoshoz közeli értékeket, amikor a koncentráció kialakításában a kanyon belsejében kialakuló örvény advekciója dominál a diffúzióhoz képest.

3.5 A CAR modell

A CAR modell (Eerens et al., 1993) parametrizációja széles körű szélcsatorna-vizsgálatok eredményeire épül.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/095712729390016Y
Összesen 49, különböző típusú épületegyüttest, illetve egyéb akadályt (pl. facsoportok) állítottak össze 1:250 arányú kicsinyítésben, majd minden egyes esetben 12 receptor pontban vizsgálták a különböző kibocsátások esetén kialakuló koncentrációkat. A modell az alábbi paramétereket veszi figyelembe:

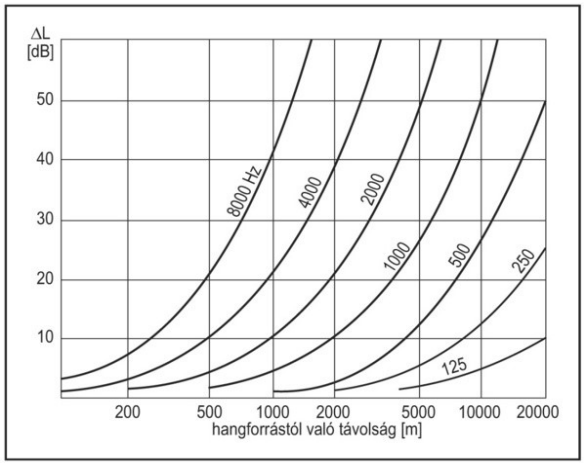
épületek magassága; az út középvonalától mért távolság; városi légszennyezési alapterhelés; a regionális háttér koncentráció; a vizsgált város karakterisztikus mértani sugarával arányos érték; a kibocsátás meghatározásánál külön kezeli a személygépkocsikat és könnyű áruszállítókat, illetve a nehéz tehergépjárműveket és autóbuszokat; emissziós faktorokat a járművek haladási sebessége függvényében határozzák meg négy átlagsebesség-intervallumra; az utca jellegétől függő hígulási változó; az aktuális szélsebességgel arányos tényező; a fák, facsoportok szélsebességre gyakorolt hatását jellemző empirikus változó.

4. KÖZÚTI KÖZLEKEDÉS ZAJSZENNYEZÉSI MODELL

Kifejezetten a közúti közlekedésre, egy jó közelítéssel működő, általánosan használható modell aligha írtható fel, mert a szükséges feltételrendszer laboratóriumon kívül sosem áll fenn. Az alábbiakban összefoglaljuk a zajterjedését befolyásoló elsődleges tényezőket.

A levegő, amelyben a hanghullámok terjednek, egyáltalán nem ideális, így a távolságtörvény alapján számított hangnyomásszint-csökkenésnél nagyobb adódik a valóságban. Ennek egyik oka a levegő hangelnyelése. A levegőben a zaj terjedése során veszteségek keletkeznek.

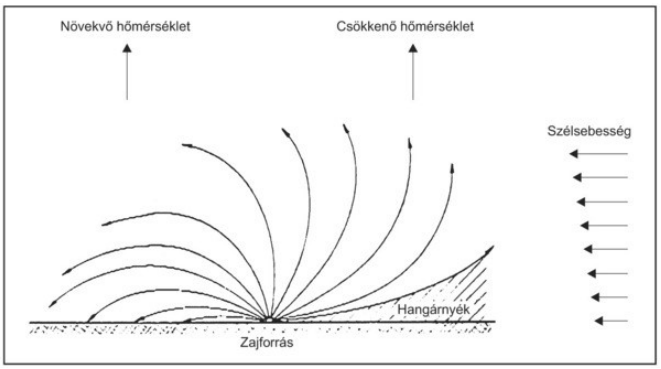
A levegő csillapítása erősen függ a frekvenciától, így a magas hangok jobban csillapodnak, mint a mélyek. A csillapítás függ ezen kívül a levegő hőmérsékletétől és relatív nedvességtartalmától is.



4. ábra: A levegő csillapító hatása a hangforrástól való távolság és a frekvencia függvényében

Vizsgáljuk meg a szél és a hőmérséklet hatását! A nyílt földfelszín fölött mindig létezik egy jelentős függőleges irányú szél-és hőmérsékleti gradiens, melynek nagysága és előjele befolyásolja a zajterjedési viszonyokat. A szélsebesség és a hangterjedési sebessége vektoriálisan összegződik, így a széliránnyal megegyező irányú hangterjedés nagyobb, ellenkező irányban kisebb sebességű.

A légáramlást a talaj közelében a növényzet és a beépítés fékezi, ezáltal a szélsebesség a magasság növekedésével növekszik. Emiatt a hanghullámok a szélirányban történő terjedésnél a föld felé, ellenkező irányú terjedésnél a földtől felfelé hajlanak el, *5. ábra*.



5. ábra: A hang elhajlása a magassággal növekvő szélsebesség, valamint a magassággal csökkenő vagy emelkedő hőmérséklet esetén

A széllel szembeni zajterjedésnél bizonyos távolságra hangárnyék jön létre. Szélirányban történő zajterjedésnél azonban nem alakul ki árnyék, sőt a hanghullámok föld felé hajlása ebben az esetben a mesterségesen akadályozott zajterjedést kedvezőtlenül befolyásolja, és a zajcsökkentő hatást részben vagy teljesen megszünteti. A szél hatása különösen nagy távolságokban okozhat nagy hangnyomásszint-ingadozásokat. A szélhez hasonló hatást gyakorol a zaj terjedésére a hőmérséklet is. Abban az esetben, amikor a hullámfront bizonyos részeinek terjedési sebessége különbözik a hullámfront többi részének sebességétől, a hullámfront iránya megváltozik. Nappal a talaj felmelegedése közben a levegő felsőbb rétegei hidegebbek, mint az alsók, azaz negatív hőmérséklet-gradiens alakul ki, az alsóbb rétegekben a hanghullám útját jelző nyomvonal felfelé görbül, és bizonyos távolságban árnyékzóna alakul ki. Abban az esetben, ha az alsó rétegek hidegebbek (télen, valamint tiszta szélcsendes éjszakában), mint a felsők, akkor a nyomvonal a föld felé hajlik el.
A talaj közelében bekövetkező különböző hatások többletcsillapítást okozhatnak. A földhatás komplex jelenség, amelyet a föld hangvisszaverő és hangelnyelő tulajdonsága együttesen idéz elő, és amelyet jelentős mértékben befolyásolnak a földközeli meteorológiai viszonyok. A kemény felületek (beton, aszfalt) hangelnyelése nagyon csekély, a füves terület, kötött talaj elnyelése már jelentős. Ha a zajforrás a talaj fölött van, interferencia lép fel a megfigyelő helyén, a közvetlen és a talajról visszavert hanghullám között. Nagyobb távolságok esetén a hangelnyelés és szóródás következtében 3 dB többletcsillapítással számolhatunk, a szabad féltéri terjedéshez képest. A sűrű fű vagy más aljnövényzet lényegesen nagyobb csillapítást eredményez, mint az elnyelő talajok (pl. homok). A csillapítás elérheti a 20 dB/100 m értéket is.
A földfelszíni hangterjedést jelentősen befolyásolják a különböző akadályok – házak, házsorok, falak, gátak – és a domborzati viszonyok. Az akadályok mögött hangárnyék alakul ki, ahova, ha más visszaverő felületek nincsenek a közelben, csak az akadály felső élét és rétegeit megkerülve a hullámelhajlás jelensége miatt és különleges terjedési viszonyok következtében jut el a hang. A hang útjába helyezett akadály (épület, terepalakulat, zajvédő fal) mögött hangárnyék keletkezik. Az akadály élénél a hang szóródik, ezért az árnyékolás nem teljes, a hangakadály mögé is jut.

5.AZ EGYES MODELLEK ALKALMAZHATÓSÁGA

Levegőszennyezés

A szakirodalomból származó légszennyezési modelleket áttekintve látható, hogy bármelyik modell alkalmazása jelentős erőforrásigénnyel jár és a korrekt számításhoz szükséges adatok teljes körű beszerzése ellehetetlenül nagy hálózatok esetében. Magyarországon történtek kezdeményezések levegőszennyezettséget előrejelző rendszer kiépítése ügyében (lásd HUNGRID), de ezek széleskörű társadalmi összefogás nélkül nem megvalósíthatók, tehát egy közlekedés szimulációs szoftverben való alkalmazásuk sem ésszerű célkitűzés. Reális célként olyan a légszennyezettség számítására alkalmas modell-kutatás javasolható, amely a forgalom nagyságára, mint fő jellemzőre támaszkodva ábrázolja a nagyméretű közlekedési hálózatokon a levegő szennyezettségét. A modell tetszőlegesen finomítható, pl. olyan közlekedésgazdasági paraméterek alkalmazásával, amelyek a körzet járműállományát jól

jellemzik. Online módon történő használatának alapfeltétele adatközponttal kiépített kapcsolat, amely olyan elengedhetetlenül szükséges adatot szolgáltat, mint pl. az uralkodó szélirány és -sebesség. Kiemelt jelentőségű légszennyező anyagok [kén-dioxid, nitrogén oxidok, nitrogén-dioxid, szénmonoxid, ózon, szálló por (PM10), benzol]

Zajszennyezés

A hanghullámok terjedésének, illetve azok intenzitásának csökkenése az előbbiekben összefoglalt szempontrendszer szerint bonyolult, mindenképpen nagy mérésigénnyel felmerülő feladat. Figyelembe véve annak a lehetőségét, hogy a felmerülő nagy mérési adat igények mellett első közelítésben utca-szintű modell integrálása a kivitelezhető, melyben elegendő volna a közlekedési modellünk számára ismert paramétereken túl, a forgalom összetételét jellemző paraméter felvétele, referenciamérési sorozat felhasználásával a forgalomban résztvevő járművek összetételére. A szimuláció során így kapott zajtérkép tájékoztatási jelleggel, és riasztási rendszerben való részvételre alkalmas lehetne online monitoring esetén.

- Mi videokamerával összekötött emisszó és zajmérőkkel is felszerelt mérőberendezések alkalmazását tartjuk célszerű megoldásnak a helyi zaj és kibocsájtás pontos meghatározására és csökkentésére.
- Ezzel párhuzamosan GPS-et alkalmazva, a forgalomban résztvevő járművek sebességeinek mérésére és ezt összekötve drónfelvételekkel, amelyek a járműsűrűség mérésére szolgálnak.
- Az a meglátásunk, hogy a forgalomban keletkező zajt a forrásnál célszerű figyelembe venni, mivel ennél a legkevesebb az az „empíria” ami önmagában is sok pontatlanság hordozója.
- Franciaországban 2021. novembertől már nemcsak a járművek sebességét, hanem az általuk kibocsátott zajt is mérik. Az új forgalomfelügyeleti technikai eszköz a „Méduse” folyamatosan méri az elhaladó gépjárművek által kibocsájtott zaj értékét. A négy irányban elhelyezett akusztikus érzékelők alapján pontosan megállapítja honnan érkezik a zaj. A zajmérő készülékeket nagy felbontású, 360 fokos látóterű kamerákkal egészítik ki, melyek a forgalmi rendszám alapján azonosítják a járműveket. A kísérleti fázisban a tesztüzemet Párizsban és további hét városban kezdik meg. Kezdetben nem a szankcionálás a cél, de a későbbiekben a túl zajos járművel közlekedőkkel szemben eljárás indul.

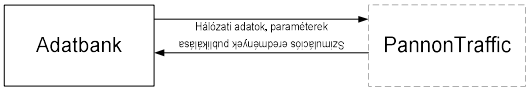
6. ábra: A kibocsájtott zaj mérésére alkalmazott „Méduse”

6. KÖZLEKEDÉSI ADATBANK TERVEZÉSE

Egy általános városi forgalmi, környezeti közlekedési terhelést tartalmazó adatbázis létrehozására szükség van, azonban ezen kívül további igények is indokolják a rendszer kifejlesztését.

Az adatbank-rendszer szempontjából lényeges kérdés az aktuális hálózati modell bemenő paramétereinek meghatározása, beszerzése, azok közös helyen történő tárolása és az, hogy ezek elérhetőek legyenek a modellező

szoftver által is használható interfészen keresztül. Továbbá felmerült az igény, hogy a szimulált eredményeket a modellezést és a szimulációt követően jól struktúrált, kereshető formában elérhetővé tegyük megfelelő jogosultságú felhasználók számára, így azokat a forgalmi szoftvertől függetlenül megvizsgálhatják és összehasonlíthatják. Ezért az említett interfészen keresztül fel is tölthetőek a szimulációs eredmények az Adatbankba.



7. ábra: Az Adatbank és a Traffic szoftver alkalmazás kapcsolata

Emellett igény van arra is, hogy a modell bemenő adatainak összegyűjtése mellett azokat megfelelő formában rögzítsük és tároljuk az Adatbankban későbbi felhasználás céljából: ehhez azonosítani kell a jellemzőket leíró objektumstruktúrákat, és az adatbank relációs adatbázisában el kell tárolni ezeket. A modell általános célú bemenő adatait pedig az Adatbank webes felületén publikálva kell elérhetővé tenni.

A hálózati modellt leíró jellemzők származtatottak is lehetnek (például a makroszkopikus járműsűrűség GPS mérések alapján történő meghatározása az átlagos járműsebesség és a makroszkopikus járműsűrűség közötti fundamentális összefüggések alkalmazásával). Fontos, hogy a származtatott adatok meghatározása megismételhető legyen – akár egy-egy paraméter módosításával finomítható legyen ezeknek a jellemzőknek az előállítása.

7. A TÁROLT ADATOK

Az Adatbankban tárolásra kerülnek a **modellspecifikus adatok**, mint például a hálózati gráf illetve az α disztribúciós paraméterek és β akadályozási paraméterek, amelyek az egyes szakaszok közötti kapcsolatokat írják le a hálózati modellben; tobábbá a **modellfüggetlen tulajdonságok** is, mint például az útminőség vagy a közlekedési csomópontok fázistervei. Utóbbi csoportba tartoznak a pozíciófüggő jellemzők is, amelyek egyetlen GPS koordinátához rendelt mennyiségek vagy jellemzők.

Ahhoz, hogy a Traffic-program alkalmazás felhasználhassa a modellfüggetlen mennyiségeket is, le kell kérdezni az Adatbanktól azokat és a modellelemekhez kell őket rendelni. Ezt követően egy leképezést kell végrehajtani, amelynek eredményeképp az adott sáv vagy parkoló – vagy a hozzájuk tartozó kapcsolatok valamelyik paramétere megváltozik. Ilyen feldolgozás előzi meg a GPS adatok felhasználását is: előbb ezeket a (GPS-pozíció – sebesség – mérési időpont) hármasokat modellelemekhez kell rendelnie egy algoritmusnak (a felesleges, vagy zavart adatok kiszűrését követően), majd megbecsülnie a sávon mért pillanatnyi makroszkopikus sebességet. Ebből a pillanatnyi makroszkopikus sebességből már meghatározható a becsült járműsűrűség az adott időpillanatra, ezekből az adatokból pedig, becsülhető a szakasz sűrűségfüggvénye. Az előzőekből adódik, hogy egy magasabb szintű és egy részletesebben megadott hálózati modell esetén más és más sűrűségfüggvények jellemezhetik ugyanazt a valós sávot vagy parkolót.

A már említett pozíciófüggő, (más néven pozícióhoz rendelt) jellemzők nagy előnye, hogy egységesen lehet őket kezelni. Amennyiben a hálózati modellben is meg kell jelennie a tényezőknek, akkor egy, már említett leképezést is elő kell állítani hozzájuk. Ez tipikusan a hálózati gráf topológiájából és az adott jellemző pozíciójából, és szükség setén a hálózati elem iránytangenséből határozza meg a tényezőhöz tartozó tulajdonos modellelemet. A teljesség igénye nélkül pl., az alábbi tényezők mind lehetnek pozíciófüggő jellemzők: közlekedési táblák, jelzések; útburkolati jelek; balesetveszélyes helyek, éjszakai fényviszonyok, közvilágítás; vasúti kereszteződések; tipikus zajszint. Sok jellemző nem mérhető fel kvantitatívan, vagy pedig iteratív szimulációk futtatásával kell majd meghatároznunk, hogy a makroszkopikus hálózati modellben hogyan reprezentáljuk az adott hatást, ezért nem is írhatók le bizonyos jellemzők kvantitatívan az adatgyűjtés során, ehelyett **kódtáblából** választja ki a felhasználó a jellemző értékét. Például felvesszük az Adatbankban a hálózat rosszul belátható pontjait, rögzítjük ezeket a pozícióhoz kötött jellemzőket, a beláthatóságot pedig nem kvantitatívan adjuk meg, hanem egy listából választjuk ki (például "belátható", "nehezen belátható", "nem belátható"). Így elég a szimuláció futtatásakor módosítani a megfelelő modellparamétereket, például az értintett kapcsolatok β-tényezőit lecsökkenthetjük a mgfelelő szint-értékre. Később, a jellemzők leképezésén változtathatunk, ha szükséges, ezáltal finomhangolható a modell-szimuláció.

A fentiek mellett egyéb, adminisztratív adatok is tárolásra kerülnek, peldául a hosszan futó folyamatok állapotának nyilvántartásához szükséges Job Queue (lásd később), vagy a felhasználók authentikálásához és authorizációjához szükséges adatok.

8. AZ ADATBANK FŐBB FUNKCIÓI

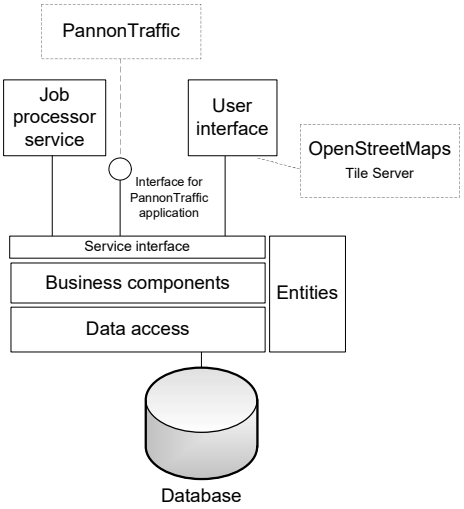
Az adatbank funkciói két csoportra oszthatóak, aszerint, hogy a felhasználó számára nyújtott, a felhasználói felületen nyújtott funkcionalitásról, vagy az adatbank adatáttöltő interfészén keresztül történő, a Traffic-Program alkalmazás felől kezdeményezett műveletekről van szó.

A felületen a felhasználó megtekintheti az összeállított hálózati modellt, a hozzátartozó térképen pedig a pozícióhoz rendelt jellemzőket, ezekre rákereshet, az egyes modellelemekre és a hozzájuk rendelt jellemzők értékeit megtekintheti, szerkesztheti, új jellemzőket vehet fel az Adatbankba. Összehasonlíthatja a szakaszok GPS mérések alapján számított járműsűrűség grafikonjait a makroszkopikus szimuláció által kiszámított járműsűrűség grafikonokkal. Csak bejelentkezést követően férhet hozzá a felhasználó a rendszerhez.

Az adatáttöltő interfészen keresztül kommunikál a Traffic-Program szoftver az Adatbankkal, ezen keresztül az Adatbankból lekérdezi a hálózati jellemzőket, a közlekedési lámpák fázisterveit, az input és output szakaszok járműsűrűség-idő függvényeit. A szimuláció befejeztével pedig kipublikálhatja az Adatbankba a számított, makroszkopikus járműsűrűség függvényeket, valamint a teljes hálózati gráfot. Az Adatbank és a Traffic-Program alkalmazás funkcióinak van egy közös metszete: mindkét rendszerrel meg tudjuk jeleníteni a hálózati gráfot és a hálózati modellt, annak bizonyos paramétereit módosítani tudjuk, habár az Adatbank bővebb adatkört kezel. Továbbá korábban számos tapasztalat mutatta, hogy egy webes felületen elérhető Traffic előnyösebb lenne, mint a jelenlegi vastagkliens megoldás, akár gyakorlati feladatok megoldása során, akár a szoftver harmadik félnek történő bemutatása, kipróbálása során is. Emiatt úgy tervezzük az Adatbank architektúráját, hogy az a Traffic-Program funkcionalitását is képes legyen megvalósítani, kiváltani.

9. A TERVEZETT ARCHITEKTÚRA, FELHASZNÁLT TECHNOLÓGIÁK

Az Adatbank architektúrája a következő ábrán látható:



8. ábra: Az adatbank architektúrája

Az adatbázisstruktúrát célszerűen MySQL szerveren alakítjuk ki, ennek oka, az adatbázismotor ingyenessége.

Az Adatbank alkalmazást .NET alapokon valósítjuk meg, amelyet Windows szerver(ek) hosztol(nak), mivel a Traffic-Program alkalmazás is a Microsoft keretrendszerével készült.

Az adatelérési réteget NHibernate segítségével valósítjuk meg, ezzel hajtjuk végre az OR mappinget.

Az üzleti logikát komponensekre bontjuk, ezeket a komponenseket egy interfészen keresztül érhetik el a felsőbb rétegek. Ezek a komponensek tartalmazzák a már említett folyamatok implementációit, az adatok, jellemzők modellelemekhez történő hozzárendelésének algoritmusait, illetve később magát a (jelenleg a Traffic-Program alkalmazásban megvalósított) szimulációs algoritmust is.

Egyes szolgáltatások egy webservice-en keresztül érhetőek el: ezen keresztül kapcsolódik a Traffic-Program alkalmazás az Adatbankhoz, kérdezheti le a hálózati paramétereket és publikálhatja a szimuláció eredményeit.

A webes felület ASP.NET MVC3 keretrendszerben készül, JQuery használatával. A grafikonok, mérési eredmények jqPlot grafikonrajzoló plugin segítségével jelennek meg. További komponensnek tekintendő a hálózati modellen történő eligazodást segítő, a felhasználói felületen a modell mögött megjelenő térkép, ehhez az OpenStreetMaps közösségi térképszolgátatását használjuk. Így adott esetben saját, dedikált térképszervert (tileserver) is telepíthetünk az adatbank mellé; ehhez egy Ubuntu szervert kell beüzemelnünk és bekonfigurálnunk. A hálózati gráf és minden modellel kapcsolatos elem az OpenStreetMaps által nyújtott felületre történik, kliens oldalon. Erre a felületre nem közvetlenül rajzol az alkalmazás, hanem egy további absztrakciós rétegen keresztül, az OpenLayers segítségével. Ezáltal lehetővé válik, hogy az implementáció jelentősebb módosítása nélkül váltsunk térképszolgáltatást. Itt meg kell jegyezni, hogy nagy és összetett modellek megjelenítése illetve a grafikonok, szimulációs eredmények kirajzolása igen erőforrásigényes művelet, várhatóan sokat kell ezeken a lépéseken optimalizálni.

Bizonyos műveletek (GPS adatok beimportálása, Traffic-Program hálózati modell betöltése, későbbi fejlesztésként a szimulációs algoritmus futtatása) a felhasználó által is indíthatóak az Adatbank felületén. Egy ilyen művelet a lefutása, kiértékelése hosszú időt vehet igénybe (ekkor "Job"-nak nevezzük, várakozási sorban tárolja őket a rendszer, ez a Job Queue), ezért a webes felület kiszolgálásától független, kiszolgáló folyamatok (Job Processor service) végzik ezeket a műveleteket. A Jobok, vagy a Jobokat létrehozó felhasználók között prioritások állíthatóak fel, így befolyásolhatjuk azt, hogy párhuzamos használat mellett ki kapjon elsőbbséget a számítási kapacitás kihasználására. **Szükség esetén, akár több gépen, több ilyen Job Processor Service is futhat, ugyanazt az adatbázist használva. Így a rendszer horizontálisan is skálázható.**

10. ÖSSZEFOGLALÁS

Anyagunk, a közúti közlekedés által okozott városi levegő és zajszennyezés problémáját vizsgálja. Rámutattunk arra, hogy a zaj- és légszennyezés modellezése, egy átfogó közúti közlekedési hálózati modell alkalmazását igényli, amely a forgalomtól függően, egyaránt figyelembe veszi a zaj és levegőszennyezést is. Ehhez kapcsolódva, összefoglaltuk egy Közlekedési Adatbank architektúrájának tervezését érintő kérdéseket és ennek a létrehozásához kapcsolódó gyakorlati feladatokat is. Mindezt célszerű egy Traffic-Program szerkesztőfelületével együtt kezelni és minél teljesebb funkcionalitását implementálni a webre is az Adatbank esetében. Így, Zalaegerszeg esetében, a modell és szimuláció és a valós, mért adatfolyamatok magas szintű integrációja valósítható meg a folyamatos, optimális városi forgalmi környezet biztosítása érdekében.

IRODALOM

Péter Tamás (2007) Nagyméretű nemlineáris közlekedési hálózatok modellezése Közlekedéstudományi Szemle LVII.: (9) 322-331 (2007)

Stróbl András – Suri Noémi (2010) Ipari és közlekedési zajforrások megelőzésének, csökkentésének jogi, műszaki és gazdasági eszközrendszere, 2010

Tulipánt Gergely (2007) A közúti és vasúti áruszállítás zajkibocsátásának elemzése és a zajterhelés csökkentési lehetőségeinek vizsgálata - PhD disszertáció, Budapest, 2007.

Bozó László – Mészáros Ernő – Molnár Ágnes (2006) Levegőkörnyezet – Modellezés és megfigyelés, 2006

Szeredi Ágnes: Szakdolgozat, ELTE Kémiai Technológiai és Környezetkémiai Tanszék, Témavezető: Dr. Salma Imre

Zichler Szilvia – Ocskay Rita – Salma Imre (2007) Budapest levegőszennyezettségének története, 2007

Patvarczki József – Debreczeni Gergely – Lovas Róbert – Lagzi István – Kacsuk Péter – Turányi Tamás: A HunGrid bemutatása és alkalmazása levegőszennyezés előrejelzésére, MTA SZTAKI

Paár István – Csöndes Géza – Lakatos István – Nagyszokolyai Iván (2005) Rendszeres Környezetvédelmi Felülvizsgálat, Közlekedéstudományi Intézet KHT, Budapest 2005.

Walz Géza (2008) Zaj- és rezgésvédelem, Complex Kiadó, Budapest 2008.

Péter T., Bokor J. (2007) Nagy méretű közúti közlekedési hálózatok nemlineáris modelljének kapcsolati hipermátrixa, A jövő járműve,1-2. Budapest, 2007

Péter T. (2005) Intelligens közlekedési rendszerek és járműkontroll. Előírások a közlekedés biztonságának növelésére. Bp.2005. pp.1-465. Magyar Mérnökakadémia Symposium.

Péter T., Stróbl A., Fazekas S. (2007) Hazai szoftverfejlesztés a nagyméretű közúti közlekedési hálózatok folyamatanalízisére, Budapest, 2007 Magyar Mérnökakadémia: Innováció és Fenntartható Felszíni Közlekedés Konferencia, http://kitt.uni-obuda.hu/mmaws/ű

Péter T., Stróbl A., Fazekas S. (2009) Speciális matematikai modellt alkalmazó szoftver, optimális útvonalak meghatározására. Budapest, 2009. Magyar Mérnökakadémia: Innováció és Fenntartható Felszíni Közlekedés Konferencia IFFK 2009. http://kitt.uni-obuda.hu/mmaws/

Péter T. (2011) Csomópontok optimális működtetése közúti közlekedési hálózatban, a matematikai modell tárgyalása. KÖZLEKEDÉSTUDOMÁNYI SZEMLE LX. évfolyam:(1.) pp. 27-33. Paper 1. (2011)

Buna B.: (1982) A közlekedési zaj csökkentése, Budapest, 1982

3. Tartományszintű optimális közúti forgalomirányítás a környezetterhelés csökkentésére

Az általunk alkalmazott hálózati modell felhasználásával, elvégezhető az általános nagyméretű közúti hálózatok modellezése. A hálózati modell térkép-gráf invariáns és speciális hipermátrix struktúrával írható le. Ez alkalmazható a közlekedési hálózatok tartományi szintű optimális irányítására Lyapunov függvény alkalmazásával. Ezt az irányítást kiterjesztjük a közlekedési folyamatokból származtatható környezet- és légszennyezés csökkentésére.

1. BEVEZETÉS

A közlekedési hálózatok forgalomi folyamatainak feltárása, terepen végzett mérések esetén általában igen korlátolt lehetőségeket biztosítanak. Ezért, sok esetben szimulációs szoftverek segítségével szokás ezeket megállapítani. A forgalmi szimulációk futtatásához azonban szükség van bizonyos mennyiségű és minőségű mérésre, amelyek a számítások kezdeti értékeit meghatározzák. A bemenő paraméterek azonban szimulációs szoftverenként jelentősen eltérhetnek. 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 szoktak felírni. 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), 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 szimuláció 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), nappali és éjszakai forgalom 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.

A bemutatásra kerülő anyagban javasolt új megközelítést több olyan alapkérdés motiválja, amelyeket a jelenlegi modellezési technikákban elhanyagolnak, viszont a gazdaságilag jelentős problémákra választ kereső nagyméretű ITS - hálózati modellek alkalmazásakor már nem hanyagolhatunk el és nem kerülhetünk meg. Ez a motiváció igen fontos, mert új irányt szab a közlekedés, kiemelt iparágakhoz kapcsolódó célzott kutatások folytatása területén.

Rá kell mutatnunk arra, hogy a hagyományos modellezési szemlélet alkalmazása igen sok megválaszolatlan kérdést vet fel és állandóan méretproblémákkal küzd. Természetesen, maga a feladat igen összetett: a közlekedési hálózat rendkívül bonyolult, belső automatizmusok, humán tényezők, sokféle szabály, geometriai, adat, szezonalítás. 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 modellezés technikában 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 irányt szab a kutatásoknak. Hagyományos modelleknél probléma a parkolók szerepe is a modellekben, mivel ezek más típusú szereplők, mint az útszakaszok, ezért u.n. idegen elemek.

A közlekedési folyamatok komplexitása magas szintű automatizálást, integrálást és intelligens közlekedési rendszerek (ITS) alkalmazását követeli meg, melynek közös alapjai a közlekedési modellek. Számos közismert modell létezik. Természetesen minden modellnek vannak előnyei és hátrányai a performancia, adatigény és pontosság tekintetében. A javasolt makroszkopikus modellünk egy térkép-gráf invariáns, speciális hipermátrix struktúrával írható le Péter, T. (2012.1), Péter Tamás (2012.2) Péter T, and Bokor J (2010.1), Péter T, and Bokor J (2010.2), Peter, Fülep and Bede (2011) Péter and Bokor J (2011). A modell fő erőssége a rendkívül bonyolult hálózat uniformalizálása és a számítási gyorsaság. Ennek köszönhetően a hálózatoknál valós idejű irányítás alkalmazható. A kutatásaink az egyes esetekben külön-külön is vizsgálják a közlekedési folyamatokat a trajektóriák mentén és a tartományokon is, így pl. a környezeti kihívásokat mindkét esetben. Forgalmas utak mentén fellépő környezetterhelésre, gyorsított számítási-előrejelzési módszereket dolgoztunk ki és vizsgáljuk az ehhez is kapcsolható ITS irányítást, amelynél IDM csoportok optimális átvezetésének hatékonyságát elemezzük O. Derbel, T. Péter, H. Zebiri, B. Mourllion and M. Basset (2012) és Derbel, Peter, Zebiri, Mourllion and Basset (2013). A környezetterhelés optimálása Lyapunov–függvény alkalmazásával viszont, tartományszinten történik. Ez utóbbinál a megvalósítható automatikus irányítás elvezet a kooperatív ökoszisztémát ötvöző, integrált közlekedés és szállítás-irányításhoz. A torlódásokkal kapcsolatos problémák megoldására, gyakran hasznos figyelembe venni az aszimmetrikus forgalmi terhelések fellépést is, amikor a kapacitásnövelés állapotfüggő optimális irányítással valósítható meg. Ezt is figyelembe vesszük a kutatásainkban, különböző területeken MPC elvet alkalmazva, pl. a változtatható irányú sávok működtetésével, Zsuzsanna Bede, Tamás Péter (2010) Zsuzsanna Bede, Tamás Péter (2011.1) Zsuzsanna Bede, Tamás Péter (2011.2) Zsuzsanna Bede, Tamás Péter and Ferenc Szauter (2013).

2. CÉLKITŰZÉSEK A BONYOLULT HÁLÓZATI PROBLÉMÁK VIZSGÁLATÁNÁL

I. Fontos cél a hatékonyság. Ezért a nagyméretű bonyolult hálózati problémák modellezésére új paradigmákon alapuló dinamikus modell-kutatáson dolgozunk és új elvű optimális irányítási módszerek bevezetését vizsgáljuk.

II. Célunk a nagyméretű közúti hálózatok dinamikus modellezésre kifejlesztett és a jelen állapotában már validált és kutatásra használt szoftver továbbfejlesztése. Ez felhasználóbarát módon alkalmas nagyméretű ipari modellezésre és az intelligens közúti hálózatok esetén, valós idejű irányítási feladatok ellátására.

III. Cél, az új kutatások hatékony alkalmazási lehetőségeinek biztosítása a közúti forgalmi folyamatok vizsgálatánál. Ezzel kapcsolatos átfogó - adatbankot és valós forgalmi szimulációt magába foglaló - rendszerterv elkészítésére az intelligens városi hálózati közlekedéséhez.

IV. Cél, a városi trajektórák menti komplex környetetterhelés, biztonság és veszély analízisére gyorsított módszerek kifejlesztése.

A modellezésére praktikusan makroszkopikus hálózati modellt építettünk fel Makroszkopikus modellünk, a nagyméretű közúti hálózatokon a közlekedési folyamatok modellezése a pozitív nemlineáris rendszerek osztályába tartozik. Jelen kutatásban a teljes hálózatot vizsgáljuk, ezért fontos a sebesség-sűrűség elvének analízise a teljes hálózatra vonatkoztatva. A szakirodalomban fellelhető eredmények a sebesség és sűrűség kapcsolatában Greenberg (1959), Greenshields (1935), Kövesné Gilicze É. és Debreczeni G. (2003) az x (geometriai) sűrűségre is alkalmazhatók (Greenshileds, Kladek, Pipes és Munjal, Drake és Zachor, Drew, Underwood, stb.), azonban ezek az elméletek csak a hálózat egy-egy adott szakaszára érvényesek, és nem általánosíthatók tetszőleges, a hálózat egynél több elemét tartalmazó trajektóriájára. Ezért bevezettük a következő n változós sebesség-sűrűség függvényt (Péter, 2012.2), amely bármely n≥1 számú szakaszból álló trajektória esetén érvényes:

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

ahol $V_i>0$ a maximális sebesség; l_i az i szakasz hossza; $x_i=x_i(t)$ a i szakaszon t időpillanatban fellépő járműsűrűség értéke; és $f_i(x_i)$ a hálózat i szakaszára vonatkozó valós magfüggvény, figyelembe véve, hogy $f_i(x_i)\geq 0$, $f_i(0)=0$ és $f_i(x_i)$ szigorúan monoton növekvő függvény a [0,1] intervallumon. A gyakorlati számítások miatt az $f_i(x_i)$ függvény differenciálhatósága is szükséges.

A maximális sebességérték a trajektóriára:

$$V(x_1, x_2, ..., x_n) = \frac{\sum_{i=1}^{n} l_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{l_i}{V_i}} \qquad (2)$$

Alapvető fontosságú a hálózat matematikai modelljének felépítésekor a hálózatot definiáló kapcsolati mátrix, amely egy hipermátrix. A kapcsolati mátrix meghatározza azt a kapcsolatot, amelynél a j szakasz kooperál az i szakasszal.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle L \rangle^{-1} & \\ & \langle P \rangle^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{11}(x,s) & K_{12}(x,s) \\ K_{21}(x,s) & K_{22}(x,s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ s \end{bmatrix} \qquad (3)$$

Ahol:

$x \in \Re^n$ a belső szektorok állapotjellemző vektora,

$s \in \Re^m$ a külső szektorok állapotjellemző vektora,

$\dot{x} \in \Re^n$ a belső szektorok állapotjellemző vektorának idő szerinti deriváltja,

$\dot{s} \in \Re^m$ a külső szektorok állapotjellemző vektorának idő szerinti deriváltja, ahol a belső szektorok és a külső szektorok hosszát tartalmazó diagonális mátrixok:

$$\langle L \rangle = \langle l_1, l_2, ..., l_n \rangle, \quad \langle P \rangle = \langle p_1, p_2, ..., p_m \rangle$$

$K_{11} \in \Re^{nxn}$, $K_{12} \in \Re^{nxm}$, $K_{21} \in \Re^{mxn}$, $K_{22} \in \Re^{mxm}$ és $x \in \Re^n$, $s \in \Re^m$.

A K_{11} és K_{22} fődiagonálisában 0 vagy negatív értékek lépnek fel, minden más elemük nemnegatív értéket vesz fel. A K_{12} és K_{21} minden eleme nemnegatív értéket vesz fel. Tehát ezek a mátrixok Metzler matrixok, következésképpen az általuk meghatározott teljes kapcsolati rendszert leíró K kapcsolati hipermátrix is Metzler matrix. A vizsgált modell alkalmas nagyméretű közúti közlekedési hálózatok szimulációs tesztjére és tervezésére, és a forgalmi rendszerek szabályozására (Péter és Szabó, 2012).

3. LYAPUNOV FÜGGVÉNY ALKALMAZÁSA

A tartományszintű irányítás szűkített hálózati modell alkalmazását igényli, amely egy tetszőleges „G" zárt görbével körülhatárolt n szektorból álló belső hálózatból és m db. s_1, s_2, …, s_m, sűrűségű külső szektorokból áll, amelyek közvetlen kapcsolatokkal rendelkeznek valamely belső szektorral és ez utóbbiak állapotát mérés alapján ismertnek tekintjük. Ezt a modellt alkalmazzuk a szoftveres vizsgálatoknál is. Ennél a modellnél a kapcsolati hipermátrixot alkotó mátrixok közül, csak a K_{11} és K_{12} mátrixok játszanak szerepet, mert általuk képviselve van minden átadás, amely a belső szektorokra vonatkozik. Ennek alapján, a modell differenciálegyenlet-rendszere az alábbi:

$$\dot{x} = < L >^{-1} [K_{11}(x,s)x + K_{12}(x,s)s] \qquad (4)$$

Ahol: $x \in \Re^n$, $\forall\, x_i \in [0,1]$, (i=1,2,…,n), $\dot{x} \in \Re^n$, $s \in \Re^m$, $\forall\, s_i \in [0,1]$, (i=1,2,…,m), L = diag{l_1, ... ,l_n}, l_i a főátlóban a belső szakaszok hossza ($\forall l_i > 0$, i=1,2,…,n), $K_{11} \in \Re^{nxn}$, $K_{12} \in \Re^{nxm}$.

A hálózat működését a $\mathbf{K}_{11}$ és $\mathbf{K}_{12}$ kapcsolati mátrixok foglalják egy rendszerbe. A kapcsolati mátrixok egyrészt megadják minden szektor esetében, hogy milyen más szektorokkal állnak kapcsolatban, másrészt a kapcsolati mátrixokat tartalmazó differenciálegyenlet-rendszer írja le a hálózat minden szektorának a dinamikus működését, azaz a szűkített hálózat működését.

A stabilitását az (5) lineáris Lyapunov függvény felhasználásával vizsgálhatjuk:

$$V(x) = \underline{L} \cdot \underline{x} \qquad (5)$$

amely az $\underline{\mathbf{L}}$ =[l_1, l_2, … l_n] és $\underline{\mathbf{x}}$ skaláris szorzata és a V(**x**) skalár-vektor függvény pozitív definit.

Az alkalmazott Lyapunov függvény fizikai jelentése az adott t időpillanatban a belső úthálózaton a járművek által elfoglalt összes úthossz:

$$V(x_1, x_2, ..., x_n) = l_1 \cdot x_1 + l_2 \cdot x_2 + ... + l_n \cdot x_n \qquad (6)$$

Tehát, V(t) t-szerinti deriváltjának negatív értéke az összes elfoglalt úthossz csökkenését jelenti a belső úthálózaton, amely az összes járműszám csökkenését jelenti.

Ha V(t) t-szerinti deriváltjának értéke zérus, akkor nem változik a járművek által elfoglalt összes úthossz, ha a V(t) t-szerinti deriváltjának értéke pozitív, akkor pedig növekszik a járművek által elfoglalt összes úthossz.

A továbbiakban a V függvény t szerinti deriváltját vizsgáljuk a fenti (4) állapotegyenletet figyelembe véve:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = L \cdot < \mathrm{L} >^{-1} [\mathrm{K}_{11}(\mathrm{x,s})\,\mathrm{x} + \mathrm{K}_{12}(\mathrm{x,s})\,\mathrm{s}] \qquad (7)$$

Az

$$L \cdot \langle L \rangle^{-1}$$

n dimenziós összegző vektorral írjuk fel az előbbi egyenletet:

$$L \cdot \langle L \rangle^{-1} = [1, \quad 1, \quad \cdots \quad ,1] \qquad (8)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = [1, \quad 1, \quad \cdots \quad ,1] \cdot [\mathrm{K}_{11}(\mathrm{x,s})\,\mathrm{x} + \mathrm{K}_{12}(\mathrm{x,s})\,\mathrm{s}] \qquad (9)$$

A (9)-ben szereplő első szorzatot vizsgálva, ennél, a $K_{11}(x,s)$ konstrukciója miatt a főátlóbeli i-ik elemeknél rendre megjelentek a K_{11} kapcsolati mátrix i-ik oszlopában elhelyezkedő elemek összegének ellentettjei is, tehát figyelembe vesszük a K_{11} főátlójában szereplő v_{ii} elemeket (i=1,2, …, n):

$$v_{ii} = -\left[\left(\sum_{r=1;(r\neq i)}^{n} v_{ri} + \sum_{w=1}^{m} v_{wi}\right)\right] \qquad (10)$$

Ez alapján:

$$[1, \quad 1, \quad \cdots \quad ,1] \cdot K_{11} = \left[-\sum_{w=1}^{m} v_{w1} \quad -\sum_{w=1}^{m} v_{w2}, \quad \cdots \quad ,-\sum_{w=1}^{m} v_{wn}\right] \qquad (11)$$

Ennek a vektornak, x vektorral alkotott skaláris szorzata adja a Lyapunov függvény deriváltjának első tagját:

$$\left[-\sum_{w=1}^{m} v_{w1},\quad -\sum_{w=1}^{m} v_{w2},\quad \cdots\quad ,-\sum_{w=1}^{m} v_{wn}\right]\cdot\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} = \tag{12}$$

$$-\left(\sum_{w=1}^{m} v_{w1}\cdot x_1 + \sum_{w=1}^{m} v_{w2}\cdot x_2 + \ldots + \sum_{w=1}^{m} v_{wn}\cdot x_n\right)$$

A (9)-beli második szorzat a K_{12} kapcsolati mátrix i-ik oszlopában elhelyezkedő elemek összegét adja:

$$[1,\quad 1,\quad \cdots\quad ,1]\cdot K_{12} = \left[\sum_{i=1}^{n} v_{i1},\quad \sum_{i=1}^{n} v_{i2},\quad \cdots\quad ,\sum_{i=1}^{n} v_{im}\right] \tag{13}$$

Ez utóbbi vektor és s vektor skaláris szorzata adja a Lyapunov függvény deriváltjának második tagját:

$$\left[\sum_{i=1}^{n} v_{i1},\quad \sum_{i=1}^{n} v_{i2},\quad \cdots\quad ,\sum_{i=1}^{n} v_{im}\right]\cdot\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ s_m \end{bmatrix} = \tag{14}$$

$$\sum_{i=1}^{n} v_{i1}\cdot s_1 + \sum_{i=1}^{n} v_{i2}\cdot s_2 + \cdots + \sum_{i=1}^{n} v_{im}\cdot s_m$$

Figyelembe véve (13) és (14) egyenleteket a következőt állapíthatjuk meg:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\left(\sum_{w=1}^{m} v_{w1}\cdot x_1 + \sum_{w=1}^{m} v_{w2}\cdot x_2 + \ldots + \sum_{w=1}^{m} v_{wn}\cdot x_n\right) + \tag{15}$$

$$\sum_{i=1}^{n} v_{i1}\cdot s_1 + \sum_{i=1}^{n} v_{i2}\cdot s_2 + \cdots + \sum_{i=1}^{n} v_{im}\cdot s_m$$

Tehát ez alapján a rendszer stabilis, ha a peremeken a kiszállítás nagyobb, mint a peremeken történő beszállítás:

$$\sum F_{Input} < \sum F_{Output} \tag{16}$$

Az autonóm rendszer viszont mindig stabilis, mivel a külső szakaszok járműsűrűség értékei azonosan zérusok, és a sebesség értékek nem negatívak.

A szűkített hálózati modell esetében elvégzett vizsgálat a Lyapunov függvényt alkalmazó irányítási törvényt ad meg, amely elégséges feltételt ad a rendszer aszimptotikus stabilitására és dinamikusan alkalmazható a teljes belső tartományon, illetve azokon a szubtartományokon, ahol kritikus helyzet lép fel.

A módszer tartományon történő optimális járműsűrűség fenntartására alkalmas, és közvetlen kapcsolatba hozható a környezeti hatások optimálásával is. A tartományszintű irányítási szemlélet bevezetése fontos a csomópontok irányításánál is. Ekkor a csomópontot körülkerítő zárt görbével határolt tartományon keresztül időegységenként, a maximális járműszám átáramlását biztosítjuk. A módszer a tartomány „mögött" kialakuló torlódásokat is figyelembe veszi (u.i. hibát követhetünk el, ha ezt nem vesszük figyelembe).

Természetesen, a pozitív rendszereknél alkalmazott lineáris Ljapunov függvény önmagában matematikai szempontból nem új eredmény. Esetünkben az új eredmény a Lyapunov függvény fizikai tartalma, amely egy tetszőleges zárt görbe által körülhatárolt hálózaton elhelyezkedő összes jármű hosszát definiálja és egy új lehetőségeket biztosít az optimális irányítás tartomány szintű megvalósítására.

4. A MODELL ALKALMAZÁSA ÉS FEJLESZTÉSE

Az úthálózat elemeinek identifikációja egy automatikusan hozzárendelt azonosító szám, és a tetszőlegesen hozzárendelhető szöveges változó segítségével történik. Ezt automatikusan hozzárendelhetjük a hálózat megalkotásakor, amennyiben az információ az internetes adatbázisban rendelkezésre áll. Tekintettel a gyakran igencsak kiterjedt hálózatokra, minden lehetséges helyen szükséges automatizálni a szerkesztés folyamatát. A legértékesebb automatizálás a parkolókhoz kapcsolódik. A parkolók kapacitásának kiszámítása lehetséges képfeldolgozás útján. E mellett, a parkolók elhelyezése, méretei a nemzeti szabványokban pontosan definiált. Ez praktikusan azt jelenti, hogy a parkolók kapacitása legtöbbször a kapcsolódó út hosszától és a parkoló elrendezésétől függ. A parkolóknak ezen tulajdonsága felhasználható a modell koordináták, GPS (WGS84) koordinátákká konvertálásával. A szakaszok végpontjainak ismeretében, ki tudja számítani az adott útszakasz hosszát. A nemzeti szabványok általában egy minimális távolságot határoznak meg a kereszteződéstől, ahonnan a parkolóhelyek kijelölése kezdődhet. Ezen felül a járdaszegélytől való távolság és a hely szélessége is szabályozva van. A szoftvermodul számára csupán azt kell megadnunk, hogy milyen parkolóhely elrendezés (állási szög) van az adott útszakaszon, melyből számítani képes a kapacitást. Amennyiben a parkoló nem útmentén került elhelyezésre, hanem egy nagy téren, vagy mélygarázsban, esetleg többszintes parkolóházban, akkor az előbb részletezett eljárást nem tudjuk alkalmazni, hanem ekkor számszerűleg kell megadni.

5. A VÁROS FORGALMI MODELLEZÉSE

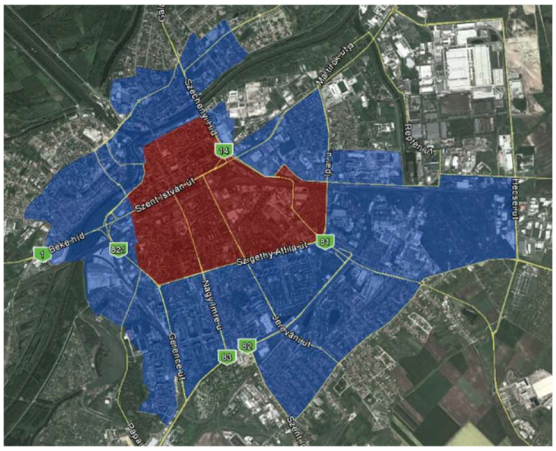
A munkánkhoz kitűnő lehetőségeket biztosít, ha a város deklaráltan törekszik az intelligens város megvalósítására. Az ITS alkalmazások, a közlekedési folyamatok optimális lebonyolítását és a torlódásokkal kapcsolatos problémák megoldását jelentik. Az innovatív módszerek ugyanilyen fontos szerepet játszanak a környezetterhelés Lakatos István (2004.1) Lakatos István (2004.2) és a közlekedésbiztonság területén fellépő gondok megoldásában is. A fentiekben tárgyalt matematikai modellt alkalmazó szoftverünk képes megbirkózni a nagyméretű városi hálózatokkal és szimulációs eredményeket szolgáltatni rendkívül gyorsan további vizsgálatok elvégzéséhez és hálózat fejlesztéshez.

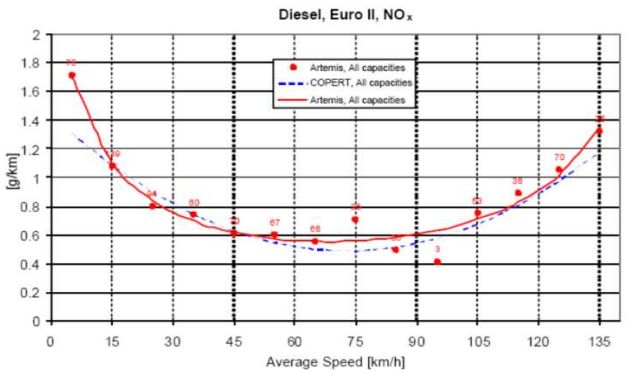
6. TARTOMÁNY SZINTŰ IRÁNYÍTÁS ADAPTÁLHATÓSÁGA, ZALAEGERSZEG VÁROSNÁL

A nagyvárosok egyes területei a teher- és személyi forgalom által erősen túlterheltek, amelyet a városon keresztül haladó főutak generálnak elsősorban és a közelben haladó autópálya. A csúcsidei dugók elkerülése tartományi szintű irányítás bevezetésével szabályozhatóvá tehető. A fent részletezett

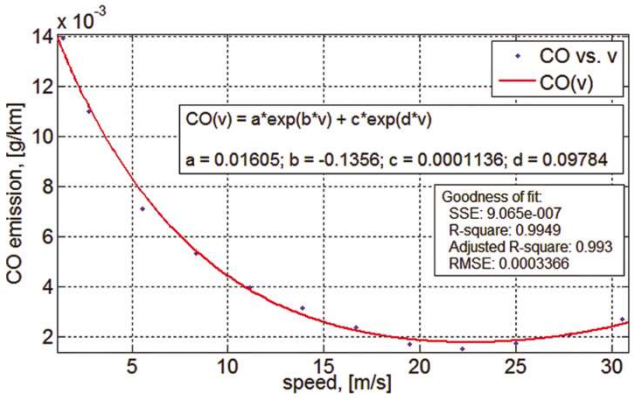
Lyapunov függvény alkalmazásának módszere kiválóan alkalmas lehet erre. A módszerünkkel igény szerint irányíthatóak meghatározott szub-tartományok és párhuzamosan az irányítás határát az egész városra is kiterjeszthetnénk, így egy multi-kritériumos szabályozás valósítható meg a perifériákon történő beáramlást szabályozva. Nagyon fontos kiemelni, hogy egy tartományba való beáramló forgalom korlátozása nem kell feltétlenül együtt járjon a szomszédos tartományok indokolatlan terhelésével, hiszen a forgalomnak a kevésbé terhelt utakra és területre történő átirányítása (tehát egyenletesebb eloszlása) folyamatosabb, gyorsabb áthaladást tehet lehetővé nem csak a védett tartományokon belül, de az egész város tekintetében is.

Egy lehetséges konfigurációja a tartományi szintű irányításnak látható az 1. ábrán. A példa egy kétszintű tartományi irányítást mutat be a városra, ahol a szub-tartomány (piros terület középen) a történelmi belvárost, a forgalmas közforgalmú közlekedési csomópontokat, terminálokat (vasútállomás, autóbusz pályaudvar) és azokat a területeket foglalja magában, ahol a parkolási lehetőségek korlátozottak, vagy tiltottak. Mindeközben a fő tartomány (kék terület) a város egyéb területeit védi, ahol a MOF (mértékadó órai forgalom) ezt indokolttá teszi. **Ez a kialakítás képes biztosítani a kívánt beáramlási – kiáramlási arányt a tartománynál és minden esetben garantál elkerülő utakat is a torlódási pontoknál.** Ekkor, szükséges jelzőberendezés működtetése minden, a tartomány pereme által érintett kereszteződésben, továbbá a már felszerelt jelzőberendezések mindegyike felkészítendő a feladat teljesítésére (dinamikus lámpaprogram alkalmazása központi irányítással).


Szent István u.
Szegény Áttilagy u.
Béke tér
Szécsényi u.
Ady Endre u.
Szent Imre u.
Kossuth u.
Rákóczi u.
Hősök u.
Szent Imre u.
Szécsényi u.
Szécsényi u.
Szécsényi



2. ábra: NOx kibocsátás hagyományos (EURO-2) személy gépjárművek esetében. Forrás: COPERT 4, Methodology and Software Updates



3. ábra: egy benzin üzemű gépjármű CO kibocsájtása a jármű sebességének függvényében. Forrás: Raimundas Junevičius, Marijonas Bogdevičius, Ádám Török (2011).

A 3. ábrán jól látható, hogy vizsgált járműnek megközelítőleg 22 m/s, az-az 79,2 km/h sebesség körül a legkisebb a CO kibocsájtása. Jól látható, hogy ez igen közeli értéket mutat a 2. ábrán látható NOx kibocsátásra vonatkozó optimális sebesség értékhez. Egyéb sebességtartományban pedig mindkét emisszió drasztikusan megnövekszik. Hasonló jellegű görbéket kapunk a többi egyéb szennyező komponens esetében is. A diagramból kiolvasható, hogy a forgalmi dugókban, ahol a haladási sebességek igen alacsonyak, a károsanyag kibocsájtás a belsőégésű motorokkal hajtott járművek esetében fokozott. A Lyapunov függvényt használó optimális irányítást végző módszerünk ilyen irányú kiterjesztése is lehetséges. Feltételezve, hogy ismerjük a forgalomban résztvevő gépjárművek típusainak kombinációját (környezetre való hatásuk szerint osztályozva) a légszennyezés lényegében a vezető által alkalmazott sebességtől (a motor percenkénti fordulatszámától) függ.

Az irányításhoz alkalmazzunk most egy olyan Lyapunov függvényt, amely az NOx kibocsátás optimálására szolgál. Ekkor a Lyapunov fizikai jelentése legyen a t időpillanatra jellemző összes NOx kibocsátás értéke, amelynél a belső úthálózat összes szakaszát figyelembe vesszük:

$$V_E(x_1, x_2, ..., x_n) = \frac{l_1 \cdot x_1}{h_1} E(V_1(x_1)) + \\ + \frac{l_2 \cdot x_2}{h_2} E(V_2(x_2)) + ... + \frac{l_n \cdot x_n}{h_n} E(V_2(x_n)) \quad (17)$$

Ahol:

$$\frac{l_i \cdot x_i}{h_i}$$

az i-ik szakaszon a forgalomban résztvevő gépjárművek száma (i=1,…,n),

h_i az i-ik szakaszon a forgalomban résztvevő gépjármű típusra jellemző hossz,

$E(V_i(x_i))$ az i-ik szakaszon, a forgalomban résztvevő gépjármű típusra jellemző időegységre vonatkozó NOx kibocsátás.

Ez utóbbi minden i-ik szakaszon a forgalomra jellemző sebességtől függ, amely pedig az i-ik szakaszra jellemző x_i járműsűrűségtől függ! Szakaszonként az NOx kibocsátás jól leírható az alábbi módon:

$$E(V_i(x_i)) = c_i \cdot [f_i(x_i) - v_{i,opt}]^2 + E_{i,opt} \tag{18}$$

Ahol: $c_i > 0$ regressziós konstans és

$$v_i = f_i(x_i)$$

az i-ik szakaszra jellemző sebesség-sűrűség függvény.

Jól látható, hogy az i-ik szakaszon az irányítás olyan járműsűrűség fenntartását írja elő, amelyre teljesül, hogy:

$$f_i(x_i) = v_{i,opt} \tag{19}$$

Az ehhez tartozó környezeti terhelésre optimális járműsűrűséget jelöli:

$$x_{i,opt}$$

Ekkor lép fel a szakaszonként optimális NOx kibocsátás:

$$E(V_i(x_{i,opt})) = E_{i,opt} \tag{20}$$

Foglaljuk össze az eredményeket. A korábbi tartományszintű forgalomra optimális járműsűrűség fenntartására vonatkozó irányítás tehát kiegészült a környezeti kritériummal. Ez azt jeleni, hogy az irányításnak a tartományszinten olyan optimális járműsűrűséget kell fenntartani, amely a szakaszok szintjén optimális NOx kibocsátást eredményez!

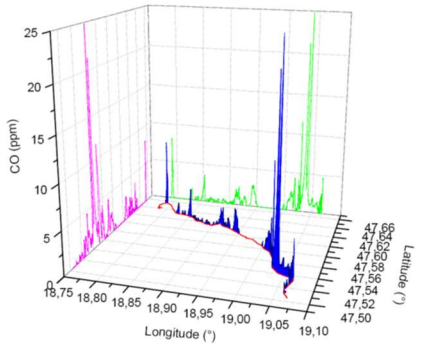
A fenti irányítás a gyakorlatban valamivel egyszerűbb eljárással is megvalósítható, az alábbiak szerint:

I. Tartományszintű Lyapunov függvény irányítással folyamatosan biztosítható az optimális járműsűrűség a tartomány szektorain.

II. A fentieket kiegészítik, a szakaszokon működő változtatható jelzésképű sebességjelző táblák, amelyek a minimális környezetterhelést biztosító optimális sebességet írják elő.

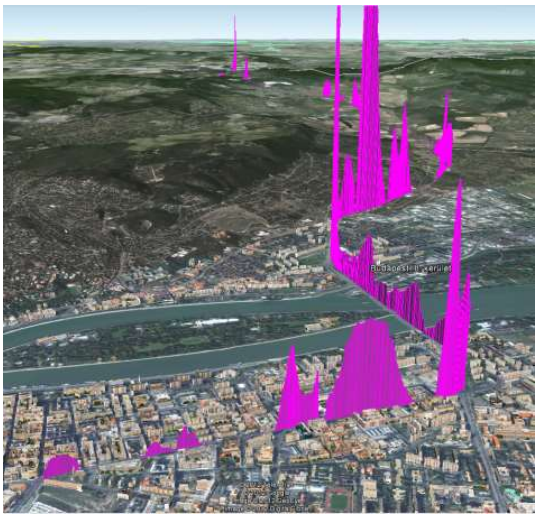
Ez a megoldás figyelembe veszi, hogy a konkrét közlekedési folyamatoknál a gyakori gyorsítás-lassítás ciklusok extrém módon növelik a légszennyezést (és a fogyasztást is), ezért mindenképp különösen fontos a városi forgalomban az állandó optimális sebességfolyamathoz közeli állapot fenntartása! A valós emissziós volumen feltérképezése érdekében szükséges a részletes, területfüggő szennyezőanyag

koncentráció meghatározása. Erre alkalmas a Molnár András (2018) és munkatársai által kifejlesztett intelligens mérő modul. A mérő modul a térbeli pozíciót, a légnyomásból számított magasságot és sebességet közvetlenül GPS és nyomásmérő szenzoroktól kapja és a szenzorok által mért adatokkal egyesítve a egy speciális struktúrájú adatsort állít elő. Jelenleg a modul az alábbi légköri alkotóelemek, illetve szennyezők mérését végzi: Oxigén (O2), Ózon (O3), Szén-dioxid (CO2), Szén-monoxid (CO), Nitrogén-dioxid (NO2), Nitrogén-monoxid (NO), hőmérséklet, vízpára, szálló por, gamma sugárzás, UVA sugárzás és UVB sugárzás. Mivel a terepi kísérletek megfelelő eredménnyel zárultak, a mérőegységet egy személygépjárműre felszerelve közúti forgalomban is elvégezték a méréseket. Ennek célja az volt, hogy megvizsgálják, hogy kimutatható-e szignifikáns szennyezettség különbség torlódási szakaszok és folyamatos haladást biztosító szakaszok között? Ennek a mérési sorozatnak egy útvonalán mért CO koncentráció alakulását szemlélteti a 4. ábra.



4. ábra: CO emisszió alakulása egy közúti szakaszon mérve. Forrás: Molnár András (2018) XII.IFFK 2018 Budapest, Online: ISBN 978-963-88875-3-5 Paper 10. pp. 1-6.

A 3D megjelenítéssel jól láthatóvá vált a torlódással terhelt szakaszok jelentős szennyezettsége, illetve szignifikáns szennyezettségcsökkenés látható az elővárosi szakaszon. Még jobban értelmezhető a mért CO koncentráció 3D térképre vetítéssel (5. ábra). A forgalomban végzett mérések azt mutatják, hogy egy területre vonatkoztatott gépjárművek által kibocsájtott szennyezés mértéke erősen függ a járművek haladási sebességétől. Álló vagy lassan haladó járművek esetében a terület terhelése jelentősen megnövekszik a gyorsan haladó járművekkel terhelt területtel szemben. Az emisszió-vezérelt forgalom szabályozás végső soron azt eredményezi, hogy a forgalomban résztvevő járművet folyamatosan mozgásban kell tartani.



5. ábra: CO emisszió alakulása egy hosszabb közúti szakaszon 3D térképen ábrázolva. Forrás: Molnár András (2018) XII. IFFK 2018 Budapest, Online: ISBN 978-963-88875-3-5 Paper 10. pp. 1-6

Ez kedvez a jármű műszaki állapotának is, mivel a jobb hatásfokon üzemelő motor kevésbé amortizálódik.

A forgalomban a járműsűrűség nagyon fontos! A sűrűség csökkenésével növekszik a sebesség, amely vizsgálataink alapján, beállítható optimálisra a tartományszintű irányítással Lineáris Lyapunov függvény alkalmazásával!

Itt jegyezzük meg, hogy az elektromos vagy hibrid járművek több szempontból is másképpen viselkednek, de országos (és nemzetközi) elterjedésüket tekintve egyelőre nem számottevő a hatásuk. Az elektromos hajtású járművek elterjedése csak fokozatos lehet, így a gépjárművek légszennyezése is csak fokozatosan csökkenhet.

Figyelembe véve a felszíni közlekedés résztvevőinek növekvő számát, különösen a nagyvárosokban és környezetükben elengedhetetlen a levegő szennyezésének csökkentése. Mivel a szennyező anyagok egy jelentős részét épp a gépjárművek termelik, hatékony megoldásokat kell keresni az általuk kibocsájtott káros anyagok csökkentésére.

A kívánt terület modellezésével a szimulációnk a károsanyag emisszió kiszámításához elegendő információt képes szolgáltatni már most is. Lehetőségünk van pl. egy kereszteződés átbocsátóképességének növelésére, vagy teljes tartományokon a kiegyensúlyozott, folyamatos haladási sebesség biztosítására a speciális Lyapunov függvényre alapozott optimális irányításunk alkalmazásával.

8. KONKLÚZIÓ

A nagyméretű bonyolult közúti hálózatok működésének jobb megismerése elvezetett bennünket egy új elvű flexibilis optimális irányítási módszer bevezetéséhez. A hálózat különböző tartományain fellépő különböző állapotok alapján, rugalmasan változhat az irányítás célja is. Az általunk tárgyalt hálózati ITS egy olyan variábilis hálózat, amely működése során egyszerre értékeli a forgalmat, a környezetterhelést, a biztonságot és az energiatakarékos működést. (Gyakorlati tapasztalat, hogy az optimális irányítás hatására egy-egy csomópontnál a kapacitásnövekedés forgalomtól függően 25%-45% közötti növekedést ér el.)

A kutatásokhoz kapcsolódóan, további eszközt kívánunk biztosítani a nagyméretű intelligens közúti hálózatok esetén, valós idejű ipari irányítási feladatok megvalósítására Zalaegerszeg intelligens város közúti forgalmi rendszertervének elkészítéséhez, az ITS hálózat megvalósításához. Rendkívül pozitív a fellépő szinergia és az eredmények további hasznosításának lehetősége. Ezek új gyorsított módszereket jelentenek a trajektórák menti környezetterhelés csökkentésére.

Bemutattunk a célt szolgáló makroszkopikus matematikai modellt. A modell nemlineáris pozitív rendszerosztályba tartozik. A speciális hipermátrix struktúra definiálja a hálózati elemek kooperációját és a kapcsolatokat leíró differenciálegyenlet rendszert. Tárgyaltuk a Lyapunov függvény egy új alkalmazási lehetőségét tartományi szintű irányításra. Kiemeltük a modell kiváló képességeit, rámutatva a forgalom-orientált környezet szennyezés csökkentésére és az irányításnak ilyen irányú kiterjeszthetőségére is.

IRODALOMJEGYZÉK

Bacciotti, (1983) Bacciotti, A.: On the positive orthant controllability of two-dimensional bilinear systems, Sys. Control Lett., 3: 53-55, 1983.

Boothby, (1982) Boothby, W. M.: Somé comments on positive orthant controllability of bilinear systems, SIAM J. Control Optim., 20: 634-644, 1982.

Caccetta and Rumchev, (2000) Caccetta, L., Rumchev, V.: A survey of reachability and controllability for positive linear systems,' Annals of Operations Research, vol. 98, pp 101-122, 2000.

Coxson and Shapiro, (1987) Coxson, P.G., Shapiro, H.: Positive input reachability and controllability of positive systems, Linear Algebra and its Applications 94 (1987) 35-53.

Farina, L. and Rinaldi, S, (2000) Farina, L. and Rinaldi, S,: Positive Linear Systems Theory and Applications. John Wiley &; Sons, Inc.

S. Fazekas, T. Peter: (2012) 3D Traffic visualization FIRST SCIENTIFIC WORKSHOP of Doctoral Schools Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, BME (Budapest, April 25, 2012) pp. 1-8. Doi: KJK2012-1-K4, ISBN 978-963-313-062-9

Fazekas Sándor, Péter Tamás (2012.1) 3D modellt alkalmazó szoftverrel a nagyméretű hálózatokon, Innováció és fenntartható felszíni közlekedés konferencia (IFFK-2012). Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2012.08.29-2012.08.31. Budapest: Óbudai Egyetem, Paper 13. pp. 87-90.(ISBN:978-963-88875-3-5) http://kitt.uni-obuda.hu/mmaws/

Fazekas Sándor, Péter Tamás (2012.2) Database system to support Győr's traffic modelization, SECOND SCIENTIFIC WORKSHOP of Doctoral Schools Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, BME (Budapest, November 22, 2012) pp. 1-7. Doi: KJK2012-2-K4, ISBN 978-963-313-070-4, Kiadó: BME KSKFazekas, S., Péter T. (2013) Design of Győr's traffic database, Third Scientific Workshop of Faculty Doctoral Schools, Budapest, Budapest, May 28, 2013 pp. 1-7. Doi: KJK2013-1-K4, ISBN 978-963-313-080-3, Kiadó: BME KSK

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.

Kövesné Gilicze É. és Debreczeni G. (2003): 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.

Dr. Lakatos István (2001) Modern emission test of diesel engines in Europe In: Péter T (szerk.) Symposium on Euroconform Complex Retraining of Specialists in Road Transport. 460 p. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2001.06.09-2001.06.15. Budapest: BME, pp. 147-153.

Lakatos István (2004.1) Examination of effect of timing of charge replace with mathematical modell and experimentally, ACTA MECHANICA SLOVACA 8: pp. 403-406. (2004) Effective Production, Transmission and Consumption of Energy, 6th International Scientific Conference

Lakatos István (2004.2) Effect of timing on the effiency and exhaust of four-stroke, uncharged SOHC Otto-engines In: Lehoczky László, Kalmár László (szerk.) MicroCAD 2004 International Scientific Conference. Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2004.03.18-2004.03.19. Miskolc: ME, 2004. pp. 77-83. szekció., Áramlás- és hőtechnika (ISBN:963-661-612-4)

Lakatos István (2007) Effect of valve timing on exhaust emission In: Anon (szerk.) 8th International Conference on Heat Engines and Environmental Protection. 2007. pp. 207-214. Konferencia helye, ideje: Balatonfüred, Magyarország, 2007.05.28-2007.05.30. (ISBN:978 963 420 907 2)

Lakatos István (2012) Modeling of a Naturally Aspirated Gasoline Engine in the GT-suite Software Environment. In: Matija Fajdiga, Jernej Klemenc (szerk.). IAT 2012 – Innovative Automotive Technology. Konferencia helye, ideje: Dolenjske Toplice, Szlovénia, 2012.04.12-2012.04.13. Ljubljana: LAVEK, 2012. pp. 77-94. (ISBN:978-961-6536-61-5)

Luenberger (1979) Introduction to Dynamics Systems, Wiley, New York, 1979

Oussama Derbel, Tamás Péter, Hossni Zebiri, Benjamin Mourllion and Michel Basset (2012) Modified Intelligent Driver Model, Peridoica Polytechnica-Transportation Engineering 40/2 (2012) 53–60.

doi: 10.3311/pp.tr.2012-2.02 web: http://www.pp.bme.hu/ tr ISSN 1587-3811 (online version); ISSN 0303-7800 (paper version)

Oussama Derbel, Peter Tamas, Hossni Zebiri, Benjamin Mourllion and Michel Basset (2013) Modified Intelligent Driver Model for driver safety and traffic stability improvement, 7.IFAC Symposium Tokyo 2013 szept. 4-7. http://www.sice.or.jp/IFAC-AAC2013/details.html Organized by: International Federation of Automatic Control,Technical Committee on Automotive Control (IFAC-TC7.1) pp, 734-739 132-ik anyag. Doi: SaB2.3

Péter, (2007.1) Dr. Péter Tamás: Nagyméretû nemlineáris közlekedési hálózatok modellezése, Közlekedéstudományi szemle, 9. 2007. Szept. LVII. Évf. pp. 322- 331.

Péter, (2007.2) Dr. Péter Tamás: Nagyméretű közúti közlekedési hálózatok analízise. MMA „Innováció és fenntartható felszíni közlekedés" - Konferencia, 2007. szeptember 4-5-6 Budapest, BMF http://www.kitt.bmf.hu/mmaws/index.html

Péter T., (2008) Péter T.: Tetszőleges méretű nemlineáris közúti közlekedési hálózatok modellezése speciális hálózati gráffal, amelyben a gráf csúcsai általánosított szakaszok, a gráf élei a csúcsok közötti kooperálót leíró dinamikus relációk. A jövő járműve, III:(3-4) 26-29 (2008).

Péter T., (2009) Péter T.: Járműforgalmi rendszerek modellezése és irányítása, célok, kutatási területek és eredmények. A jövő járműve, IV:(1-2) 59-78 (2009).

T. Peter, and M. Basset (2009) 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 T, and Bokor J (2010.1) Research for the modelling and control of traffic, In: Scientific Society for Mechanical Engineering ,33rd Fisita-World Automotive Congress: Proceedings, Budapest, Magyarország, 2010.05.30-2010.06.04. Budapest: GTE, 2010. pp. 66-73. (ISBN:978-963-9058-28-6)

Péter T, and Bokor J (2010.2) 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) 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 Society of Automotive Engineers (STA), 2011. pp. 26-36. (ISBN:978-84-615-1794-7)

Péter and Bokor J (2011) 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. (2012.1) 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 Tamás (2012.2) Paradigmaváltás, amely elvezetett a globális közúti hálózat működésének leírásához és a dinamikus modell létrehozásához, Innováció és fenntartható felszíni közlekedés konferencia (IFFK-2012). Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2012.08.29-2012.08.31. Budapest: Óbudai Egyetem, Paper 3. pp. 3-19.(ISBN:978-963-88875-3-5) http://kitt.uni-obuda.hu/mmaws/

Péter, T., Stróbl, A., Bede, Zs., Kalincsák, I., Fazekas, S. (2013) Infokommunikációs technológiák fejlesztése a nagyméretű közúti közlekedési hálózatok közlekedési folyamatainak komplex modellezéséhez, a valós közlekedési folyamatok vizsgálatára és az optimális irányítására. Közlekedéstudományi Konferencia, Győr, 2013. március 21-22. (pp.55-81) Kiadó: Széchenyi István Egyetem, Közlekedési Tanszék. ISBN szám: 978-615-5298-09-7.

Tamas Peter, Jozsef Bokor and Andras Strobl (2013) Model for the analysis of traffic networks and traffic modelling of Győr, pp 167-172. Doi: 0023, IFAC Workshop on Advances in Control and Automation Theory for Transportation Applications (ACATTA 2013) which is to be held in Istanbul, Turkey, 16-17 September 2013. http://www.acatta13.itu.edu.tr/

Sachkov, (1997) Sachkov, Y. L.: On positive orthant controllability of bilinear systems in small codimensions, SIAM J. Control Opt., 35: 29-35, 1997.

Stróbl, A., Péter, T. (2013). Traffic modeling of Győr in project Smarter Transport, Third Scientific Workshop of faculty doctoral schools, Budapest, May 28, 2013 pp. 1-7. Doi: KJK2013-1-K7, ISBN 978-963-313-080-3, Kiadó: BME KSK

Zsuzsanna Bede, Tamás Péter (2010) The Extraction of Unique Velocity Processes from a Macro Model PERIODICA POLYTECHNICA-TRANSPORTATION ENGINEERING 38:(1-2) pp. 114-121. (2010)

Zsuzsanna Bede, Tamás Péter (2011.1) The development of large traffic network model, PERIODICA POLYTECHNICA-TRANSPORTATION ENGINEERING 39:(1-2) pp. 3-5. (2011)

Zsuzsanna Bede, Tamás Péter (2011.2) The mathematical modeling of Reversible Lane System PERIODICA POLYTECHNICA-TRANSPORTATION ENGINEERING 39:(1-2) pp. 7-10. (2011)

Zsuzsanna Bede, Tamás Péter and Ferenc Szauter (2013) Variable network model pp 173-177. Doi: 0026, IFAC Workshop on Advances in Control and Automation Theory for Transportation Applications (ACATTA 2013) which is to be held in Istanbul, Turkey, 16-17 September 2013. http://www.acatta13.itu.edu.tr/

Valcher, (1996) Valcher, M.E.: ControUability and reachability criteria for discrete-time positive systems, International Journal of Control 65(3) (1996) 511-536.

Varga, (2007) Varga I.: "Közúti folyamatok paramétereinek modell alapú becslése és forgalomfüggő irányítása", PhD Értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2007.

Molnár András (2018) Légköri Emisszió Vezérelt Forgalomszervezés, XII. IFFK 2018 Budapest, Online: ISBN 978-963-88875-3-5 Paper 10. pp. 1-6.

Raimundas Junevičius, Marijonas Bogdevičius, Ádám Török (2011) Modelling of internal comustion engines' emission trought the use of trafic flow mathematical models in: Transport 2011 Volume 26(3): 271–278; doi:10.3846/16484142.2011.621978

Roland Romano Vienna (2010) Website Renewable Energy ElectricVehicles; http://loudspeaker.klack.org/seite4.html

AhmedAl-Samari (2016) Study of emissions and fuel economy for parallel hybrid versus conventional vehicles on real world and standard driving cycles in: Alexandria Engineering Journal Volume 56, Issue 4, December 2017, Pages 721-726

Horváth Ágnes (2017) Mikor szabadulhatunk meg a kipufogógázoktól? in: Chief Economist, 2017.08.14.; https://gurulohordo.blog.hu/2017/08/14/mikor_szabadulhatunk_meg_a_kipufogogazoktol

4. Hálózati áthaladás vizsgálata és a trajektória értéke

A kutatási munka közvetlenül a hálózati áthaladás vizsgálatára irányul a járműdinamikai és vezetési tesztelési programok tervezéséhez, továbbá szélesebb körben a tesztpályák minősítésére alkalmazható. Az általános modellezés mellett, ezzel a módszerrel vizsgálható a hurkok kialakulása is az egyes rész-útvonalak többszörös figyelembevételének céljából. Ennek fontos hasznosítási területe az összetett igénybevételek átfogóbb analízise, továbbá a tanuló algoritmusok fejlesztése is, amely a pálya egyes részein egy méréssorozaton belül történő többszörös áthaladásának ismétlésével érhető el és a járművek fedélzeti rendszerinek fejlesztését szolgálja. Az anyag a pálya geometriai gráfjának - és részgráfjainak alkalmazásán keresztül mutatja be a matematikai modellezést. Kitér a nagyméretű hálózati modell kapcsolati mátrixából kinyert Markov modell tulajdonságainak bemutatására is. Ez által, a modellezést kiterjeszti a nagyméretű hálózati modell kapcsolati mátrixának alkalmazására is. Computer-algebrai program elkészítésével mutatja be az egyes modellezési-számítási részleteket. Ez a modellezés és a számítások eredményei a továbbiakban, tesztprogramot tervező és kiértékelő módszer fejlesztését teszi lehetővé.
Ennek célja, az ideális tesztprogram összeállításának elősegítése, amely a megfelelő súlyok alkalmazásával figyelembe veszi a valós ZalaZone pálya geometriáját és a kialakított SmartCityt pályarészt is

1 BEVEZETÉS

A kutatási munka közvetlenül a hálózati áthaladás vizsgálatához kapcsolódik, a járműdinamikai és vezetési tesztelési programok tervezésére, szélesebb körben pedig a tesztpályák minősítésére alkalmazható.

A járműipari tesztpályához kapcsolódó kutatási feladatokon belül kiemelt terület a pálya-képességek elemzése. A munka a pálya képességek elemzésérét szolgálja az autonóm járművek teszteléséhez és egy új és hatékony módszert eredményez.
Az autonóm járművek [15,18,22,24] tesztelésénél, egyaránt fontosak a dinamikus pályaelemek és a városi pályaelemek is, hogy ezek együtt a legmagasabb szinten képviseljék a valós környezet komplex hatásait!

A vizsgálataink szempontjából komoly jelentőséggel bír az is, hogy ennél a komplex problémánál lecsökkentsük a számítások bonyolultságát.
Ezért, olyan módszerre teszünk javaslatot amely, vagy (I) meglévő tesztpálya esetében valamely szempontrendszer mellett állít össze optimális tesztprogramot és kiválasztja a célnak megfelelő legjobb trajektóriák összességét, vagy (II) a pályák tervezésének fázisában, meghatározza az adott célokra a legjobb trajektóriák összességét.

Ez utóbbi irányt szabhat, az újra tervezéskehez és az eljárás algoritmikus módszereket is nyújt a pályamodellek szerkezetének tervezéséhez.

2 A TESZTPÁLYÁK TERVEZÉSÉVEL KAPCSOLATOS VIZSGÁLATOK A

Az autonóm vezetési technológiák fejlesztésére jelentős figyelmet fordítanak, széleskörű kutatást és validálást végeznek a járműrendszerek autonómiájának és biztonságának tesztelésére, I. Passchier, G. v. Vugt, and M. Tideman [7]. A tesztpályát úgy tervezik, és úgy építik meg, hogy szimulálja a valóságos környezetet az előre látható kockázatokkal együtt, R. Chen, M. Arief, D. Zhao [2], tehát a vizsgálatoknál a trajektóriáknak hűségesen és rugalmasan kell alkalmazkodni a valósághoz. Ezek az előnyök már több világszínvonalú CAV létrehozásához vezettek, pl. T. Stevens. [14], Harman [3], Mcity Test Facility,

[4], D. Muoio. [5], ACM. Project [1]. A tervezésnél azonban a CAV értékelési elméletének a bizonyítása, nem igen szerepel még az irodalomban. Erre mutattak rá és dolgozott ki matematikai modellt R. Chen, M. Arief, D. Zhao [2]. Valóban fontos a CAV azon képessége, hogy olyan térbeli, terepi körülmények között működjön, amelyekkel rendszeresen találkoznak az autonóm járművek a valós helyzetetekben! Ilyenek pl., a közúti törvények betartása, e-mellett, a többi járműre és úthasználókra, valamint a gyakran felmerülő veszélyekre történő reagálások is.
Az ilyen esetek vizsgálata a képességellenőrzési listához vezetnek, amely a CAV rendszerekre vonatkozó értékelési kritériumként használható, C. Nowakowski, S. E.Shladover, C.-Y. Chan, and H.-S. Tan. [6], Torc. [16].
Először R. Chen, M. Arief, D. Zhao [2] értékelt olyan szisztematikus megközelítést, amely optimális modellt alkalmaz abból a célból, hogy maximalizálja a CAV értékelés bizonyításának tesztelési képességét.

A tervezési megközelítés célja olyan forgatókönyvek feltérképezése az adott térben, amelyek maximalizálják a CAV értékelési képességét. A kutatások két szempontból fontosak: 1) Nem világos, hogy jelenleg, hogyan osztályozzák és választják ki a tipikus forgatókönyveket valamely nagyszabású valós vezetési adathalmazból; 2) Nem világos jelenleg, hogyan lehet ezeket a forgatókönyveket és a bizonyításokat térképezni.
Az általuk megszabott feladatban, egy tesztelésre alkalmas adott forgatókönyv engedélyezéséhez, olyan térképeket kellett megrajzolniuk az utak és a kereszteződések csoportjából, amelyek támogatják ezen útelem találkozások pontos megvalósítását az értékelés-tervezésben. Ezen kívül, egy un., „értékmérték" is definiálható hozzá, amely bemutatható és felhasználható az úthasználat értékeléséhez. Nagyon fontos megállapítás, hogy az **úteszközök értéke, támogatja a sokoldalúságot, a több forgatókönyvbeli használhatóságot és támogatja a forgatókönyvek egyetemességét is.**

Modellezési megfontolások, korlátok:
A közúti eszközök **S** értékmérésénél az előre feldolgozott $\mathbf{A} = \{a_1, a_2, \ldots, a_{NA}\}$ sorozat vehető alapul a korlátozott építési területen.

1^0. Az egy adott eszközben lévő út-elemek nem fedhetik át az egyéb eszközök útjait.
2^0. Az úti eszközök mértékének benne kell lenniük az **S** korlátozott térben.

Az 1. fázisban a megvalósítható útszakasz részhalmazából, a legmagasabb összetettségű eszközértéket képviselő halmaz kerül kiválasztásra (az összes előzetesen előállított út adathalmazból).
A 2. fázisban az előre kiválasztott halmaznál, az adott térben S-szerinti optimalizálás történik, figyelembe véve a forgatókönyveknél az átmenetekre vonatkozó rugalmasságokat.

A kétfázisú megközelítés célja:
1. fázis tehát a legértékesebb megvalósítható alcsoport kiválasztásának modellje a korlátozások szigorú értelemben történő figyelembevételével.
2. fázis: az optimalizációs modell, amely **tekintettbe veszi az előre kiválasztott optimális készletet, amelynél az *1. fázis alapján* az a cél, hogy maximálva legyen mind számban mind az elemek értékét tekintetbe véve.**

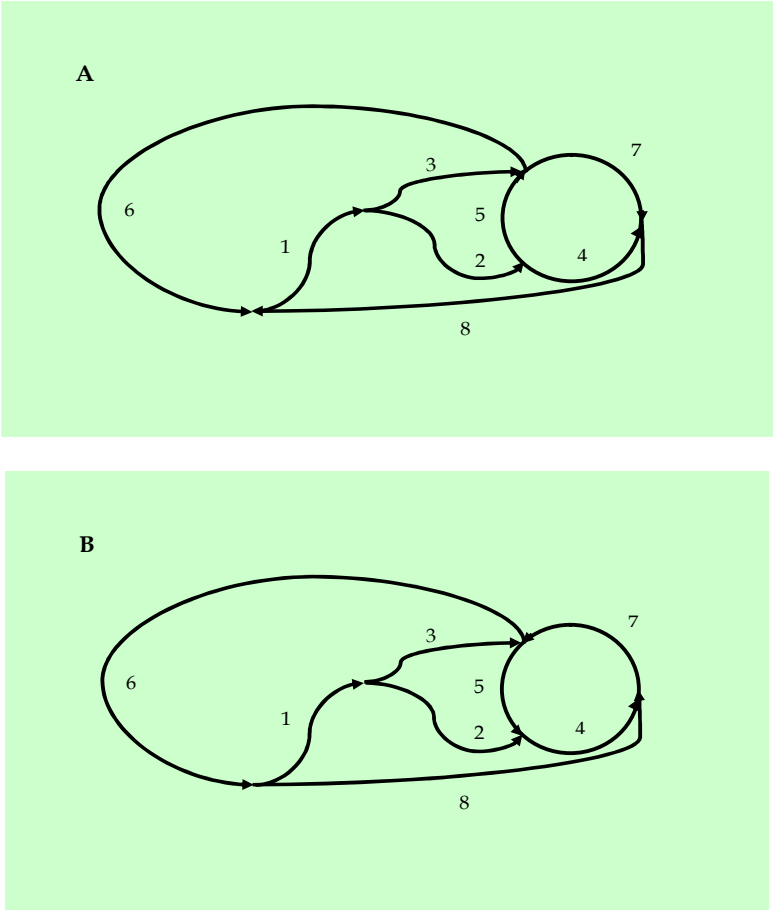
A fentieknél, a korlátozás biztosítja, hogy minden csatlakoztatott eszközpár esetében ki kell választani legalább egy átmeneti utat, amely összeköti a határoló csomópontokat. A korlátozás biztosítja, hogy minden kijelölt átmeneti útjelölt, ne lépjen más belső szegmenshez, hacsak nem az az eset lép fel, hogy egy csomópont épül fel. A modell szerkezetével kapcsolatban, a fentiek alapján, ez a tervezési keretrendszer alapja, amely földrajzi térképet biztosít a legkülönfélébb CAV-forgatókönyvek megvalósításához a korlátozott térben és a forgatókönyv az átmenetek maximális rugalmasságát biztosítja.
A javasolt, értékes módszer azonban, komoly számítástechnikai problémába ütközött. A felírt modell alapján, a meghatározott optimálási eljárás NP problémára vezet, - alapvetően az alkalmazott bináris eszközök következtében, amelyek az eszközformák és kombinált minták érvényességét biztosítják, továbbá néhány korlátozó feltétel sem konvex! Ennél a módszernél, a túlzott számú bináris változók és

a nemlineáris korlátok alkalmazása, jelentős mennyiségű elágazási folyamatot és relaxációs megoldást igényelt, amely a legnagyobb számítási teherré vált a vizsgálatoknál. Az ebből adódó számítási bonyolultság miatt, tovább kell dolgozni a problémák kezelésén, szerzők javaslata szerint, a probléma szétbontásával történő számítástechnikai megoldásokon.

3 AZ ÁLTALUNK KÖVETETT ÚJ MODELLEZÉSI MEGFONTOLÁSOK ÉS A MÓDSZER

Az előző fejezetben látottak alapján, az „Xcity" tanulmány egy komplex optimálási számításon alapuló, új tervezési módszert tárgyal a tesztpályák előállítására. Ennek kapcsán, a szerzők bemutattak egy tervezési eljárást, korlátozott számú közúti eszköz felhasználásával. Az eredmények azt mutatták, hogy a matematikai felírások hatékonyan irányíthatják a hálózati – Xcity - konstrukciók meghatározását, viszont a módszer az exponenciális számítási komplexitása miatt a gyakorlatban nem alkalmazható és a továbbiakban, - a szerzők megállapításai szerit, szétválasztási módszerek alkalmazása jelentheti a jövőbeni irányt.

Esetünkben, a „Zala Zone" tesztpálya [17], viszont már egy megtervezett és megvalósuló tesztpálya, amely már részben üzemel is. Ez a tesztpálya, a jövő járművei és kommunikációs technológiái számára teljes körű tesztkörnyezetet és többszintű tesztelési lehetőséget biztosít a prototípus tesztektől a szériatermék fejlesztésig. A környezetvédelem és a közlekedésbiztonság növelése céljából egyre inkább előtérbe kerülnek a hibrid-, elektromos- és önvezető autók, amelyek fejlesztéséhez egy megfelelő környezetre van szükség. A pálya lehetőséget biztosít hagyományos járműtesztek elvégzésére, továbbá vezetést támogató rendszerek, valamint önvezető járművek széleskörű tesztelésére és validálására is. Alkalmas továbbá a legújabb infokommunikációs rendszerek fejlesztésére és tesztelésére, továbbá járműipari K+F tevékenységek folytatására. Az első fázis keretén belül a dinamikai felület, a nagysebességű kezelhetőségi pálya, a Smart City Zóna első része került kivitelezésre; ezt követi az autópálya szakasz, különböző országúti szakaszok, a Smart City teljessé építése. 2022 elejéig elkészül az alacsony sebességű kezelhetőségi pálya, az emelkedők, zajmérő felület és az ADAS tesztfelület.
Az Xcity, az útvonalakon megfigyelt tipikus görbedarabokból építkezik – tehát ezekből állítja össze a trajektória típusokat, az-az a teszt útvonalakat. Ez, önmagában is láthatóan igen nagy számítási teljesítményt igényel. Tekintsük most a „Zala Zone" tesztpályát, - mint modellt, ekkor a valós pályagörbék valós szektordarabokból állnak össze. Tehát ennél, valós görbedarabok, szektorok a trajektóriák építőelemei, az-az a teszt útvonalak. Igen fontos, hogy ez által a hálózati megközelítés is tökéletesen alkalmazható a modellezéseknél [19,20,21,23]. Ekkor, az összes potenciális elágazási pontot figyelembe véve, a tesztpálya minden lehetséges valóságos útvonala előállítható az egyes disztribúciós pontok figyelembevételével. Tehát esetünkben - az Xcity tervezésével szemben - nincs probléma a kontinuitással, az illeszkedéssel, a valósághűséggel és a számítási kapacitással sem. Az általunk bemutatásra kerülő algoritmussal, nagy sebességgel történhet a valós teszt utak előállítása, minden geometria-számítási korlát és gépi számítási korlátozás nélkül. A fizikai korlátot, ez esetben nem számíthatósági korlát jelenti, hanem esetleg, a már megtervezett tesztpálya geometriai adottságaiból származó képességek „a pálya megtervezett és megvalósított geometriai elemeinek halmaza" jelenti. Ez olyan jellegű, hogy elvben, fennállhat annak a lehetősége, hogy esetleg, matematikai optimálási módszerrel lehetett volna még jobb pályát is tervezni. Visszatérve az összes lehetséges pálya trajektória előállítására, ehhez esetünkben felhasználjuk az általunk kifejlesztett nagyméretű hálózati modellt, - közelebbről ennek a kapcsolati mátrixát [8, 9, 10, 11, 12,13]. A pálya összes lehetséges trajektóriájának meghatározásához, bevezetjük az $\alpha_{i,j}$ disztribúciós markelt, amely pontosan jelez minden olyan útvonalat, amely az általa előidézett elágazásból származik. Az *1. ábrán* felvett mintapályán vizsgáljuk az A és B eseteket, amelyek egyes szektorokon eltérő szektor-irányításokat alkalmaznak. Az A és B esetében kialakíthatók tehát különböző, zártgörbéjű pálya trajektóriák a tesztelések céljára és vizsgálhatók az értékelési módszerek is. Ennek az a célja, hogy meghatározhatók legyenek a tesztelő szempontjainak legjobban megfelelő, legértékesebb zárt pálya trajektóriák.



1. ábra: Az 1. – 8. rész-pályagörbékből kialakított pálya esetén, az egyes eltérő szektor-irányítások miatt a bejáráshoz két különböző, egy A és egy B típusú trajektória halmaz keletkezik

A kutatásunk tehát, olyan alkalmazható matematikai módszerek kidolgozására irányul, amely pontosan figyelembe veszi a trajektóriák geometriáját és a pálya trajektóriákra egzakt minősítési - értékelési eljárás végrehajtására is képes legyen. Az a célunk, hogy a trajektóriák előállítására kidolgozandó mátrix transzformációs kifejtési módszer gyors, valós idejű számítási teljesítményt biztosítson, tehát e-tekintetben is legyen hatékony, szemben, az NP számítási teljesítményt igénylő Xcity - módszerhez képest.

4 AZ OPTIMÁLIS TRAJEKTÓRIÁK KIVÁLASZTÁSA

Felmerül a lehetőség a csatlakozó görbe darabokból felépülő trajektóriák szekvenciális felépítésű, dinamikus programozással történő optimális kiválasztására. Ez esetben a szekvenciális optimálás végrehajtására, pl. a Bellman optimalitási tételt lehet alkalmazni. A megközelítés, az optimalitási tétel diszkrét, determinisztikus rendszerekre történő alkalmazása, figyelembe véve, hogy „Egy optimális politika, csak optimális al politikákból állhat”.

Azt, hogy esetünkben mégsem ezt választjuk az indokolja, hogy egy igen elegáns és gyors mátrix-transzformációs kifejtési módszert határozhatunk meg a tárgyalt forgalmi modell alapján. A tesztpályán fellépő forgalmat tekintve a $\boldsymbol{K}_{11}$ kapcsolati mátrix tartalmazza a belső szektor-elemek közötti v_{ij} dinamikus sebesség kapcsolatokat.
A $\boldsymbol{K}_{11}$ kapcsolati mátrix meghatározza, hogy tetszőleges „*j*” szektornál melyik „*i*” szektorra, vagy szektorokra áramlik szabályozott sebességgel, az ugyancsak szabályozott anyagmennyiség az *n* számú

belső szektorból álló tesztpálya esetében (i,j = 1,2,…n). A feladatunk megoldásához a $\boldsymbol{K}_{11}$ mátrixból képezzük a **P** átmenet-valószínűségi, v. disztribúciós mátrixot oly módon, hogy a mátrix elemeknél csupán az $\alpha_{ij} \geq 0$ disztribúciós, értékeket tartjuk meg és a többi dinamikus szabályozást végrehajtó függvény hatását 1 értékkel figyelembe véve semlegesítjük. Ezen kívül, szükséges még, hogy a főátlóbeli elemek helyébe 0 értékeket írjunk, hogy minden figyelembe vett továbblépés eredménye ne tűnjön el (az-az rögzítve megmaradjon). A valós dinamikus folyamatoknál fellépő anyagelvonások hatásainak ennél a vizsgálatnál nincs jelentősége, mert csupán az összes továbblépési lehetőségek meghatározása a feladat, ugyanakkor az összes korábbi tartózkodási hely megjelölése, megőrzése egyben szükséges is az összes útvonal meghatározásának a rekonstrukciókhoz. Az alapkoncepciónk az, hogy minden korábbi szétválás, végig pontos nyomot hagyjon a továbbiakban azoknál az útvonalaknál, amelyek a szétválásból származtak. Tehát, **markerek** határozzák meg minden egyes útvonal kialakulását. Ezek a jól azonosítható markerek az $\alpha_{ij} \geq 0$ disztribúciók.

A fentiekhez a $\boldsymbol{K}_{11}$ mátrixból eredő Markov tulajdonságot használjuk fel. A mátrix minden j-ik oszlopánál (j=1,2, ... , n), a j szektoron tartózkodás feltételtételétől függő, $\alpha_{ij} \geq 0$ diszkrét eloszlás (a j oszlopban ezek összege 1) határozza meg azt, hogy mekkora annak a valószínűsége, hogy j-ről valamely i szektorra lépünk tovább:

$$\alpha_{ij} = P(i \mid j) \quad \text{(Esetünkben: } i \neq j\text{)} \tag{1}$$

Ily módon, a **P=P**[α_{ij}] mátrix oszlopelemeinek összege: $\sum_{i=1}^{n} \alpha_{ij} = 1;$ (j=1,2, ... , n). Jól látható, hogy az így definiált **P** mátrix, egy diszkrét Markov láncot határoz meg. Megjegyezzük, hogy mivel az $\alpha_{ij}(x(t),t)$ értéket csak rövid időtartamokra tekinthetők konstansnak egy valós forgalmi hálózaton és ténylegesen az időtől és a szektorok $x(t)$ jármű sűrűség állapot jellemzőjétől is függenek, ezért az itt meghatározott *Markov lánc inhomogén*. A **P** mátrix elemeire az sem mondható, ki hogy ezek határozottan pozitívak, mivel vannak köztük nagy számban 0 elemek is, így a tárgyalt *Markov lánc egyúttal irreguláris* is. It is important to emphasize that when defining paths, distributions are not time- and state-dependent features. These are fixed constants because we want to consider all possible road sections in the applied procedure. A vizsgálatot a továbbiakban úgy végezzük el, hogy elindulunk az 1, (a pályán kapunak tekintett) input szektorról és lépésenként előre haladva határozzuk meg a szétosztásokat (szóródásokat). Ennek megfelelően, a kezdeti időpontban az induláskor csupán az 1-es szektoron tartózkodunk p>0 valószínűséggel. Az „1" kezdeti állapotok valószínűségeit határozza meg a $\mathbf{p}_1$ vektor: a feltételeknek megfelelően az 1-es szektoron p valószínűségű a tartózkodás, a többi szektoron viszont 0 értéket vesznek fel a tartózkodások valószínűségei:

$$p_1 = \begin{bmatrix} p \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

A következő, (2) állapot-valószínűségeket $\mathbf{p}_2$ vektor határozza meg, számítása a **P** mátrix és a $\mathbf{p}_1$ vektor felhasználásával történik, amelynél a **P** mátrix tartalmaz az 1-ről történő továbbhaladásra vonatkozó disztribúciós irányokat és értékeket:

$$p_2 = P \cdot p_1 \tag{3}$$

A következő, (3) állapot-valószínűségeket meghatározó $\mathbf{p}_3$ vektor számítása hasonlóan, rekurzív módon történik a **P** mátrix és a $\mathbf{p}_2$ vektor felhasználásával. Ennél, ugyancsak a **P** mátrix tartalmaz az 2-ről történő továbbhaladásra vonatkozó disztribúciós irányokat és értékeket:

$$p_3 = P \cdot p_2 \tag{4}$$

Végül, az (n-ik) állapot-valószínűségeket meghatározó $\mathbf{p}_n$ vektor számítása ugyancsak rekurzív módon történik a **P** mátrix és a $\mathbf{p}_{n-1}$ vektor felhasználásával:

$$p_n = P \cdot p_{n-1} \tag{5}$$

A Diszkrét Markov láncokra vonatkozó összefüggésre utalva, a feni levezetésből is jól látható, hogy egy lépéses módszerrel is elő állítható a $\mathbf{p}_n$ állapot valószínűség vektor a **P** mátrix n-ik hatványa és a $\mathbf{p}_1$ vektor szorzataként:

$$p_n = P^n \cdot p_1 \tag{6}$$

Az *n* lépést követően, ha a tartományban elhelyezkedő szektoroknak nincs kivezetése, az-az nincs további átadás, valamint hurkokat ugyan alkalmazhatunk az útvonalaknál, de ezeket nem végtelen ciklusban, akkor véges lépést követően stabil állapot lép fel, tehát az egyes szektorokon nem módosulnak már a tartózkodási valószínűségek az algoritmus további alkalmazásával:

$$\mathbf{p}_n = \mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{p}_{n+2} = \ldots = \mathbf{p}_{n+k} = \ldots \tag{7}$$

Ennek az a jelentősége, hogy $\mathbf{p}_n$ vektor nem zérus koordinátái alapján megállapítható, hogy hány különböző – párhuzamosnak tekinthető - út vezetett el a 1-es input szektortól bármely más szektorhoz. Ennél, azok az útvonalak a fontosak, amelyek a legtöbb szektorból álló, legtávolabbi „outputoknak" tekinthető szektorokhoz vezetnek, mivel ezek nyújthatnak legtöbb lehetőséget a minőségi vizsgálatokhoz. Ezt az *1.a és 1.b ábrákon* bemutatott példákon fogjuk szemléltetni.

5 A MÓDSZER BEMUTATÁSA 8 SZEKTORBÓL ÁLLÓ, KÉTFÉLE TESZTPÁLYA ESETÉRE

A módszernek fontos szerepe van egy tesztpálya esetében, a tetszőleges input felvételét követően, az összes trajektória gépi úton történő előállításánál. Hasonlóan, fontos feladatot láthat el a teszt szempontok szerinti különböző kritériumok és rangsorok meghatározásánál és az értékelésénél is.

Tekintsük, az *1a és 1b. ábrákon, az n*= 8 szektorokból álló „tesztpályát". Vizsgáljuk meg az A pályán, valamely kiválasztott szektorról, esetünkben legyen ez az 1-es, a kialakítható összes lehetséges zárt görbéjű pálya trajektóriát, tehát azokat, amelyek az 1-ről indulnak és 1-re érkeznek meg. B pályán pedig 1-ről a 6-on, a 7-en és a 8-szakaszon végződő trajektóriákat.

Tekintsük az *1.a és 1.b ábrákon látható* tesztpályák **P** átmenet-valószínűségi mátrixait, (8.a) és (8.b), amelyek az egymástól különböző i és j elemek közötti kapcsolatot maghatározó mátrixok.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{2,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{3,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{4,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{5,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{6,3} & 0 & \alpha_{6,5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{7,3} & 0 & \alpha_{7,5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_{8,4} & 0 & 0 & \alpha_{8,7} & 0 \end{bmatrix} \tag{8.a}$$

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

A konstrukció alapján, az inputnak tekintett 1-es szektoron kiinduláskor p valószínűségű a tartózkodás a többi szektoron pedig 0 értéket vesznek fel a tartózkodások valószínűségei. Ezt a kiindulási állapotot határozza meg a P1 vektor:

$$\mathrm{P1} = \begin{bmatrix} p \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Rendre számítva a továbbhaladás során, a szektoron a tartózkodási valószínűségűségeket: $p_2 = P \cdot p_1$, $p_3 = P \cdot p_2, ...,\ p_n = P \cdot p_{n-1}$, alábbi vektorsorozatot kapjuk, amelyek az A és B pályák esetében az állapot-valószínűségeket határozzák meg:

$$\mathrm{P2} = \begin{bmatrix} p \\ \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{3,1}\, p \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9.a) \qquad \mathrm{P2} = \begin{bmatrix} p \\ \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{3,1}\, p \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9.b)$$

Ahol, az “a” index az A-pályára, “b” index a B pályára vonatkozik.

$$P3 = \begin{bmatrix} p \\ \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{3,1}\, p \\ \alpha_{4,2}\, \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{5,2}\, \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{6,3}\, \alpha_{3,1}\, p \\ \alpha_{7,3}\, \alpha_{3,1}\, p \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10.a) \qquad P3 = \begin{bmatrix} p \\ \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{3,1}\, p \\ \alpha_{4,2}\, \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{5,3}\, \alpha_{3,1}\, p \\ \alpha_{6,3}\, \alpha_{3,1}\, p \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10.b)$$

$$P4 = \begin{bmatrix} p \\ \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{3,1}\, p \\ \alpha_{4,2}\, \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{5,2}\, \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{6,3}\, \alpha_{3,1}\, p + \alpha_{6,5}\, \alpha_{5,2}\, \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{7,3}\, \alpha_{3,1}\, p + \alpha_{7,5}\, \alpha_{5,2}\, \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{8,4}\, \alpha_{4,2}\, \alpha_{2,1}\, p + \alpha_{8,7}\, \alpha_{7,3}\, \alpha_{3,1}\, p \end{bmatrix} \quad (11.a)$$

$$P4 = \begin{bmatrix} p \\ \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{3,1}\, p \\ \alpha_{4,2}\, \alpha_{2,1}\, p + \alpha_{4,5}\, \alpha_{5,3}\, \alpha_{3,1}\, p \\ \alpha_{5,3}\, \alpha_{3,1}\, p \\ \alpha_{6,3}\, \alpha_{3,1}\, p \\ \alpha_{7,4}\, \alpha_{4,2}\, \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{8,6}\, \alpha_{6,3}\, \alpha_{3,1}\, p \end{bmatrix} \quad (11.b)$$

$$P5 = \begin{bmatrix} p \\ \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{3,1}\, p \\ \alpha_{4,2}\, \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{5,2}\, \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{6,3}\, \alpha_{3,1}\, p + \alpha_{6,5}\, \alpha_{5,2}\, \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{7,3}\, \alpha_{3,1}\, p + \alpha_{7,5}\, \alpha_{5,2}\, \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{8,4}\, \alpha_{4,2}\, \alpha_{2,1}\, p + \alpha_{8,7} \left(\alpha_{7,3}\, \alpha_{3,1}\, p + \alpha_{7,5}\, \alpha_{5,2}\, \alpha_{2,1}\, p\right) \end{bmatrix} \qquad (12.a)$$

$$P5 = \begin{vmatrix} p \\ \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{3,1}\, p \\ \alpha_{4,2}\, \alpha_{2,1}\, p + \alpha_{4,5}\, \alpha_{5,3}\, \alpha_{3,1}\, p \\ \alpha_{5,3}\, \alpha_{3,1}\, p \\ \alpha_{6,3}\, \alpha_{3,1}\, p \\ \alpha_{7,4} \left(\alpha_{4,2}\, \alpha_{2,1}\, p + \alpha_{4,5}\, \alpha_{5,3}\, \alpha_{3,1}\, p\right) + \alpha_{7,8}\, \alpha_{8,6}\, \alpha_{6,3}\, \alpha_{3,1}\, p \\ \alpha_{8,6}\, \alpha_{6,3}\, \alpha_{3,1}\, p \end{vmatrix} \qquad (12.b)$$

$$P6 = \begin{bmatrix} p \\ \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{3,1}\, p \\ \alpha_{4,2}\, \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{5,2}\, \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{6,3}\, \alpha_{3,1}\, p + \alpha_{6,5}\, \alpha_{5,2}\, \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{7,3}\, \alpha_{3,1}\, p + \alpha_{7,5}\, \alpha_{5,2}\, \alpha_{2,1}\, p \\ \alpha_{8,4}\, \alpha_{4,2}\, \alpha_{2,1}\, p + \alpha_{8,7} \left(\alpha_{7,3}\, \alpha_{3,1}\, p + \alpha_{7,5}\, \alpha_{5,2}\, \alpha_{2,1}\, p\right) \end{bmatrix} \qquad (13.)$$

$$P6=\left|\begin{array}{c} p \\ \alpha_{2,1}\,p \\ \alpha_{3,1}\,p \\ \alpha_{4,2}\,\alpha_{2,1}\,p+\alpha_{4,5}\,\alpha_{5,3}\,\alpha_{3,1}\,p \\ \alpha_{5,3}\,\alpha_{3,1}\,p \\ \alpha_{6,3}\,\alpha_{3,1}\,p \\ \alpha_{7,4}\left(\alpha_{4,2}\,\alpha_{2,1}\,p+\alpha_{4,5}\,\alpha_{5,3}\,\alpha_{3,1}\,p\right)+\alpha_{7,8}\,\alpha_{8,6}\,\alpha_{6,3}\,\alpha_{3,1}\,p \\ \alpha_{8,6}\,\alpha_{6,3}\,\alpha_{3,1}\,p \end{array}\right| \qquad (13.b)$$

A számítás során az 5. transzformációs lépés után (amely már meghatározta az összes lehetséges útvonalat) már nem változik a P_j valószínűségi vektor. Ez abból következik, hogy az alkalmazott átment valószínűség mátrix oly módon lett felírva, hogy az „A”- esetben a 6-os és 8-as szektorok már nem adnak tovább járművet egyetlen más szektorra sem. A „B” esetben a 6-os, a 7-es és a 8-as szektoron végződnek az útvonalak.
Az 1-inputból kiinduló összes útvonal úgy adható meg, hogy meghatározzuk, hogy hány útvonal vezet külön-külön a vég-szektorokhoz. (A –esetben az 1-től a 6-outputhoz és az 1-től a 8-outputhoz? B – esetben 1-től a 6-outputhoz, az 1-től a 7-outputhoz és az 1-től a 8-outputhoz?)
„A”- esetet tekintve: Az 1-től a 6-outputhoz vezető útvonalaknál a vektor 6. koordinátáját kell vizsgálni. Ennél két összeget látunk, amelyet az eredményezett, hogy 6-hoz két párhuzamos útvonalon jutottunk el.
Ezeket az útvonalakat az α_{ij} disztribúciók második indexeinek jobbról balra történő olvasásai mutatják!

$$\mathbf{P8}[6]=\alpha_{6,3}\,\alpha_{3,1}\,p+\alpha_{6,5}\,\alpha_{5,2}\,\alpha_{2,1}\,p \qquad (14)$$

Az első I: 1-ről 3-ra és 3-ról 6-ra vezet;
A második II: 1-ről 2-re, majd 2 -ről 5-re és 5-ről 6-ra vezet.

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

$$\mathbf{P8}[8]=\alpha_{8,4}\,\alpha_{4,2}\,\alpha_{2,1}\,p+\alpha_{8,7}\left(\alpha_{7,3}\,\alpha_{3,1}\,p+\alpha_{7,5}\,\alpha_{5,2}\,\alpha_{2,1}\,p\right) \qquad (15)$$

Az első, III-al jelölve: 1-ből 2-re majd 2-ről 4-re végül, 4-ről 8-ra vezet.
A második, IV-al jelölve: 1-ről 3-ra, 3-ról 7-re és 7-ről 8-ra vezet .
A harmadik, V-al jelölve: 1-ről 2-re, 2-ről 5-re, 5-ről 7-re végül 7-ről 8-ra vezet.

Jól látható, hogy a Compuer-algebrai módszerrel előállított (14) és (15) képletek paraméteres matematikai formulák. Az útvonalkódok meghatározására vonatkozó kiértékelésük, stringek és karakterek feldolgozásával történik. Ezek a képletek szorzatok összegeiből állnak és minden szorzatot „+” jel választ el a következőtől. Ezek a szorzatok alkotják a stringeket, amelyekben jobbról balra haladva a karakterek analízisét végezve, csupán az alfa karakter indexeit gyűjtjük ki és az egymás utáni két azonos indexeket csak egyszer vesszük figyelembe. Az így meghatározott számsorozat, az útvonalat alkotó, egymást követő és egymáshoz csatlakozó szektorelemek sorszámai. (Lásd I.,II.,...,V. útvonalak.)

A „B” esetben, hasonlóan a meghatározott feladatban az összes olyan útvonalat határozzuk meg, amelyek az 1 szektorról indulnak és vagy a 6-on, vagy a 7-es szektoron, vagy a 8-as szektoron végződnek:

$$\mathbf{P8}[6]=\alpha_{6,3}\,\alpha_{3,1}\,p \tag{16}$$

$$\mathbf{P8}[7]=\alpha_{7,4}\left(\alpha_{4,2}\,\alpha_{2,1}\,p+\alpha_{4,5}\,\alpha_{5,3}\,\alpha_{3,1}\,p\right)+\alpha_{7,8}\,\alpha_{8,6}\,\alpha_{6,3}\,\alpha_{3,1}\,p \tag{17}$$

$$\mathbf{P8}[8]=\alpha_{8,6}\,\alpha_{6,3}\,\alpha_{3,1}\,p \tag{18}$$

Az I: 1-ről 3-ra és 3-ról 6-ra vezet; (a P8[6] által meghatározott útvonal)
II: 1-ről 3-ra, 3- ról 6-ra, 6-ról 8-ra, végül 8-ról 7-re vezet; (P8[7] által meghatározott útvonal)
III: 1-ről 3-ra, 3-ról 5-re, 5-ről 4-re, végül 4-ről 7-re vezet; (P8[7] által meghatározott útvonal)
IV: 1-ről 2-re, 2-ről 4-re, végül 4-ről 7-re vezet; (P8[7] által meghatározott útvonal)
V: 1-ről 3-ra, 3-ról 6-ra, végül 6-ról 8-ra vezet; (P8[8] által meghatározott útvonal)

6 A SZÁMÍTÁSOKRA VONATKOZÓ MÁTRIX MŰVELETEK BEMUTATÁSA

Összefoglalva, mindkét esetben az 1 inputtól összesen 5-5 db. különböző útvonal vezet, úgy, hogy az egy-egy útvonalon felhasznált szektorok mindegyike csak egyszer lett felhasználva.
A fenti mátrix transzformációs algoritmus alapján meghatároztuk a *2.a és 2.b ábrákon* látható tesztpályákesetén az összes trajektóriát. Ezek az *i*= I.,II., …, V. trajektóriák a (19.a és 19.b) **Tr** mátrix soraikban vannak kódolva oly módon, hogy ahol 1-es szerepel az *i*-ik sorban, az a *j* szektor része az *i*-ik trajektóriának:

$$\mathbf{Tr}=\begin{bmatrix} 1&0&1&0&0&1&0&0\\ 1&1&0&0&1&1&0&0\\ 1&1&0&1&0&0&0&1\\ 1&0&1&0&0&0&1&1\\ 1&1&0&0&1&0&1&1 \end{bmatrix} \tag{19.a}$$

$$\mathbf{Tr}=\begin{bmatrix} 1&0&1&0&0&1&0&0\\ 1&0&1&0&0&1&1&1\\ 1&0&1&1&1&0&1&0\\ 1&1&0&1&0&0&1&0\\ 1&0&1&0&0&1&0&1 \end{bmatrix} \tag{19.b}$$

A (20.a és 20.b) **Ck** mátrix [i,j] elemei az egyes trajektória elemek (8 db. szektor elem van) értékeit tartalmazzák az adott tesztelési program esetén.

$$\mathbf{Ck}=\begin{bmatrix} 1.5&2.5&3.2&5.7&4.1&7.6&3.8&9.5\\ 1.5&2.5&3.2&5.7&4.1&7.6&3.8&9.5\\ 1.5&2.5&3.2&5.7&4.1&7.6&3.8&9.5\\ 1.5&2.5&3.2&5.7&4.1&7.6&3.8&9.5\\ 1.5&2.5&3.2&5.7&4.1&7.6&3.8&9.5 \end{bmatrix} \tag{20.a}$$

$$\mathbf{Ck}=\begin{bmatrix} 1.5&2.5&3.2&5.7&4.1&7.6&3.8&9.5\\ 1.5&2.5&3.2&5.7&4.1&7.6&3.8&9.5\\ 1.5&2.5&3.2&5.7&4.1&7.6&3.8&9.5\\ 1.5&2.5&3.2&5.7&4.1&7.6&3.8&9.5\\ 1.5&2.5&3.2&5.7&4.1&7.6&3.8&9.5 \end{bmatrix} \tag{20.b}$$

A (21.a és 21.b) **Cv** mátrix [i,j] elemei az egyes trajektória elemeknél a szektorváltozás értékeit adják meg az adott tesztelési program esetén. Az érték az átadó szektorhoz van hozzárendelve.

$$\mathbf{Cv} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & 1.6 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 1.2 & 0 & 0 & 0 & 1.3 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 1.1 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & 1.6 & 0 & 1.2 & 1.3 \end{bmatrix} \qquad (21.a)$$

$$\mathbf{Cv} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.9 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (21.b)$$

A (22.a és 22.b) **C** mátrix [i,j] elemei az összegzett értékek az egyes trajektória elemeknél az adott tesztelési program esetén:

$$\mathbf{C} = \mathbf{Ck} + \mathbf{Cv} = \begin{bmatrix} 1.5 & 2.5 & 3.7 & 5.7 & 4.1 & 7.7 & 3.8 & 9.5 \\ 1.5 & 3.0 & 3.2 & 5.7 & 5.7 & 8.1 & 3.8 & 9.5 \\ 1.5 & 3.0 & 3.2 & 6.9 & 4.1 & 7.6 & 3.8 & 10.8 \\ 1.5 & 2.5 & 3.7 & 5.7 & 4.1 & 7.6 & 4.0 & 10.6 \\ 1.5 & 3.0 & 3.2 & 5.7 & 5.7 & 7.6 & 5.0 & 10.8 \end{bmatrix} \qquad (22.a)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{Ck} + \mathbf{Cv} = \begin{bmatrix} 1.5 & 2.5 & 3.7 & 5.7 & 4.1 & 7.7 & 3.8 & 9.5 \\ 1.5 & 3.0 & 3.2 & 5.7 & 5.7 & 8.1 & 3.8 & 9.5 \\ 1.5 & 3.0 & 3.2 & 6.9 & 4.1 & 7.6 & 3.8 & 10.8 \\ 1.5 & 2.5 & 3.7 & 5.7 & 4.1 & 7.6 & 4.0 & 10.6 \\ 1.5 & 3.0 & 3.2 & 5.7 & 5.7 & 7.6 & 5.0 & 10.8 \end{bmatrix} \qquad (22.b)$$

A (23.a és 23.b) **C•Tr** mátrix [i,j] elemei a tényleges trajektóriákat alkotó szektorok teszt-értékei, amely szorzat a két mátrix Hadamard szorzata:

$$\mathbf{C} \cdot \mathbf{Tr} = \begin{bmatrix} 1.5 & 0. & 3.7 & 0. & 0. & 7.7 & 0. & 0. \\ 1.5 & 3.0 & 0. & 0. & 5.7 & 8.1 & 0. & 0. \\ 1.5 & 3.0 & 0. & 6.9 & 0. & 0. & 0. & 10.8 \\ 1.5 & 0. & 3.7 & 0. & 0. & 0. & 4.0 & 10.6 \\ 1.5 & 3.0 & 0. & 0. & 5.7 & 0. & 5.0 & 10.8 \end{bmatrix} \qquad (23.a)$$

$$\mathbf{C} \cdot \mathbf{Tr} = \begin{bmatrix} 1.5 & 0. & 3.7 & 0. & 0. & 7.7 & 0. & 0. \\ 1.5 & 0. & 3.2 & 0. & 0. & 8.1 & 3.8 & 9.5 \\ 1.5 & 0. & 3.2 & 6.9 & 4.1 & 0. & 3.8 & 0. \\ 1.5 & 2.5 & 0. & 5.7 & 0. & 0. & 4.0 & 0. \\ 1.5 & 0. & 3.2 & 0. & 0. & 7.6 & 0. & 10.8 \end{bmatrix} \qquad (23.b)$$

A (24.a és 24.b) **Sc** vektor, a **C.Tr** mátrix sorainak összegzésével nyert vektor, így koordinátái határozzák meg a lehetséges trajektóriák teszt-értékeit:

$$\mathbf{Sc} = \begin{bmatrix} 12.9 \\ 18.3 \\ 22.2 \\ 19.8 \\ 26.0 \end{bmatrix} \quad (24.a) \qquad \mathbf{Sc} = \begin{bmatrix} 12.9 \\ 26.1 \\ 19.5 \\ 13.7 \\ 23.1 \end{bmatrix} \quad (24.b)$$

A (24.a és 24.b) vektorok, az összetett tesztek szerint tartalmazzák az egyes teszt trajektóriák értékeit.

7 ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során felhasználtuk az A és B kapcsolati típusú pályákra felírt átmenet-valószínűségi mátrixot.

i/j	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
2	$\alpha_{21} = P(2\|1)$							
3	$\alpha_{31} = P(3\|1)$							
4		$\alpha_{42} = P(4\|2)$						
5		$\alpha_{52} = P(5\|2)$						
6			$\alpha_{63} = P(6\|3)$		$\alpha_{65} = P(6\|5)$			
7			$\alpha_{73} = P(7\|3)$		$\alpha_{75} = P(7\|5)$			
8				$\alpha_{84} = P(8\|4)$			$\alpha_{87} = P(8\|7)$	

1. *táblázat:* a *2.a ábrához* tartozó $\left[P(i \mid j)\right] = \left[\alpha_{ij}\right]$ átmenet valószínűségi mátrix elemeit, a nagyméretű hálózati modell disztribúciós értékei határozzák meg

i/j	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
2	$\alpha_{21} = P(2\|1)$							
3	$\alpha_{31} = P(3\|1)$							
4		$\alpha_{42} = P(4\|2)$			$\alpha_{45} = P(4\|5)$			
5			$\alpha_{53} = P(5\|3)$					
6			$\alpha_{63} = P(6\|3)$				$\alpha_{67} = P(6\|7)$	
7				$\alpha_{74} = P(7\|4)$				
8						$\alpha_{86} = P(8\|6)$		

2. *táblázat:* a *2.b ábrához* tartozó $\left[P(i \mid j)\right] = \left[\alpha_{ij}\right]$ átmenet valószínűségi mátrix elemeit, a nagyméretű hálózati modell disztribúciós értékei határozzák meg

A kutatás célja olyan hatékony és gyors algoritmus kifejlesztése volt, amely a tesztpálya bármely szektoráról kiinduló és a tesztpálya tetszőlegesen választott, egy vagy több szektorán végződő, összes különböző trajektória meghatározását eredményezte. Ehhez, a kutatásunk felhasználta a nagyméretű közúti hálózati modell kapcsolati mátrixát.
A munka, a tesztpályák minősítésére ill., fejlesztésére és tervezésére szolgál, mivel általa elvégezhetők a meghatározott trajektóriák komplex értékelései is. A számítások egyaránt vizsgálják a szektorok statikus és dinamikus állapotjellemzőit. Figyelembe veszik a szektorok geometriai értékeit és a rajtuk generált szituációk értékeit is, a szektorok csatlakozásainak értékeit és a szektorokon történő áthaladás irányát is, amely szintén szabadon variálható.

A kutatás felhasználási területe a legértékesebb teszt - trajektóriák meghatározása, ill., kiválasztása. Összességében a tesztpálya képességének fejlesztése és a tesztpálya eredményes működésének segítése. A vizsgált trajektóriák esetén, az „m" maximális szektorszám ismeretében, az átmenet-valószínűségi mátrix m-ik hatványának alkalmazásával egy lépésben is meghatározható az útvonalakat tartalmazó vektor.
A disztributivitás markerek, karakter programmal történő analízisével, a trajektóriák automatikusan meghatározhatók a leírtak alapján. A bemutatott módszer a trajektóriák geometriáját pontosan tárgyalja és egzakt módon vizsgálja. A trajektóriák előállítására bemutatott mátrix transzformációs kifejtési módszer rendkívül gyors és valós idejű számítási időigényét tekintve igen hatékony, - amely nagy előny a rendkívüli számítási teljesítményt igénylő Xcity - módszerhez képest. A tárgyalt módszer megépült, vagy tervezés alatt álló teszt-pályák értékelésére egyaránt hatékonyan alkalmazható a tesztelések céljaira, a célfüggvény által meghatározott legértékesebb trajektóriák kiválasztására. A módszer hasonlóan alkalmazható az optimális megoldások kiválasztására a még meg nem épített, de előtervezett pályák lehetőségeinek feltárására és kiértékelésére. Ez fontos lehetőséget biztosít a tervezési fázisokban, a nagyszámú gépi úton megtervezett és előkészített pálya előzetes kiértékelésére és szükség esetén a további tervezésekre.

A fenti eljárás a [8,9,10,11,12,13] makroszkopikus modell azon rendkívül hasznos adottságát használja fel, hogy bármilyen bonyolult közlekedési hálózat esetében a matematikai modell, minden kapcsolatot figyelembe tud venni a trajektóriákat felépítő szektorelemek között.
A kapcsolati hipermátrix, egyrészt megadja bármely szektor esetében, hogy milyen más szektorokkal áll átadási kapcsolatban, másrészt a kapcsolati mátrixot tartalmazó differenciálegyenlet-rendszer írja le a hálózat minden szektorának a dinamikus működését, az-az a teljes hálózat működését. A részletes leírások, a belső automatizmusokra, a disztribúciókra közlekedési lámpairányítási jelekre, az átadási sebességekre stb., a kapcsolatos irodalomjegyzékben megtalálhatók. A tárgyalt modellt, alkalmaztuk különböző nagyméretű közúti közlekedési hálózatok modellezésére.

A modell lényegi tulajdonsága, hogy a K_{11} kapcsolati mátrix tartalmazza minden belső szektorelem összes lehetséges kapcsolatát. Következésképp, a trajektória - elemek folytatását is, ily módon az összes trajektóriát a belső hálózatban.

A tesztpálya hálózat működését szintén ez a kapcsolati hipermátrix foglalja egy egységes struktúrájú rendszerbe.

Természetesen, a szektor-elemek típusa és jellemzői is hozzá rendelhetők az i, j elemekhez: (így, pl. egyenes vonal tetszőleges valós hosszal, tetszőleges körív db., tetszőleges valóságos ívdarabok, a valós geometriai adatokkal), amelyek filekben vannak elhelyezve. Ezek a szektor-elemek, a természetes kapcsolódási pontjaik révén és a pálya forgalmi rendjét figyelembe véve, tetszőlegesen kombinálhatók a kiválasztott trajektória alapján és pontosan illeszkedő, összefüggő folytonos trajektóriákat alkotnak, és természetes módon kiválaszthatók, mivel már egy megtervezett pályából vannak kivéve.

Megítélésünk szerint, az egymáshoz kapcsolódó görbedaraboknál nem csak az egyes görbéknek van értékük (a pályán generált forgalmi szituációk értéke és az útvonalvezetés geometriai tulajdonsága következtében fellépő értéke mellett), hanem még annak is, hogy melyik típusú görbedarab csatlakozik milyen más típusú görbedarabhoz és ennek milyen a vezetésre gyakorolt hatása? Tehát, milyen az átmenet? Ha pl., egyenes szakasz csatlakozik egyenes szakaszhoz és ezek egy egyenesbe esnek, akkor 0 a csatlakozás értéke. Ha irányváltozást is okoz a csatlakozás, akkor a tesztgörbe ennél a csatlakozásnál már bonyolultabb feladatot szab meg a vezetés számára és a csatlakozás értéke már nem feltétlen zérus. Ha azonos sugarú és azonos középpontú körív-darabok csatlakoznak egymáshoz azonos külső körülmények között, akkor a csatlakozás szintén nem szab meg az előbbitől eltérő feladatot, tehát nem igényel a korábbitól eltérő manőverezést és nem eredményez új hatást a jármű mozgására, így a csatlakozás értéke 0. Tehát, az egyes görbedarabok értékelése mellet, a csatlakozások következtében fellépő hatások is értékelendők és figyelembe vehetők az általunk kifejlesztett módszernél a tesztpálya trajektóriák kialakításánál. A modellben ez additív módon járul hozzá a csatlakozó szektor értékeléséhez.

IRODALOM

[1] ACM. THE PROJECT. (2018). url: http://www.acmwillowrun.org/the-project/.

[2] R. Chen, M. Arief, and D. Zhao (2018) An "Xcity" Optimization Approach to Designing Proving Grounds for Connected and Autonomous Vehicles Submission Date: August 1, 2018, pp. 1-18. https://arxiv.org/pdf/1808.03089.pdf

[3] HARMAN (2017). to Co-Develop and Operate the International Cyber Security Smart Mobility Analysis and Research Test (SMART) Range in Israel. 2017. url: https://news.harman.com/releases/releases-20171114.

[4] Mcity Test Facility. (2018). url: https://mcity.umich.edu/our-work/mcity-test-facility/.

[5] D. Muoio. (2018) Uber built a fake city in Pittsburgh with roaming mannequins to test its selfdriving cars. 2018. url: https://www.businessinsider.com/ubers-fake-city-pittsburgh-self-driving-cars-2017-10.

[6] C. Nowakowski, S. E. Shladover, C.-Y. Chan, and H.-S. Tan. 2015 "Development of California Regulations to Govern Testing and Operation of Automated Driving Systems". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2489 (2015), pp. 137– 144. doi: 10.3141/2489- 16. eprint: https://doi.org/10.3141/2489- 16. url:https://doi.org/10.3141/2489-16.

[7] I. Passchier, G. v. Vugt, and M. Tideman. (2015) "An Integral Approach to Autonomous and Cooperative, Vehicles Development and Testing". 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Sept. 2015, pp. 348–352. doi: 10.1109/ITSC.2015. 66

[8] T. Péter and J. Bokor (2010): Péter T. and Bokor J. Research for the modelling and control of traffic, FISITA World Automotive Congress, Budapest, 30 May - 4 June 2010. Book of abstracts, pp. 66-73. In: Scientific Society for Mechanical Engineering, (ISBN:978-963-9058-28-6).

[9] T. Péter and J. 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

[10] T. Péter (2012.) 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

[11] T. Péter and K. Szabó (2012) A new network model for the analysis of air traffic networks. In: Peridoica Polytechnica-Transportation Engineering 40/1 (2012) 39–44. doi: 10.3311/pp.tr.2012-1.07 web: http://www.pp.bme.hu/ tr ISSN 1587-3811 (online version); ISSN 0303-7800 (paper version)

[12] T. Peter, J. Bokor and A. Strobl (2013): Model for the analysis of traffic networks and traffic modelling of Győr, pp 167-172. Doi: 0023, IFAC Workshop on Advances in Control and Automation Theory for Transportation Applications (ACATTA 2013) which is to be held in Istanbul, Turkey, 16-17 September 2013. http://www.acatta13.itu.edu.tr/

[13] T. Péter and S. Fazekas (2014): Determination of vehicle density of inputs and outputs and model validation for the analysis of network traffic processes, Periodica Polytechnica, Transportation Engineering Vol. 42.. No 1. 2014. pp. 53-61.

[14] T. STEVENS. (2017). Crashing Castle: An autonomous ride in Waymo's playground. 2017. url: https://www.cnet.com/roadshow/news/google-waymo-castle-visit/.

[15] Z. Szalay. (2016) "Structure and Architecture Problems of Autonomous Road Vehicle Testing and Validation". Structure and Architecture Problems of Autonomous Road Vehicle Testing and Validation. An optional note. 15TH Mini Conference on Vehicle System Dynamics. The publisher, Nov. 2016.

[16] TORC. (2018) Asimov self-driving car system capabilities. 2018. url: https://torc.ai/wp-content/uploads/Torc_capabilities

[17] Zala Zone url: https://zalazone.hu/en/

[18] Kovács,T., Bolla, K., Gil, R.,A., Csizmás, E., Fábián, Cs., Kovács, L., Medgyes, K., Osztényi, J., Végh A. (2016) Parameters of the intelligent driver model in signalized intersections *Technical gazette*, Vol.23 No.5 October 2016. pp. 1469-1474, ISSN 1330-3651 (Print), ISSN 1848-6339 (Online) DOI: 10.17559/TV-20140702174255

[19] Pokorádi, L. (2018) Graph model-based analysis of technical systems *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 393* (2018) 012007pp. 1-9. doi:10.1088/1757-899X/393/1/012007

[20] Pokorádi, L., (2018) Methodology of Advanced Graph Model-based Vehicle Systems' Analysis In: Szakál, Anikó (szerk.) IEEE 18th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI 2018) Budapest, IEEE Hungary Section, (2018) pp. 325-328. , 4 p.

[21] Pokorádi, L., ; Gáti, J., (2018) Markovian Model-based Sensitivity Analysis of Maintenance System In: Anikó, Szakál (szerk.) IEEE 16th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics : SISY 2018 Budapest, IEEE Hungary Section, (2018) pp. 117-121. , 5 p.

[22] Takács, Á., Drexler, D., A., Galambos, P., Rudas, I., J., Haidegger, T. (2018) Assessment and Standardization of Autonomous Vehicles *2018 IEEE 22nd International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)* 21-23 June., Las Palmas de Gran Canaria, Spain, pp. 185-192., ISSN: 1543-9259. DOI: 10.1109/INES.2018.8523899

[23] Robert Pethes and Levente Kovács, Voting to the Link: a Static Network Formation Model, Acta Polytechnica Hungarica Vol. 17, No. 3, 2020, pp.207 -228.

[24] Tamás D. Nagy; Nikita Ukhrenkov; Daniel A. Drexler; Árpád Takács; Tamás Haidegger, Enabling quantitative analysis of situation awareness: system architecture for autonomous vehicle handover studies Publisher:IEEE; SMC 2019: 904-908; [IEEE 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC) - Bari, Italy (2019.10.6-2019.10.9)]

5. IDM (Intelligens Vezetői Modell) modell-bázisú vizsgálata önvezető járműveknél az összetartozó sebesség és kormányzási szögjelek alapján

A kutatás célja olyan laboratóriumi modell alapú diagnosztikai eljárás kidolgozása, amely az önvezető elektromos járművek valamely város, közlekedési hálózat, vagy pályán történő valós mozgásfolyamatok tesztelését hajtja végre. A teszt, a valós forgalmi körülményeknek megfelelő összetartozó, sebesség és kormányzási szög jelek generálása, és amelyeket fel is használ a teszt-vizsgálatoknál

Az eljárás figyelembe veszi a trajektória követés valós folyamatát is. A kijelölt trajektórián történő mozgást oly módon hajtja végre, hogy a robotpilóta, vagy vezető, behatárolt mértékű tetszőleges hibát is elkövethet a trajektória követésnél, a haladáskor. Az egyes jármű sebességének előállításánál egyaránt figyelembe kell venni az adott forgalmi viszonyokat, az-az a hálózati szakasz környezetében közlekedő járművek összetételét és mozgását, továbbá azt, a napszakra, szezonalitásokra is jellemző összetett közlekedési környezetet, amelyet a nagyméretű hálózati folyamatok határoznak meg. Ennek a vizsgálatnak a tárgyát képező modellbázisú eljárás tehát, egy olyan elméleti megalapozás, amely egyaránt figyelembe veszi a trajektória menti mozgást és a mikroszkopikus járműkörnyezet és a makroszkopikus forgalmi környezet kapcsolatrendszerét is.

2. AZ IDM MODELL FORGALMI ALKALMAZÁSA

Az Adaptive Cruise Control (ACC) olyan gépjárműforgalmi rendszer, amely lehetővé teszi a jármű számára, hogy a sebességet a környezethez igazítsa. Az Intelligens Driver Model (IDM) egy adaptív tempomat (ACC) modell, amelyet széles körben használnak a közlekedési kutatásokban a longitudinális mozgások modellezéshez. Treiber, Hennecke és a Helbing 2000-ben, a Drezdai Műszaki Egyetem közlekedési laboratóriuma dolgozta ki az Intelligens Vezető Modellt (IDM), amelyet a BMW autógyár használ.

Az IDM modellt folyamatos forgalomáramlás modellezésében alkalmazzák az autópálya és a városi forgalom szimulációjánál. Autókövető modellként az IDM az egyes járművek helyzetének és sebességének dinamikáját írja le. A Multi-modell nyílt forráskódú közúti közlekedési szimulátor esetében Treiber és Helbing (2002) az IDM-et használja a hosszirányú jármű mozgásának szimulálására és ez a szimulátor sávváltási stratégiát is bemutat. Modell-alapuló egysávos közlekedési inhomogenitását tanulmányoz Treiber et al. (2004).

A járműközlekedés stabilitását és az IDM paraméter érzékenységét vizsgálja Treiber és mtsai. (2006). Kesting et al. (2008) és javaslatot tesz az IDM modell vezetői paramétereinek kiterjesztésére. Vizsgálják az IDM-el felszerelt járművek hatását a forgalmi áramlásra és az utazási időkre, mint szűk keresztmetszete. Jerath (2010) szintén az IDM modellt használja és az Adaptive Cruise Control forgalmi folyamatokra gyakorolt hatását tanulmányozza. Fenti munkák eredményei azt mutatják, hogy az ACC járművek arányának növelése a forgalom hatékonyságágának növekedését idézi elő az utazási idők csökkentésével. Treiber és Kesting (2011) az IDM segítségével tanulmányozta az instabilitást a torlódott forgalomban.

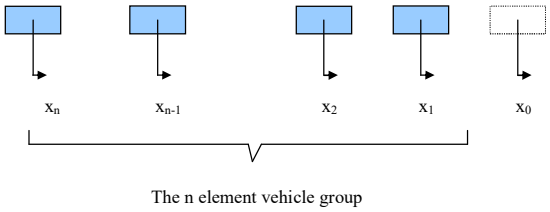
Az IDM modellnek számos előnye van a többi ACC modellekkel szemben a kalibrálás és az intuitív paraméterek szempontjából, továbbá a modellezés végrehajtása is egyszerű szimulációt igényel. Ennek ellenére, hátrányai is vannak a jármű és a vezető megfelelő tulajdonságainak biztonsága tekintetében. Az IDM ütközésmentes modell, ezért kritikus baleseti helyzetben a kívánt minimális távolság már nem elegendő a vezető biztonságának garantálására és vészfékezés esetén hajlamos a tényleges jármű lassulásának túllépésére.

Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2012), Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2013) munkáikban javaslatot dolgoztak ki az IDM modell pontosabb

működésére és az IDM módosításaival foglalkoznak a gépjárművezető biztonsága és a jármű valós képességének figyelembe vételével. A módosítás alapján, a vezetőnek már figyelembe kell vennie az őt kövező járművek viselkedését is és ez által, egy új módosított IDM modellt fejlesztettek ki és tesztelt le mikroszkópikus szimulátorral a húrstabilizálás figyelembe vételével. Ez a módosított IDM modell már a valódi gépjármű-képességeket helyezte előtérbe.

Jelen munkánkban támaszkodunk a francia kutatókkal végezet közös modellre a hátrányok leküzdésére. Ez alapján, az IDM modell már nagyobb teljesítményt nyújt a vezető biztonsága érdekében, a valós reakciókat követve az ütközés közeli kritikus helyzetekben. Az intelligens járművezető modell módosítását és korszerű működését mutatja be, a jármű valós képességével kapcsolatban. A modellezés és kutatási munka komplex területet ölel fel, és egyaránt tartalmazza a mikroszkopikus és makroszkopikus modellezés megközelítéseit is, Derbel, O., Péter, T., Mourllion B., & Basset M. (2017). A bonyolult makroszkopikus forgalmi környezetet a nagyméretű hálózati modell generálja, amelyen a meghatározott trajektóriák szakaszain a mikroszkopikus forgalmi modell szimuláció biztosítja az egyedi járműmozgást a forgalomban. Ennek a mikroszkopikus modellnek azonban ugyancsak megfelelően kell reprodukálnia a dinamikus közlekedési folyamatokat és szintén validáltnak kell lennie. Ennek megfelelően, Munkánk ebben a szakaszában támaszkodunk a Treiber et al. 2000a. 2000b. Derbel, O., Péter, T., Mourllion B., & Basset M. (2017) Intelligens Driver Model kutatásokra és fejlesztésekre.

A klasszikus IDM modell jellemzői: Egyetlen differenciálegyenlet-rendszer, amely egy sávon haladó n db. járművek esetét vizsgálja. A mikroszkopikus modell, egy láncmodell szerű hosszirányú dinamikát ír le. Minden vezető csak előre figyel és igyekszik egy megfelelő követési távolságoz betartani. Nincs előzés, a járművek megtartják sorrendjüket, meghatározó szerepe van az első járműnek, ill. a csoportban haladó lassú járműveknek is.



1. ábra: az n elemű járműcsoport és a mozgásukat determináló környezet

A klasszikus IDM modellt tagonként, külön-külön álló differenciálegyenletekkel írják fel. Vizsgálatainkban ezt összefoglaltuk az alábbi (1) differenciálegyenlet-rendszerbe, ahol az *i*-ik jármű pillanatnyi pozícióját írja le az x_i(t) függvény. A modellben alkalmazott paraméterek és függvények az alábbiak:

a_i az i-ik jármű legnagyobb gyorsulása
v_i az i-ik jármű kívánt sebessége
s_i az i-ik jármű és az őt megelőző közötti előírt távolságkülönbség (i=1,2 ,... ,*n*)

$$\left\langle \underline{\underline{A}} \right\rangle^{-1} \ddot{x}(t) + \left\langle \underline{\underline{V}} \right\rangle^{-1} \underline{f_1}(\dot{x}(t)) + \left\langle \underline{\underline{S}} \right\rangle \underline{f_2}(x(t)) = \underline{1} \qquad (1)$$

$$\left\langle \underline{\underline{A}} \right\rangle^{-1} = \left\langle \frac{1}{a_1}, \frac{1}{a_2}, ..., \frac{1}{a_n} \right\rangle ; \left\langle \underline{\underline{V}} \right\rangle^{-1} = \left\langle \frac{1}{v_1^4}, \frac{1}{v_2^4}, ..., \frac{1}{v_n^4} \right\rangle ; \left\langle \underline{\underline{S}} \right\rangle = \left\langle s_1, s_2, ..., s_n \right\rangle$$

$$s_i = s_{0i} = const., \text{ vagy: } s_i = s_i(\dot{x}_{i-1}, \dot{x}_i) \text{ (i=1,2,…,}n\text{).}$$

$$\underline{f_1}(\dot{x}(t)) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1^4 \\ \dot{x}_2^4 \\ \dots \\ \dot{x}_n^4 \end{bmatrix}, \ \underline{f_2}(x(t)) = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{(x_0 - x_1)^2} \\ \dfrac{1}{(x_1 - x_2)^2} \\ \dots \\ \dfrac{1}{(x_{n-1} - x_n)^2} \end{bmatrix}, \ \underline{1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix}$$

A módosított IDM modellt, amelyet ebben a munkában alkalmazunk a (2) egyenlet szemléltet. Ennek részletes leírását a Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2012), (2013) munkák tartalmazzák. Ez a modell már azt is figyelembe veszi, hogy a járművezetők figyelemmel kísérik az őket követő járművek mozgását is, 2.ábra.

$$\left\langle \underline{\underline{A}} \right\rangle^{-1} \ddot{x}(t) + \underline{\underline{V}}\,\underline{f_1}(\dot{x}(t)) + \underline{\underline{S}}\,\underline{f_2}(x(t)) = \underline{1}(t) + \underline{h}(t) \qquad (2)$$

$$\left\langle \underline{\underline{A}} \right\rangle^{-1} = \left\langle \frac{1}{a_1}, \frac{1}{a_2}, \dots, \frac{1}{a_n} \right\rangle;$$

$$\underline{\underline{V}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{v_1^4} & \frac{h_1}{v_2^4} & & & \\ & \frac{1}{v_2^4} & \frac{h_2}{v_3^4} & & \\ & & \frac{1}{v_i^4} & \frac{h_i}{v_{i+1}^4} & \\ - & - & - & - & - \\ & & & & \frac{1}{v_n^4} \end{bmatrix};$$

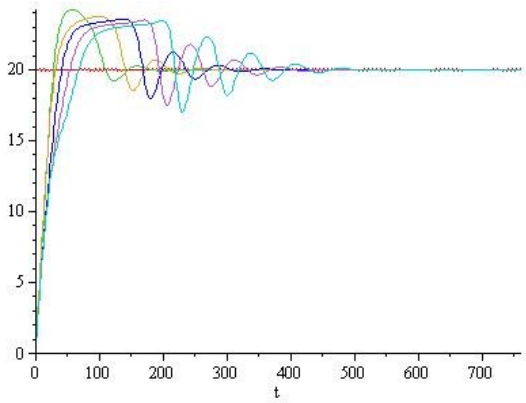
$$\underline{\underline{S}} = \begin{bmatrix} s_1^2 & h_1 s_2^2 & & & \\ & s_2^2 & h_2 s_3^2 & & \\ & & s_i^2 & h_i s_{i+1}^2 & \\ - & - & - & - & - \\ & & & & s_n^2 \end{bmatrix}$$

$$h(t) = \begin{bmatrix} h_1(t) \\ h_2(t) \\ \dots \\ h_n(t) \end{bmatrix}; \ h_i(t) = hf_i(t) \cdot \frac{a_{i+1}}{a_i}; \ \text{(i=1,2, … ,n-1)}; \ h_n(t) = 0.$$

$s_i = s_{0i} = const.$, vagy: $s_i = s_i(\dot{x}_{i-1}, \dot{x}_i)$ (i=1,2,…,n).

$$\underline{f_1}(\dot{x}(t)) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1^4 \\ \dot{x}_2^4 \\ \dots \\ \dot{x}_n^4 \end{bmatrix}, \quad \underline{f_2}(x(t)) = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{\varepsilon_1^2 + (x_0 - x_1)^2} \\ \dfrac{1}{\varepsilon_2^2 + (x_1 - x_2)^2} \\ \dots \\ \dfrac{1}{\varepsilon_n^2 + (x_{n-1} - x_n)^2} \end{bmatrix},$$

$$\underline{1}(t) = \begin{bmatrix} 1(t) \\ 1(t) \\ \dots \\ 1(t) \end{bmatrix}$$



2. ábra: egy járműcsoport elindulást követő relatív távolságok beállása stabilizált sebességi állapotnál

3. AZ IDM MODELL ÉS A NAGYMÉRETŰ HÁLÓZAT KAPCSOLATA

Egy adott jármű sebességét és a követési távolságot a vezető határozza meg. A döntése azonban egyaránt függ a saját észleléseitől és a járműve által, a fizikai környezetről küldött jelzésektől, továbbá a hálózati forgalom helyi és általános hatásaitól.
Az útminőségi, meteorológiai, látási viszonyokból eredő fizikai hatások az adott járműsűrűségnél meghatároznak egy választható sebességtartományt. Adott szakaszon előre haladó, jármű-jármű hatásokból eredő dinamikus kapcsolatok forgalomi leírására alkalmazható az előző pontban tárgyalt módosított IDM modell.
Ugyanakkor, az IDM modellcsoport mozgásának dinamikája sem öntörvényű, ezt a nagyméretű hálózaton, hálózati szektorokon kialakuló vezérlő sebességek determinálják. Lelassulnak, ha torlódás lép fel, megállnak, ha a forgalomirányító lámpa pirosra vált, de a reakciókésedelmi időket követően felgyorsulnak a megengedett legnagyobb sebességhatárig, ha az útszakasz szabad. **Ezt jelöli az *1. ábrán* az x_0(t) vezérlő sebesség függvény, amelyet az egyes trajektóriáknál a nagyméretű makroszkopikus hálózati folyamatok határoznak meg.**

4. A HÁLÓZATI FORGALMI MODELL ALKALMAZÁSA

Ezekhez a kutatásainkhoz a szűkített hálózati forgalmi modellt alkalmazzuk, Péter T, and Bokor J (2011, 2010.1, 2010.2,), Péter T (2012), 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.

$$\dot{x} = \langle L \rangle^{-1} [K_{11}(x,s)x + K_{12}(x,s)s] \tag{3}$$

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

A gyakorlatban fellépő késleltetések, 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.
Hasonlóan, folytonosan differenciálhatóvá tehető az $u_{i,j}(t)$ lámpajel is az értelmezési tartományában, ha minden t_0 szakadási pont ε_t sugarú környezetében a fenti módszert alkalmazzuk, ahol 1-ről 0-ra, illetve 0-ról 1-re történő értékváltozás lép fel. Ezáltal, folytonos dinamikus közlekedési modellt alkalmazunk és a gyakorlatban előforduló lassító, ill. reakciókésedelem-idő jelenséget is figyelembe vesszük a modellnél. *S* esetében, lassító jelenség lép fel, mivel óvatossá válnak a vezetők, amikor azt észlelik, hogy már nagyon tele van az a szakasz, amelyre éppen át akarnak hajtani. *E* függvénynél ugyan nincs késleltetés, de mivel egy szakasz kiürülése (amely egy időtartományon az utolsó jármű kilépése során valósul meg) időben folytonos járműsűrűség függvényt határoz meg ezen a szakaszon, ezért nincs ellentmondás az *E*-re is alkalmazott fenti modell-paradigma esetében. Forgalomirányító lámpák esetében a reakció késedelem jelenség két módon lép fel. Egyrészt, a járművek nem indulnak el azonnal, amikor zöldre vált a lámpa, másrészt a valóságban a kereszteződésben előfordul, hogy a sárgára (ill., a pirosra) váltáskor szabálytalan „járműátfutás" történik. Ezeket a gyakorlatban valóban fellépő jelenségeket az átbocsátásnál a folytonosan differenciálható lámpajel alkalmazásával lehet figyelembe venni.

4.1 A modell validálása

Budapesten, a Petőfi híd pesti hídfőtől a körúton északi irányban a Nyugati térig terjedő szakaszon történt, a lámpás kereszteződéseknél az FKF ZRt. Forgalomtechnikai Igazgatóság által az BME rendelkezésre bocsátott aktuális lámpa-beállítási adatok mellett és a helyszínen elvégzett forgalomszámlálási adatok alapján. A vizsgált útvonal az egyes szimulációs időpontokban bejárásra került GPS készülékkel felszeret gépjárművekkel is. A járműves mérés során rögzítésre kerültek a valós sebességprofilokat.
Ez a körúti modell, egy tipikus vonali modell, amelynél a jellegzetes sebességfolyamatot a forgalomirányító lámpaprogramok határozzák meg. A validálásoknál a PannonTraffic programot alkalmaztuk. A szimuláció a valós lámpaprogramokat vette figyelembe, ezért a mért sebességfolyamatok időbeni kialakulását jól követte a szimuláció. A validálásnál a sebességhatárok legjobb megközelítését a valóságnak legjobban megfelelő járműsűrűségek beállításával végezte el a program a körút egyes szektorainál. Az alkalmazott sebesség-sűrűség törvény minden esetben a Greenshields (lineáris) függvény volt. A szimuláció és a járműves mérés során kinyert sebességprofilok összehasonlítása természetesen megmutatta, hogy a sebesség-idő függvényeket egy sztochasztikus folyamat egy-egy realizációjának kell tekinteni és ezeket ennek megfelelően, valószínűségelméleti, ill. statisztikai analízis útján kell vizsgálni. A vizsgálat a fentiekben leírt módon tehát városban történt, nagy forgalom és több forgalomirányító lámpás kereszteződést érintő szakaszon történő áthaladás mellett. A nagyszámú, sebességprofilokra és motorteljesítményekre vonatkozó nemparaméteres statisztikai próba

homogenitás vizsgálatra irányult. Az volt a vizsgálat tárgya, hogy a kétféle független valószínűségi változókból álló minta-halmaz (a GPS készülékkel mért és a forgalmi modell által szimulált értékek) azonos eloszlású sokaságból származnak-e, tehát a gyakorlatban tekinthető-e a két minta azonos eloszlásúnak. A vizsgálatoknál 95%-os szintet választva megállapítást nyert, hogy mindkét esetben a két-két minta 95% -os szinten homogénnek tekinthető. A vizsgálataink eredményei tehát megnyugtatóan igazolták, hogy a modell lehetővé tesz olyan egyedi sebességfolyamatok és származtatott motorteljesítmény folyamatok kinyerését, amelyek a valóságnak megfelelnek Peter, Fülep and Bede (2011).

Győr esetében. A validált modell a városmagban, az egyik legnagyobb forgalmat lebonyolító Szent István utat (1. sz. főút) és környékét foglalta magában. A modell validálásánál támaszkodtunk a város által 2012. évben elvégzett keresztmetszeti forgalommérésekre. A hálózatot jellemző fő adatok: 228 db. útszakasz, 9 jelzőlámpával irányított csomópont és 38 egyéb csomópont. A hálózati tartományhoz 18 input szakasz és 15 output szakasz tartozott. A forgalmat irányító jelzőlámpák fázisterveit a Magyar Közút Zrt. Győri Igazgatósága és Győr város Önkormányzata bocsátotta a rendelkezésünkre. A modell esetében 63 keresztmetszeti mérési adat állt a rendelkezésünkre a validálásnál. A szimuláció 24h-s valós időtartamra vonatkozott, melynek számítógépes futtatási ideje 2 perc 14 másodperc volt. A program bármely időpontból újra indítható az adott időpontban érvényes állapotjellemzők, mint kezdeti értékek figyelembe vételével. A validálás során, negyed óránkét felülvizsgálta az aktuális disztribúciókat és az átadásokat befolyásoló tényezőket a mért keresztmetszeti forgalmi adatok legjobb megközelítéséhez. Az ily módon történő előrehaladás során a korrelációanalízist óránként hajtotta végre a 63 mérési pont figyelembe vételével. A vizsgált 63 keresztmetszetnél a mért és modell alapján számított óránkénti keresztmetszeti forgalmi adatok között, a korrelációs együttható értéke nagyon jól közelítette az 1 értéket, pl. a reggeli 7h-8h közötti csúcsforgalomnál $r_{xy}=0.993$ volt, amely a gyakorlatban már 100%-os korrelációnak tekinthető, Peter, T. Fazekas S. *(2014)*.

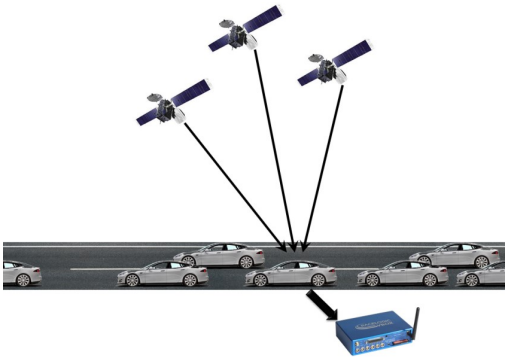
4.2. A sebességfolyamatok analízise

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

$$v_i = f_i(x_i(t)) \tag{4}$$

A makroszlópikus hálózati modellből az egyedi sebességfolyamatok kinyerésével és egy vezető-jármű modell felhasználásával, vizsgálni lehet az egyes járművek motor teljesítményigényét, energia felhasználását és a nem elektromos járművek károsanyag kibocsátását is. A sebességfolyamatok alkalmasak modell-validálásra is. E-mellett ez a makroszkópikus modell alkalmas a kijelölt trajektóriák mentén az $x_0(t)$ vezérlő jel kiintegrálására és a módosított IDM modell által generált sebességfolyamatok előállítására is.

4.3. A mérésnél alkalmazott módszerek és eszközök Győrött

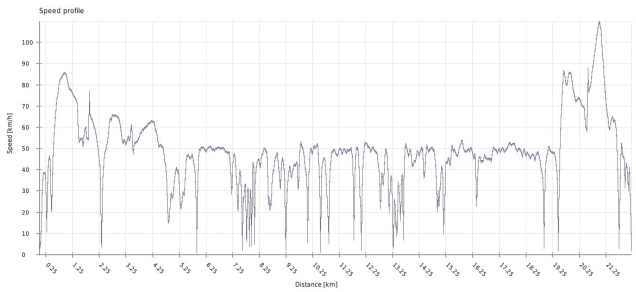


3 ábra GPS vevő készülékkel felszerelt jármű mérőrendszer

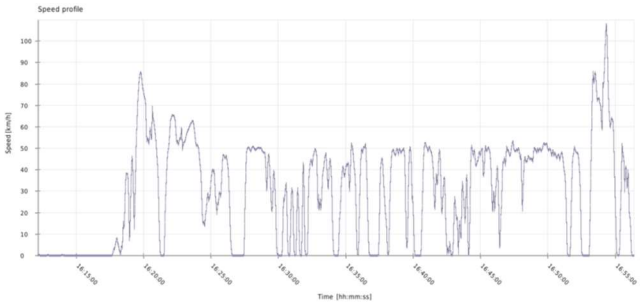
A GPS vevővel ellátott készülékek előnye az is, hogy a további feladatokkal összhangban, az adatbázis rendszerhez történő kapcsolódást és az adatok automatikus feldolgozását nagyban segíti *3 ábra*. Ez által,

nem csupán a sebesség értékek, hanem a GPS hely és időkoordináták is rögzítésre kerülnek a mérés során. A GPS-es mérések adatfájljai tárolásra kerültek a GPS koordináták alapján a megfelelő útszakaszokhoz hozzárendelte a területen végzett sebességmérés eredményeit, így a mérés során érintett valamennyi útszakaszra egyedi sebességfüggvényt kaptunk.

4. ábra GPS-es méréssel bejárt útvonalak Győr városában



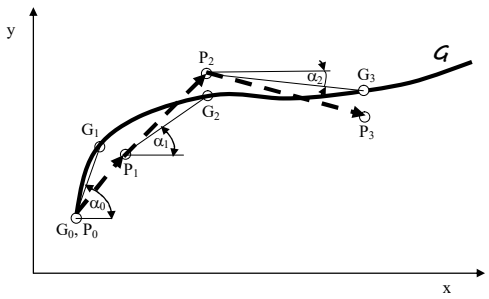
5. ábra a 004-es számú útvonalon mért sebesség értékek a távolság függvényében



6. ábra: a 004-es számú útvonalon mért sebesség értékek az idő függvényében

5. A TRAJEKTÓRIA KÖVETÉSE

A vezető, vagy robotpilóta által követett algoritmust egy rögzített Descartes koordináta rendszerben az alábbiak szerint modellezzük: Egy ***G*** trajektóriát követ a járművezető/robotpilóta. A t_0 indulási időpontban rajta van a ***G*** trajektórián, ezért ekkor a kiinduláskor: $\mathbf{P}_0 = \mathbf{G}_0$. A továbbiakban $t_0, t_1, t_2, \ldots, t_n$ időpontokban születnek trajektória követési döntések. A t_i időpontokban a saját $\mathbf{P}_i$ pozíciójából az $\boldsymbol{\alpha}_i$ szög érték szerint megválasztott iránnyal és $\boldsymbol{V}_i$ sebességgel, kívánja elérni a trajektórián „kinézett" / "kijelölt" $\mathbf{G}_{i+1}$ pontot. Azonban a t_{i+1} időpontban a $\mathbf{P}_{i+1}$ pontot érni el, mivel a választásainál $\boldsymbol{\varepsilon}_\alpha$ hibát követett el a szög megválasztásánál és $\boldsymbol{\varepsilon}_s$ hibát követett el a sebesség megválasztásánál. Ez így folytatódik tovább a geometriai stabilitást maga a ***G*** trajektória biztosítja.



7. ábra. robotpilóta által követett algoritmust

A stabilitás, amelyet a trajektória lekövetési módszer biztosít, ill. a határátmenetet alkalmazó differenciálegyenlet-rendszer. A mozgásfolyamat az alábbi hozzárendelésekkel írható fel, egyszerű ekvidisztáns időközök figyelembe vételével:

$$P_i = [x_i, y_i] \rightarrow G_{i+1} = [X(t_{i+1}), Y(t_{i+1})]\,;\; t_{i+1} = (i+1)\Delta t\,;\; tg(\alpha_i) = m_i\,;\; s_i = \overline{P_i G}_{i+1}\,;\; (\text{i= 0, 1, 2,...})$$

Figyelembe véve az irányvektort és a szakaszhosszakat és sebességet:

$$\underline{r}_i = [1, m_i]\,, \rightarrow\; \underline{r}^0{}_i = [\frac{1}{\sqrt{1+m^2{}_i}}, \frac{m_i}{\sqrt{1+m^2{}_i}}]$$

$$\left(\mathrm{m_i} = \frac{Y((i+1)\Delta t) - y_i}{X((i+1)\Delta t) - x_i} \right)$$

$$s_i = \sqrt{(X((i+1)\Delta t - x_i)^2 + (Y((i+1)\Delta t - y_i)^2}$$

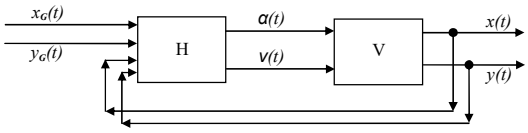
$$\left(\mathrm{v_i} = \frac{s_i}{\Delta t} \right)$$

A fenti összefüggésekkel a trajektótia követés diszkrét pontjai az alábbi rekuzív formulával, egyszerűen leírhatók:

$$x_{i+1} = x_i + \frac{s_i}{\sqrt{1+m_i^2}}$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{s_i \cdot m_i}{\sqrt{1 + m_i^2}}$$

A hibamentes trajektoriakövetés hatásmechanizmusát az alábbi ábra szemlélteti:



8. ábra

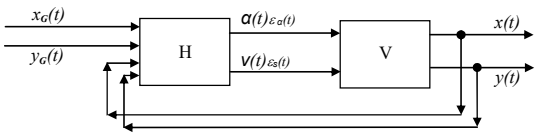
Abban az esetben pedig, ha hibával terhelt a trajektória követés, az alábbi algoritmus írja le és ábra szemlélteti a hatásmechanizmusát:

$$s_i \xrightarrow{real} s_i + Error_s = s_i \cdot \varepsilon_s$$
$$\left(v_i \xrightarrow{real} v_i + Error_v = v_i \cdot \varepsilon_s\right)$$

$$m_i \xrightarrow{real} m_i + Error_\alpha = m_i \cdot \varepsilon_\alpha$$

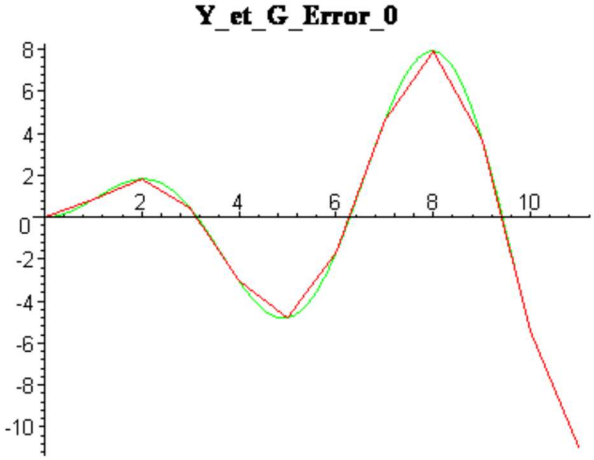
$$0.7 \le \varepsilon_s \le 1.3 \qquad 0.7 \le \varepsilon_\alpha \le 1.3$$
$$\alpha \cong tg\alpha \qquad \varepsilon_\alpha \cong m_\alpha$$

$$x_{i+1} := x_i + \frac{s_i\, \varepsilon_s}{\sqrt{1 + m_i^2\, \varepsilon_\alpha^2}}$$
$$y_{i+1} := y_i + \frac{m_i\, \varepsilon_\alpha\, s_i\, \varepsilon_s}{\sqrt{1 + m_i^2\, \varepsilon_\alpha^2}}$$



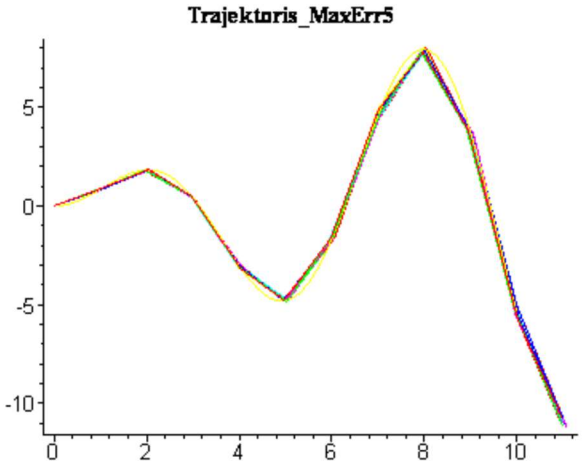
9. ábra

A trajektóriát követő módszer geometriai stabilitást már az előzetes szimulációs vizsgálatoknál is jól alátámasztják, ezt szemléltetik 10.1 ábra abban az esetben, ha pontos a szög és távolság becslés, de a stabilitás akkor is biztosított, ha különböző mértékű, 5% - 30 % véletlent hibák terhelik az irány és távolság becslést, lásd 10.2 -10.4 ábrák.



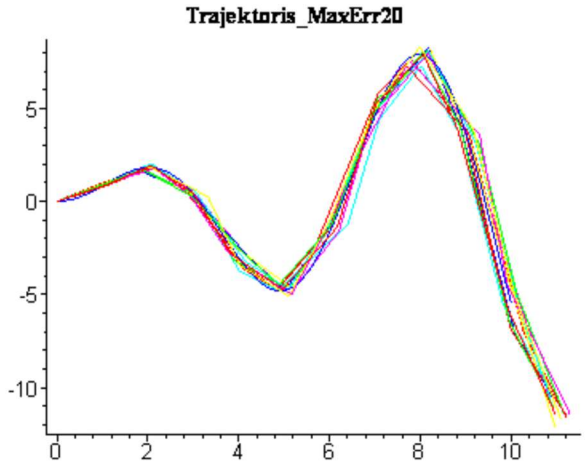
10.1 ábra

12 sec időben egy útkanyart a hibátlan algoritmus diszkrét időpontokba pontosan lekövet



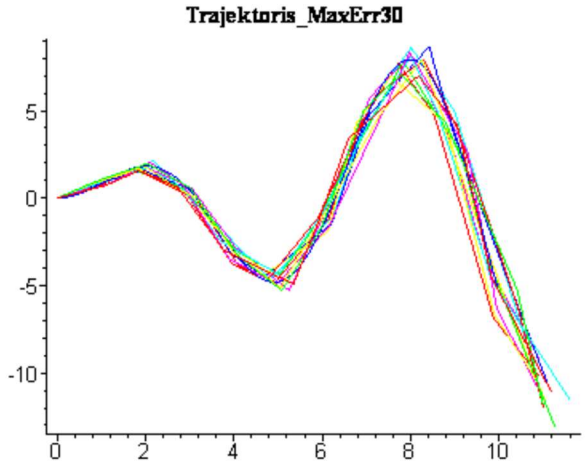
10.2 ábra

12 sec időben egy útkanyart a 5%-os hibával az algoritmus diszkrét időpontokban jól lekövet



10.3 ábra

12 sec időben egy útkanyart az extrém 20-30%-os hiba mellet az algoritmus stabilan működik



10.4 ábra

Tovább vizsgálva a diszkrét pontokban történő trajektória követést, áttérünk a folytonos idejű követésre. Ekkor egy nem feltétlen a trajektória ponthoz tartozó kezdeti értékből kiindulva, folytonos $\varepsilon_\alpha = \varepsilon_\alpha(t)$ és $\varepsilon_s = \varepsilon_s(t)$ hibafüggvényeket veszünk figyelembe a trajektória követést leíró differenciálegyenlet-rendszer felírásánál.

$$x_{i+1} := x_i + \frac{s_i\,\varepsilon_s}{\sqrt{1 + m_i^2\,\varepsilon_\alpha^2}}$$

$$y_{i+1} := y_i + \frac{m_i\,\varepsilon_\alpha\,s_i\,\varepsilon_s}{\sqrt{1 + m_i^2\,\varepsilon_\alpha^2}}$$

$$\Delta t \to 0$$

$$\Delta x = x_{i+1} - x_i\,;\ \Delta y = y_{i+1} - y_i\,;\ s_i = \Delta s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}\ ;\ m_i = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$\Delta x = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \cdot \varepsilon_s}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)^2 \varepsilon_\alpha^2}}; \quad \Delta y = \frac{\frac{\Delta y}{\Delta x}\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \cdot \varepsilon_\alpha \cdot \varepsilon_s}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)^2 \varepsilon_\alpha^2}}$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\sqrt{\left(\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)^2} \cdot \varepsilon_s}{\sqrt{1 + \left(\frac{\left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)}{\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)}\right)^2 \varepsilon_\alpha^2}}; \quad \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{\left(\frac{\left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)}{\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)}\right)\sqrt{\left(\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)^2} \cdot \varepsilon_\alpha \varepsilon_s}{\sqrt{1 + \left(\frac{\left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)}{\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)}\right)^2 \varepsilon_\alpha^2}}$$

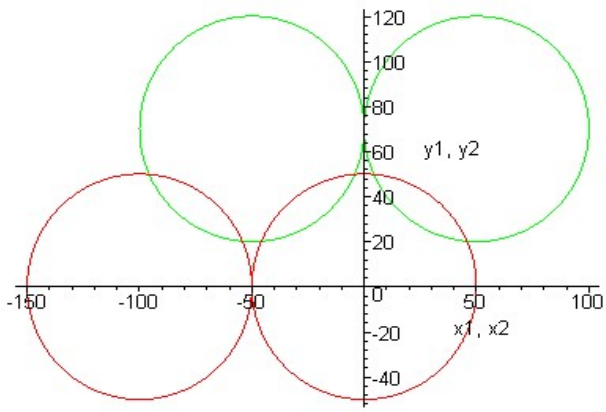
$$\text{If } \lim \Delta t \xrightarrow{0} \exists \dot{x}(t), \dot{y}(t)$$

$$\dot{x}(t) = \frac{\dot{x}_G \sqrt{\dot{x}_G{}^2 + \dot{y}_G{}^2} \cdot \varepsilon_s}{\sqrt{\dot{x}_G{}^2 + \dot{y}_G{}^2 \varepsilon_\alpha^2}}; \quad \dot{y}(t) = \frac{\dot{y}_G \sqrt{\dot{x}_G{}^2 + \dot{y}_G{}^2} \cdot \varepsilon_\alpha \varepsilon_s}{\sqrt{\dot{x}_G{}^2 + \dot{y}_G{}^2 \varepsilon_\alpha^2}}$$

$$\frac{\dot{y}(t)}{\dot{x}(t)} = \frac{\dot{y}_G}{\dot{x}_G}\varepsilon_\alpha; \quad \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = \sqrt{\dot{x}_G{}^2 + \dot{y}_G{}^2}\,\varepsilon_s$$

$$\boxed{\frac{\dot{y}(t)}{\dot{x}(t)} = \frac{\dot{y}_G}{\dot{x}_G}\varepsilon_\alpha}; \quad \boxed{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = \sqrt{\dot{x}_G{}^2 + \dot{y}_G{}^2}\,\varepsilon_s}$$

Ha egy tetszőleges kezdeti érték esetén és zérus hiba mellett ($\varepsilon_s := 1 \quad \varepsilon_\alpha := 1$) alkalmazzuk a levezetett eredményt, akkor a trajektória görbén egy távolságtartó, szögtartó és irányít tartó leképezést kapunk, az-az egy egybevágósági transzformációt hajt végre a trajektória leképezés, így pl. a 11. ábrán, egy egymáshoz kapcsolódó két 100-100 m átmérőjű körpálya leképezése látható egy tetszőleges kezdeti érték esetén:



11. ábra

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A folytonos trajektória követés esetére levezetett differenciálegyenlet-rendszere alapján megállapítható, hogy a trajektória követésre alkalmazott fizikai megfontolások jól hasznosíthatók a laboratóriumi tesztek alkalmával, valamilyen, előre meghatározott mértékű hibaelkövetést is magában hordozó vezetési technika, vagy stratégiához tartozó szimulációs kormányzási szögek időbeni előállításához. Itt biztosítani kell a kiválasztott trajektória pontokon egy alkalmas GPS alapú pontsorozatot a geometria felvételéhez. Ezen fut a követendő pont, amelynek sebessége egyaránt figyelembe veszi a bonyolult, valós forgalom okozta makroszkopikus környezetet és a járművek együttes dinamikájának megfelelően, a mikroszkopikus környezetet is a szimuláció során.
Ez a folyamat szolgáltatja az adott viszonyok közepette, a kormányzási szöget, amely a szimulációs szögből a jármű és kormánygeometria alapján számítható. A trajektórián történő mozgás sebességét a szimulátor közvetlenül szolgáltatja a hektikus forgalmi viszonyoknak megfelelő módon. Mérésekre és validálásokra természetesen szükség lesz a városi forgalomban és a zalaegerszegi tesztpályán egyaránt.

IRODALOM

Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2012). Modified intelligent driver model, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 40(2): 53–60. https://doi.org/10.3311/pp.tr.2012-2.02

Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2013). Modified intelligent driver model for driver safety and traffic stability improvement, *IFAC Proceedings Volumes* 46(21): 744–749. https://doi.org/10.3182/20130904-4-JP-2042.00132

Derbel, O., Péter, T., Mourllion B., & Basset M. (2017), Generalized Velocity–Density Model based on microscopic traffic simulation, Transport, DOI: 10.3846/16484142.2017.1292950 To link to this article: http://dx.doi.org/10.3846/16484142.2017.1292950 ISSN: 1648-4142 (Print) 1648-3480 (Online) Journal homepage: http://www.tandfonline.com/loi/tran20

Jerath, K., (2010). Impact of adaptive cruise control on the formation of self-organized traffic jams on highway. Master's thesis, The Pennsylvania State University The Graduate School. Department of Mechanical and Nuclear Engineering.

Kesting, A., Treiber, M., Helbing, D., (2008). Agents for traffic simulation. Physics and Society 11, 325–356.

Péter T, and Bokor J (2010.1) Research for the modelling and control of traffic, In: Scientific Society for Mechanical Engineering ,33rd Fisita-World Automotive Congress: Proceedings, Budapest, Magyarország, 2010.05.30-2010.06.04. Budapest: GTE, 2010. pp. 66-73. (ISBN:978-963-9058-28-6)

Péter T, and Bokor J (2010.2) 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) 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 Society of Automotive Engineers (STA), 2011. pp. 26-36. (ISBN:978-84-615-1794-7)

Péter and Bokor J (2011) 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) 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, Fazekas S (2014) Determination of vehicle density of inputs and outputs and model validation for the analysis of network traffic processes *PERIODICA POLYTECHNICA: TRANSPORTATION ENGINEERING* 42:(1) *pp. 53-61.* (2014) (Budapest University of Technology and Economics)

Treiber, M., Helbing, D., (2002). Realistische mikrosimulation von straenverkehr mit einem einfachen modell. In: Symposium ”Simulationstechnik ASIM.

Treiber, M.; Hennecke, A.; Helbing, D. (2000a). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations, *Physical Review E* 62(2): 1805–1824. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.1805

Treiber, M.; Hennecke, A.; Helbing, D. (2000b). Microscopic simulation of congested traffic, in D. Helbing, H. J. Herrmann, M. Schreckenberg, D. E. Wolf (Eds.). *Traffic and Granular Flow'99: Social, Traffic, and Granular Dynamics*, 365–376. https://doi.org/10.1007/978-3-642-59751-0_36

Treiber, M., Hennecke, A., Helbing, D., (2004). Microscopic simulation of congested traffic. Physical Review E 62, 1805–1824

Treiber, M., Hennecke, A., Helbing, D., (2006). Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models. Physica A 360, 71–88.

Treiber, M., Kesting, A., (2011). Evidence of convective instability in congested traffic flow: A systematic empirical and theoretical investigation. Procedia Social and Behavioral Sciences 17, 698–716.

6. IDM-modell járműdinamikai bázisú vizsgálata a forgalmi paramétereinek optimálásához az autonóm járművek vezetés-támogatására

A kutatás, a mechanika körébe tartozó dinamikai jellemzőket határoz meg az Intelligens Vezetői Modellnél (IDM) alkalmazott forgalmi modell-paraméterek halmazán, amelyek az egyes járműveknél a jármű által alkalmazott legnagyobb gyorsulási paraméter, a jármű kívánt sebesség paramétere és a jármű távolságtartási paramétere. Mindez segíti az önvezető, elektromos járművek automatikus irányítását az egyes járműcsoportokban.

1 BEVEZETÉS

A kutatás célja, a vezetési folyamatok hosszdinamikai optimálása. Ez olyan optimálisan csillapított, nem hektikus forgalmi folyamat támogatását jelenti, amelynél a járműcsoportban a járműveknél energia megtakarítást és zajszint csökkentést eredményez és a hagyományos járműveknél e-mellett emisszió csökkentést is. A haladás során minimális sebesség-kilengések lépnek fel, ezért csökkenti a sebességváltozásokat és a felesleges fékezéseket is. A vizsgálatnál a gyorsítási képességek a járművek adottságai. Az optimálási feladatban a változók a követési távolságok és a kívánt sebességek. Fontos követelmény az előbbieknél a minimális távolságok, az utóbbiaknál pedig a felső határ meghatározása. Ebben az anyagban a gyorsítási tulajdonságok tekintetében, közel azonos tulajdonságú járműcsoportot vizsgálunk, azonban ez a vizsgálat természetesen kiterjeszthető a változó összetételű járműcsoportokra is.

A kutatási anyag, egy igen összetett problémát tárgyal, az IDM modellek átfogalmazását a mechanikai-dinamikai rendszerek körébe és ezzel olyan fizikai paramétertérben és rendszeren folytat vizsgálatot, amelyek körében jelentős fizikai, dinamikai ismeretek halmozódtak fel.

Elmondható, hogy az IDM modellek elméleti megalapozása és alkalmazása [12] igen jól áll, ugyanakkor, a valós közlekedési folyamatok bonyolultsága [7,11] igen komoly problémák elé állítja a szakembereket az alkalmazások során. Egyrészt, a közlekedési paraméterek pontosságánál nagyobb hibatűréssel kell számolni, mint sok más dinamikai rendszernél, másrészt megállapítható, hogy rendkívül magas a komplexitás akár, ha a közúti forgalomban egy járműre vonatkozó hatások összességét vizsgáljuk, de akkor is, ha csupán egy vezető [23,24], vagy robotpilóta esetén [14,22], a feldolgozandó információkat elemezzük [1]. Hasonlóan, nagyon összetett a rendszer, ha csupán, a felszíni közlekedés folyamatainak az egészét tekintjük, valamely nagyméretű hálózaton [19,20,21]. A valóság azonban még ennél is sokkal bonyolultabb, mivel a fentiek, a működésük során egyetlen nagy dinamikus rendszert alkotnak és állandó kölcsönhatásban vannak egymással. Ez a komplex rendszer fizikai valóságában egyrészt, a járműdinamikai rendszerek sokaságából áll [8], (amely ember - robotpilóta - géprendszerek sokasága), másrészt, statikus és dinamikus közlekedési hálózati elemek sokaságából is áll. Végül, mindezeket körül veszi, egy nagyon bonyolult dinamikus külső környezet is, amely a szezonalitások mellett különböző földrajzi, meteorológiai, gazdasági és kulturális fejlettségi sajátosságokkal is bír [5,6,13].

A fentiekhez kapcsolódva, az anyagunkban röviden áttekintjük IDM forgalmi alkalmazását, valamint az IDM modell és a nagyméretű hálózatok kapcsolatát. Vizsgáljuk a járművek forgalmi hosszdinamikai tulajdonságait a vezér járműhöz történő felzárkózás során.

Erre, az összetett dinamikai folyamatra értelmezzük a mechanika körébe tartozó Lehr-féle δ relatív csillapítási tényezőt és ω sajátfrekvenciát, mint jól ismert hatású dinamikai jellemzőket. A vizsgálat

célja, a forgalmi paraméterek optimálása és az autonóm járművek vezetés-támogatása, a bevezetett fenti dinamikai jellemzők alkalmazásával.

2 AZ IDM MODELL ÉS FORGALMI ALKALMAZÁSAI

Az Adaptive Cruise Control (ACC) olyan gépjárműforgalmi rendszer, amely lehetővé teszi a jármű számára, hogy a sebességet a környezethez igazítsa. Az Intelligens Driver Model (IDM) egy adaptív tempomat (ACC) modell, amelyet széles körben használnak a közlekedési kutatásokban a longitudinális mozgások modellezéshez. Treiber, Hennecke és a Helbing 2000-ben, a Drezdai Műszaki Egyetem közlekedési laboratóriuma dolgozta ki az (1) Intelligens Vezető Modellt (IDM), amelyet a BMW autógyár használ [27,28].

$$\dot{v}_k = a_k \left[1 - \left(\frac{v_k}{v_k^0} \right)^4 - \left(\frac{s^*\left(v_k, \Delta v_k\right)}{s_k} \right)^2 \right] \tag{1}$$

Ahol:

a_k a k-ik jármű legnagyobb gyorsulása

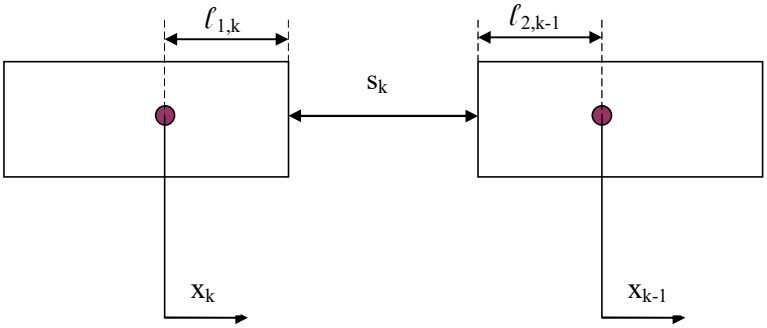
$v_k = \dot{x}_k$ k-ik jármű sebessége

v_k^0 a k-ik jármű kívánt sebessége

s_k k-ik jármű távolsága az őt megelőzőtől

$\Delta x_k = x_{k-1} - x_k$ k-1-ik jármű tömegközéppont pozíciójának és a k-ik jármű tömegközéppont pozíciójának különbsége

$s_k = \Delta x_k - l_k = (x_{k-1} - x_k) - l_k$; (Lásd *1. ábra*)



$$s_k = (x_{k-1} - \ell_{2,k-1}) - (x_k + \ell_{1,k}) = (x_{k-1} - x_k) - (\ell_{2,k-1} + \ell_{1,k}) = (x_{k-1} - x_k) - \ell_k$$

1. Ábra: az egymást kövező járművek s_k távolsága

$$s^*\left(v_k, \Delta v_k\right) = s_k^0 + T_k \cdot v_k + \frac{v_k \cdot \Delta v_k}{2\sqrt{a_k b_k}}; \tag{2}$$

Ahol:

s_k^0 a k-ik jármű, torlódási távolsága

T_k a k-ik jármű biztonsági időrése, amelyeket a járművezetők előre beállítanak

$\Delta v_k = v_{k-1} - v_k$ k-1-ik jármű sebességének és a k-ik jármű sebességének különbsége

b_k a k-ik jármű legnagyobb lassulása

Felhasználva, hogy:

x_k k-ik jármű pozíciója

$\ddot{x}_k = \dot{v}_k$ k-ik jármű gyorsulása

az (1) egyenlet a fentiek alapján átírható a pozíciók szerinti (3), másodrendű differenciálegyenletté, itt elhanyagolva a (2) formula második és harmadik tagját:

$$\ddot{x}_k = a_k \left[1 - \left(\frac{\dot{x}_k}{v_k^0} \right)^4 - \left(\frac{s_k^0}{\left(x_{k-1} - x_k \right) - l_k} \right)^2 \right] \tag{3}$$

Ezt átrendezve, az alábbi k-ik differenciálegyenlet írható fel:

$$\frac{\ddot{x}_k}{a_k} + \left(\frac{\dot{x}_k}{v_k^0} \right)^4 + \left(\frac{s_k^0}{\left(x_{k-1} - x_k \right) - l_k} \right)^2 = 1$$

(k=1,2,...,n), ahol a 0-ik pozíció a vezérpontot jelenti, amelyet az első jármű követ.

Az egyes járműveknél a pozícióik szerinti mozgásokat az alábbi differenciálegyenlet-rendszer határozza meg a járműcsoport 1.,2., ..., n. tagja esetében. Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2012), Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2013) [2,3] munkáikban javasoltak szerint:

$$\frac{\ddot{x}_1}{a_1} + \left(\frac{\dot{x}_1}{v_1^0} \right)^4 + \left(\frac{s_1^0}{\left(x_0 - x_1 \right) - l_1} \right)^2 = 1$$

$$\frac{\ddot{x}_2}{a_2} + \left(\frac{\dot{x}_2}{v_2^0} \right)^4 + \left(\frac{s_2^0}{\left(x_1 - x_2 \right) - l_2} \right)^2 = 1$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$\frac{\ddot{x}_n}{a_n} + \left(\frac{\dot{x}_n}{v_n^0} \right)^4 + \left(\frac{s_n^0}{\left(x_{n-1} - x_n \right) - l_n} \right)^2 = 1$$

Az IDM modellt folyamatos forgalomáramlás modellezésében alkalmazzák az autópálya és a városi forgalom szimulációjánál. Autókövető modellként az IDM az egyes járművek helyzetének és sebességének dinamikáját írja le. A Multi-modell nyílt forráskódú közúti közlekedési szimulátor esetében Treiber és Helbing (2002) [26] az IDM-et használja a hosszirányú jármű mozgásának szimulálására és ez a szimulátor sávváltási stratégiát is bemutat. Modell-alapuló egysávos közlekedési inhomogenitását tanulmányoz Treiber et al. (2004) [29].

A járműközlekedés stabilitását és az IDM paraméter érzékenységét vizsgálja Treiber és mtsai. (2006) [30]. Kesting et al. (2008) [10] és javaslatot tesz az IDM modell vezetői paramétereinek kiterjesztésére. Vizsgálják az IDM-el felszerelt járművek hatását a forgalmi áramlásra és az utazási időkre, mint szűk keresztmetszete. Jerath (2010) [9] szintén az IDM modellt használja és az Adaptive Cruise Control forgalmi folyamatokra gyakorolt hatását tanulmányozza. Fenti munkák eredményei azt mutatják, hogy az ACC járművek arányának növelése a forgalom hatékonyságágának növekedését idézi elő az utazási idők csökkentésével. Treiber és Kesting (2011) [31] az IDM segítségével tanulmányozta az instabilitást a torlódott forgalomban.

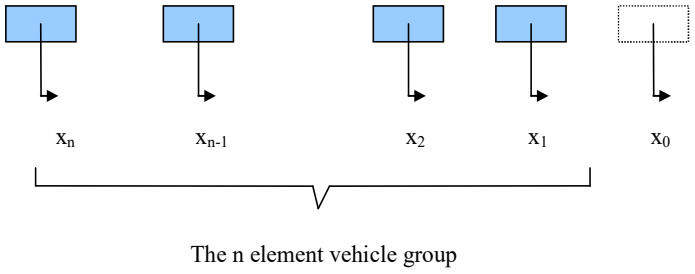
Az IDM modellnek számos előnye van a többi ACC modellekkel szemben a kalibrálás és az intuitív paraméterek szempontjából, továbbá a modellezés végrehajtása is egyszerű szimulációt igényel. Ennek

ellenére, hátrányai is vannak a jármű és a vezető megfelelő tulajdonságainak biztonsága tekintetében. Az IDM ütközésmentes modell, ezért kritikus baleseti helyzetben a kívánt minimális távolság már nem elegendő a vezető biztonságának garantálására és vészfékezés esetén hajlamos a tényleges jármű lassulásának túllépésére.

Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2012), Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2013) [2,3] munkáikban javaslatot dolgoztak ki az IDM modell pontosabb működésére és az IDM módosításaival foglalkoznak a gépjárművezető biztonsága és a jármű valós képességének figyelembe vételével. A módosítás alapján, a vezetőnek már figyelembe kell vennie az őt kövező járművek viselkedését is és ez által, egy új módosított IDM modellt fejlesztettek ki és tesztelt le mikroszkopikus szimulátorral a húrstabilizálás figyelembe vételével. Ez a módosított IDM modell már a valódi gépjármű-képességeket helyezte előtérbe.
Ez alapján, az IDM modell már nagyobb teljesítményt nyújt a vezető biztonsága érdekében, a valós reakciókat követve az ütközés közeli kritikus helyzetekben. Az intelligens járművezető modell módosítását és korszerű működését mutatja be, a jármű valós képességével kapcsolatban.

A modellezés és kutatási munka komplex területet ölel fel, és egyaránt tartalmazza a mikroszkopikus és makroszkopikus modellezés megközelítéseit is, Derbel, O., Péter, T., Mourllion B., & Basset M. (2017) [4]. A bonyolult makroszkopikus forgalmi környezetet a nagyméretű hálózati modell generálja, amelyen a meghatározott trajektóriák szakaszain a mikroszkopikus forgalmi modell szimuláció biztosítja az egyedi járműmozgást a forgalomban. Ennek a mikroszkopikus modellnek azonban ugyancsak megfelelően kell reprodukálnia a dinamikus közlekedési folyamatokat és szintén validáltnak kell lennie. Ennek megfelelően, Munkánk ebben a szakaszában támaszkodunk a Treiber et al. 2000a. 2000b. Derbel, O., Péter, T., Mourllion B., & Basset M. (2017) [27,28,4] Intelligens Driver Model kutatásokra és fejlesztésekre.

A klasszikus IDM modell jellemzői: Egyetlen differenciálegyenlet-rendszer, amely egy sávon haladó n db. járművek esetét vizsgálja. A mikroszkopikus modell, egy láncmodell szerű hosszirányú dinamikát ír le. Minden vezető csak előre figyel és igyekszik egy megfelelő követési távolságoz betartani. Nincs előzés, a járművek megtartják sorrendjüket, meghatározó szerepe van az első járműnek, ill. a csoportban haladó lassú járműveknek is.



2. Ábra: az n elemű járműcsoport és a mozgásukat determináló környezet

Ahogy a fentiekben láttuk, a klasszikus IDM modellt tagonként, külön-külön álló differenciálegyenletekkel írják fel. Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2012), Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2013) [2,3], vizsgálataikban ezt az alábbi (4) differenciálegyenlet-rendszerben foglalták össze, ahol az *i*-ik jármű pillanatnyi pozícióját írja le az $x_i(t)$ függvény. A modellben alkalmazott paraméterek és függvények az alábbiak:

a_i az i-ik jármű legnagyobb gyorsulása

v_i az i-ik jármű kívánt sebessége
s_i az i-ik jármű és az őt megelőző közötti előírt távolságkülönbség (i=1,2 ,... ,n)

$$\left\langle \underline{\underline{A}} \right\rangle^{-1} \ddot{x}(t) + \left\langle \underline{\underline{V}} \right\rangle^{-1} \underline{f_1}(\dot{x}(t)) + \left\langle \underline{\underline{S}} \right\rangle \underline{f_2}(x(t)) = \underline{1} \tag{4}$$

$$\left\langle \underline{\underline{A}} \right\rangle^{-1} = \left\langle \frac{1}{a_1}, \frac{1}{a_2}, ..., \frac{1}{a_n} \right\rangle; \left\langle \underline{\underline{V}} \right\rangle^{-1} = \left\langle \frac{1}{v_1^4}, \frac{1}{v_2^4}, ..., \frac{1}{v_n^4} \right\rangle; \left\langle \underline{\underline{S}} \right\rangle = \left\langle s_1^2, s_2^2, ..., s_n^2 \right\rangle$$

$s_i = s_{0i} = const.$, vagy: $s_i = s_i(\dot{x}_{i-1}, \dot{x}_i)$ (i=1,2,…,n).

$$\underline{f_1}(\dot{x}(t)) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1^4 \\ \dot{x}_2^4 \\ ... \\ \dot{x}_n^4 \end{bmatrix}, \ \underline{f_2}(x(t)) = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{(x_0 - x_1)^2} \\ \dfrac{1}{(x_1 - x_2)^2} \\ ... \\ \dfrac{1}{(x_{n-1} - x_n)^2} \end{bmatrix}, \ \underline{1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ ... \\ 1 \end{bmatrix}$$

Ennek részletes leírását a Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2012), (2013) [2,3] munkák tartalmazzák. Ez a modell már azt is figyelembe veszi, hogy a járművezetők figyelemmel kísérik az őket követő járművek mozgását is, 3. ábra.

$$\left\langle \underline{\underline{A}} \right\rangle^{-1} \ddot{x}(t) + \underline{\underline{V}}\,\underline{f_1}(\dot{x}(t)) + \underline{\underline{S}}\,\underline{f_2}(x(t)) = \underline{1}(t) + \underline{h}(t) \tag{5}$$

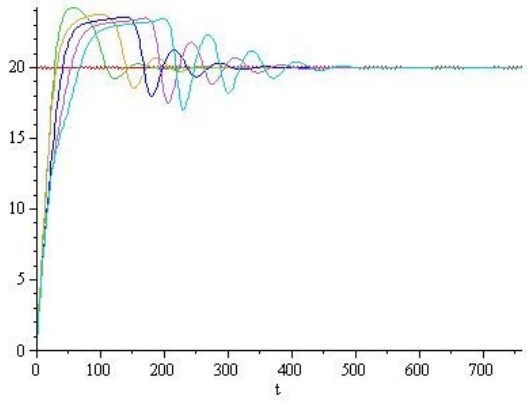
$$\left\langle \underline{\underline{A}} \right\rangle^{-1} = \left\langle \frac{1}{a_1}, \frac{1}{a_2}, ..., \frac{1}{a_n} \right\rangle;$$

$$\underline{\underline{V}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{v_1^4} & \frac{h_1}{v_2^4} & & & \\ & \frac{1}{v_2^4} & \frac{h_2}{v_3^4} & & \\ & & \frac{1}{v_i^4} & \frac{h_i}{v_{i+1}^4} & \\ - & - & - & - & - \\ & & & & \frac{1}{v_n^4} \end{bmatrix}; \quad \underline{\underline{S}} = \begin{bmatrix} s_1^2 & h_1 s_2^2 & & & \\ & s_2^2 & h_2 s_3^2 & & \\ & & s_i^2 & h_i s_{i+1}^2 & \\ - & - & - & - & - \\ & & & & s_n^2 \end{bmatrix};$$

$$h(t) = \begin{bmatrix} h_1(t) \\ h_2(t) \\ ... \\ h_n(t) \end{bmatrix}; \ h_i(t) = hf_i(t) \cdot \frac{a_{i+1}}{a_i}; \ \text{(i=1,2, … ,n-1)}; \ h_n(t) = 0.$$

$s_i = s_{0i} = const.$, vagy: $s_i = s_i(\dot{x}_{i-1}, \dot{x}_i)$ (i=1,2,…,n).

$$\underline{f_1}(\dot{x}(t)) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1^4 \\ \dot{x}_2^4 \\ \dots \\ \dot{x}_n^4 \end{bmatrix}; \qquad \underline{f_2}(x(t)) = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{\varepsilon_1^2 + (x_0 - x_1)^2} \\ \dfrac{1}{\varepsilon_2^2 + (x_1 - x_2)^2} \\ \dots \\ \dfrac{1}{\varepsilon_n^2 + (x_{n-1} - x_n)^2} \end{bmatrix}; \qquad \underline{1}(t) = \begin{bmatrix} 1(t) \\ 1(t) \\ \dots \\ 1(t) \end{bmatrix};$$



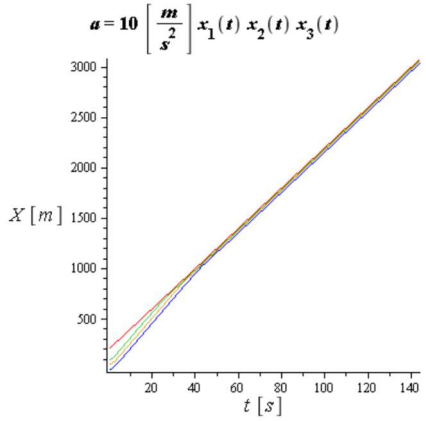
3. Ábra: egy járműcsoport elindulását követően, a stabilizált sebességi állapot *beáll*

3 AZ IDM MODELL ÉS A NAGYMÉRETŰ HÁLÓZAT KAPCSOLATA

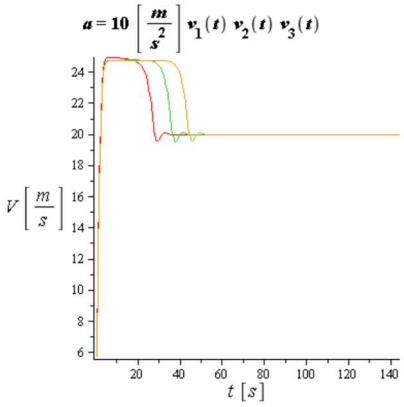
Egy adott jármű sebességét és a követési távolságot a vezető határozza meg. A döntése azonban egyaránt függ a saját észleléseitől és a járműve által, a fizikai környezetről küldött jelzésektől, továbbá a hálózati forgalom helyi és általános hatásaitól [15,16,17,18,19,20]. Az útminőségi, meteorológiai, látási viszonyokból eredő fizikai hatások az adott járműsűrűségnél meghatároznak egy választható sebességtartományt. Adott szakaszon előre haladó, jármű-jármű hatásokból eredő dinamikus kapcsolatok forgalomi leírására alkalmazható az előző pontban tárgyalt módosított IDM modell.
Ugyanakkor, az IDM modellcsoport mozgásának dinamikája sem öntörvényű, ezt a nagyméretű hálózaton, hálózati szektorokon kialakuló vezérlő sebességek determinálják. Lelassulnak, ha torlódás lép fel, megállnak, ha a forgalomirányító lámpa pirosra vált, de a reakciókésedelmi időket követően felgyorsulnak a megengedett legnagyobb sebességhatárig, ha az útszakasz szabad. **Ezt jelöli a *2. ábrán* az x_0(t) vezérlő sebesség függvény, amelyet az egyes trajektóriáknál a nagyméretű makroszkopikus hálózati folyamatok határoznak meg.**

4 A JÁRMŰVEK LEGNAGYOBB „A” GYORSÍTÁSI PARAMETER-RÉNEK HATÁSA A MOZGÁSFOLYAMATRA, A VEZÉR JÁRMŰHÖZ TÖRTÉNŐ FELZÁRKÓZÁS SORÁN

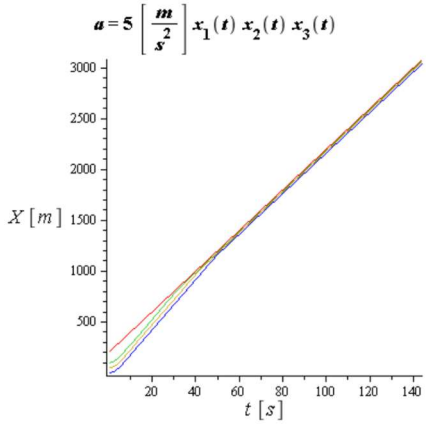
Az alábbi ábrák szimulált út-idő és sebesség-idő diagramokat mutatnak be a különböző „a” gyorsítási képességek esetében. Esetünkben egy sávban különböző kezdeti pontban, t_0=0 időpontban nyugalmi állapotban lévő járművek indulnak el és követik a vezér pont (vezér jármű) mozgását.



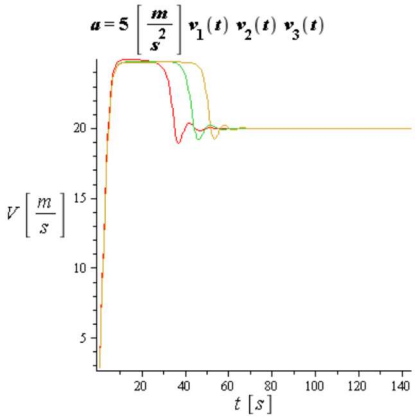
4. Ábra: a=10 [m/s^2] esetén, a felzárkózás mozgásfolyamata



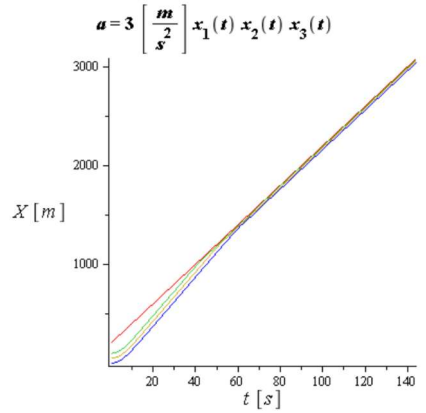
5. Ábra: a=10 [m/s^2] esetén, a felzárkózás sebességfolyamata



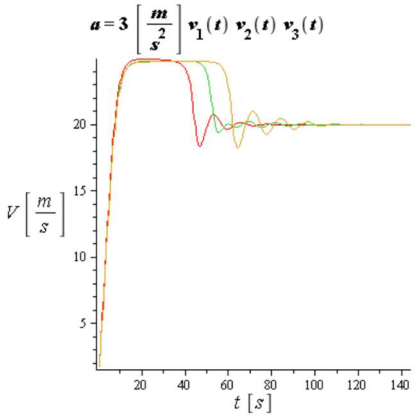
6. Ábra: a=5 [m/s^2] esetén, a felzárkózás mozgásfolyamata



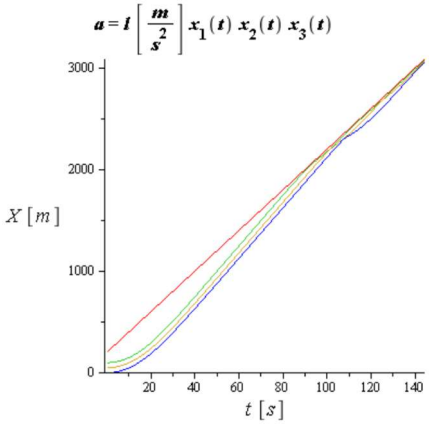
7. Ábra: a=5 [m/s^2] esetén, a felzárkózás sebességfolyamata



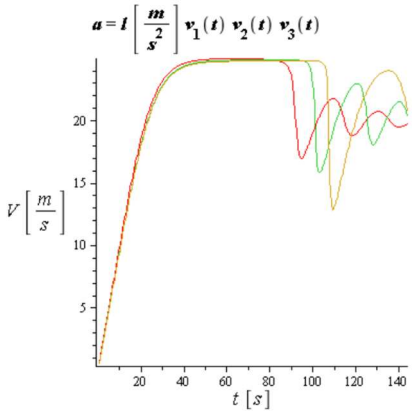
8. Ábra: a=3 [m/s^2] esetén, a felzárkózás mozgásfolyamata



9. Ábra: a=3 [m/s^2] esetén, a felzárkózás sebességfolyamata



10. Ábra: a=1 [m/s^2] esetén, a felzárkózás mozgásfolyamata



11. Ábra: a=1 [m/s^2] esetén, a felzárkózás sebességfolyamata

Ezek a szimulációk ebben az esetben, a vezér járműn kívül a gépjárműcsoportban három egymást követő járművet vettek figyelembe. A kisebb gyorsítási képességű járművek esetében jól láthatók a lomhább mozgások. A gyorsítási képességek hatnak a túllendülés mértékére, viszont erősen a stabil sebességállapotra történő beállás időpontjára. Mindezek a tulajdonságok természetesen determinálják a forgalomban lévő többi szereplő mozgását is, az energiaemésztést, a kibocsájtást és a forgalmi zajt is, tehát érdemes egy mélyebb analízist elvégezni, amely a simább, zökkenőmentes forgalmi folyamatokat segíti elő a járműcsoportoknál.

5 A MECHANIKA KÖRÉBE TARTOZÓ DINAMIKAI JELLEMZŐK ÉS A FORGALMI PARAMÉTEREK KAPCSOLATA

Az IDM modell a járműcsoportok a hossz-irányú mozgását vizsgálja a forgalomban, tehát a vizsgálat lényege egy hosszdinamikai forgalmi analízis.
Az IDM alaprendszer paraméterei bizonytalanságokat hordozó közlekedési rendszerparaméterek, ezért vizsgáljuk meg a matematikai modell alábbi értelmezését és megfelelően megválasztott átírását, amely hasznos a dinamikai tulajdonságok további elemzésére és újabb összefüggések feltárására.
Az alábbi modell-megfontolások mellet, az alkalmazott modellszerkezet alkalmas többtömegű lengéstani dinamikai modell analízisének elvégzésére, tisztán lengéstani fogalmak alkalmazásával és ezekből az eredeti közlekedési rendszer-paraméterekre vonatkozó következtetések levonására.

$$\left\langle \underline{\underline{A}} \right\rangle^{-1} \ddot{x}(t) + \left\langle \underline{\underline{V}} \right\rangle^{-1} \underline{f_1}(\dot{x}(t)) + \left\langle \underline{\underline{S}} \right\rangle \underline{f_2}(x(t)) = \underline{1} \tag{6}$$

Ennél a (6) modellnél, értelmezhető az $\underline{\underline{M}}$ tömegmátrix, a $\psi(\dot{x}(t))$ nemlineáris csillapítási vektor és az $\varphi(x(t))$ nemlineáris rugóerő vektor, amely a (7) klasszikus nemlineáris járműdinamikai modell t határozza meg. ($\underline{\underline{M}} \in \Re^{nxn}; \psi(\dot{x}(t)) \in \Re^{n}; \varphi(x(t)) \in \Re^{n};$)

$$\underline{\underline{M}} = \left\langle \underline{\underline{A}} \right\rangle;$$
$$\psi(\dot{x}(t)) = \left\langle \underline{\underline{V}} \right\rangle^{-1} \underline{f_1}(\dot{x}(t));$$
$$\varphi(x(t)) = \left\langle \underline{\underline{S}} \right\rangle \underline{f_2}(x(t));$$

Az $\underline{\underline{M}}$ diagonális mátrix elemei: $m_i = \frac{1}{a_i}; (i = 1, 2, ..., n)$ értékeket vesznek fel.

$$\underline{\underline{M}}\ddot{x}(t) + \psi(\dot{x}(t)) + \underline{\varphi}(x(t)) = \underline{1} \tag{7}$$

Az IDM rendszer speciális tulajdonsága, hogy ha a vezérpont konstans v_0 sebességet vesz fel, akkor a járműcsoport i=1, 2, ..., n tagjainak mozgása aszimptotikusan beáll egy stabil állapotra:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i(t) &\to 0 \\ \dot{x}_i(t) &\to v_i^* = \text{const}! \\ x_{i-1}(t) - x_i(t) &\to s_i^* = \text{const}! \end{aligned} \tag{8}$$

A (8) összefüggéseknél v_i^* a kívánt pontos sebesség és s_i^* a kívánt pontos távolság az i-ik járműnél, amelyeket a járművezetők a járművek hosszdinamikái alapján kívánnak tartani. Mivel hibáznak és ettől eltérhetnek, ezt az $\alpha>0$ és $\beta>0$ koefficiensekkel veszünk figyelembe, ezért az $s_i = \alpha s_i^*$ és a $v_i = \beta v_i^*$ értékeket tekintjük a tényleges munkapontoknak. A koefficiensek beállítása a validálások során, a méréseknél, ill. szimulációknál kapott eredmények felhasználásával történik. Ezt követően vizsgáljuk a munkapont körüli mozgásokat, mivel ily módon származtathatók olyan rendszerjellemző paraméterek, amelyek jól értelmezhetők korábbi járműdinamikai vizsgálatokból és fontos információkhoz juthatunk az összetettebb IDM paraméterek analízisénél is.

Vizsgáljuk a továbbiakban a munkapont körüli linearizált rendszer valamely i-ik eleménél a k_i csillapítási tényezőt és S_i rugómerevségi tényezőt és az m_i tömeget:

$$k_i = \left[\frac{d}{d\dot{x}_i} \left(\frac{\dot{x}_i}{v_i} \right)^4 \right]_{\dot{x}_i = v_i} = \frac{4}{v_i}; \tag{9}$$

$$S_i = \left[\frac{d}{dx_i} \left(\frac{s_i}{x_{i-1} - x_i} \right)^2 \right]_{x_{i-1} - x_i = s_i} = \frac{2}{s_i}; \tag{10}$$

$$m_i = \frac{1}{a_i}; \tag{11}$$

A (9),(10) és (11) alapján bevezethetjük az IDM rendszer elemeinél a munkapont körüli ω_i sajátfrekvenciát és munkapont körüli Lehr-féle δ_i relatív csillapítási tényezőt, amelyek az eredeti IDM modell paraméterek alapján az alábbiak:

$$\omega_i^2 = \frac{S_i}{m_i} = 2\frac{a_i}{s_i}; \tag{12}$$

A δ_i relatív csillapítási tényezőre a definíció alapján az alábbi (13), továbbá (9) és (11) alapján a (14) összefüggés érvényes:

$$\frac{k_i}{m_i} = 2 \cdot \delta_i \cdot \omega_i \tag{13}$$

$$\frac{k_i}{m_i} = \frac{\frac{4}{v_i}}{\frac{1}{a_i}} = 4\frac{a_i}{v_i} \tag{14}$$

(13) és (14) alapján:

$$\delta_i = \sqrt{2}\frac{\sqrt{a_i \cdot s_i}}{v_i} \tag{15}$$

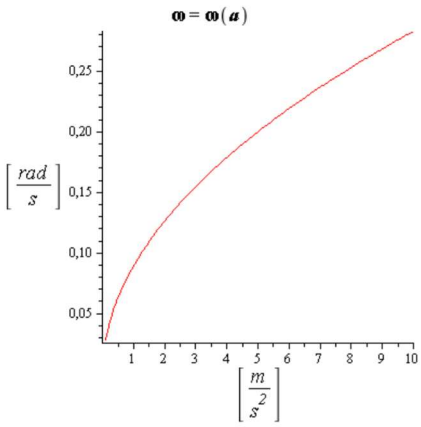
A fenti összefüggést, az IDM modell paraméterei alapján határoztuk meg. A δ értéke szimulációval, vagy méréssel is jól közelíthető a logaritmikus dekrementum erre vonatkozó alkalmazásával oly módon, hogy a sebesség függvény a $v=v_0$ tengely körüli csillapított lengésfolyamatát az $\dot{x}_i(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot e^{-2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot t}$ függvény modellezi. Ez esetben meghatározzuk t_1, t_2, t_3, ... t_k lokális szélsőértékekhez tartozó A_1, A_2, A_3, ... A_k amplitúdókat. Felhasználjuk továbbá, hogy: $|\cos(\omega \cdot t_1)| = |\cos(\omega \cdot t_2)| = |\cos(\omega \cdot t_3)| = ... = |\cos(\omega \cdot t_k)|$ majd, tekintjük az alábbi tetszőleges $t_i \neq t_j (t_1 \leq t_i \prec t_j \leq t_k)$ időpontokat és alkalmazzuk az alábbi összefüggéseket:

$$\frac{A_i}{A_j} = \frac{A \cdot \cos(\omega \cdot t_i) \cdot e^{-2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot t_i}}{A \cdot \cos(\omega \cdot t_j) \cdot e^{-2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot t_j}} = \frac{e^{-2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot t_i}}{e^{-2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot t_j}} \tag{16}$$

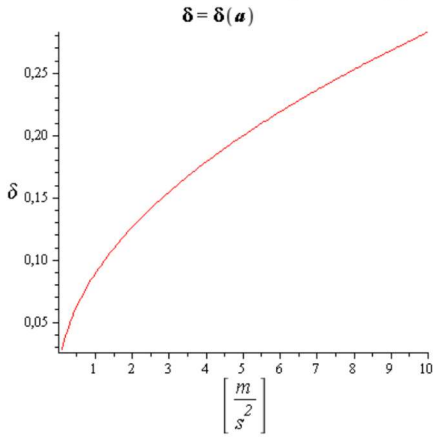
$$\ln A_i - \ln A_j = 2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot (t_j - t_i) \tag{17}$$

$$\delta = \frac{\ln A_i - \ln A_j}{2 \cdot \omega \cdot (t_j - t_i)} \tag{18}$$

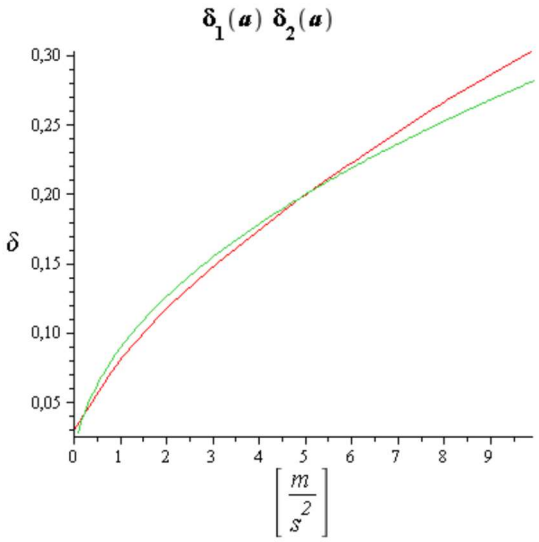
A gyakorlati számítások esetén a t_1, t_2, t_3, ... t_k sorozat első 3-4 eleme használható fel az amplitúdók gyors csökkenése és a relatív mérési hiba növekedése miatt, ezért a legnagyobb amplitúdót és őt követő, elfogadható mérési hibával rendelkező amplitúdókat célszerű figyelembe venni.
Az „a" gyorsítási jellemző függvényében a fentiek alapján munkapont körüli linearizációs módszerrel meghatározhatók az $\omega = \omega(a)$ sajátfrekvencia és $\delta=\delta(a)$ relatív csillapítási tényező függvények:



12. Ábra: IDM modellparaméterek alapján számított $\omega = \omega(a)$ függvény



13. Ábra: IDM modellparaméterek alapján számított $\delta=\delta(a)$ függvény



14. Ábra: A különböző gyorsulási képességekhez tartozó relatív csillapítási függvény validálása. A $\delta_1 = \delta_1$ (a) függvény az IDM modellparaméterek alapján, a $\delta_2 = \delta_2$ (a) függvény a logaritmikus dekrementum alapján lett meghatározva

A fentiek alapján az egyes járműveknél a δ relatív csillapítás tényezőre zárt formula adható meg a differenciálegyenlet-rendszer nemlineáris karakterisztikáinak munkapont-körüli linearizációjával. Ezzel párhuzamosan a dinamikus járműrendszernél, a csillapodó sebességfolyamatok vizsgálata alapján mérhetők a csillapítási mértékek. Bár, nemlineáris a jelenség (anharmonikus a lengés), vizsgálataink alapján, meglepően jól validálható ez esetben a logaritmikus dekrementum módszer alkalmazásával a fenti linearizáció. A két módszer együttes alkalmazása igen hasznos és fontos is, mivel rámutat a munkapont körüli linearizációnál figyelembe veendő tényleges tartomány méretére, amely egy ehhez szükséges koefficiens érték meghatározását jelenti. A mérésből, ill. szimulációból nyert *Lehr-féle* δ relatív csillapítási tényező (az irodalomban gyakori a D_L, a jelölése) egy jól behatárolt tartományban helyezkedik el (1<δ<1). Ez, a rendszer csillapítottságát jellemző fizikai paraméter az eljárásunk során ellenőrzi a linearizáció által számított δ értéket is. A validálás során, a δ relatív csillapítási tényezőknél számított relatív hibaszázalék értékeit szemlélteti az alábbi táblázat, a *17. ábrán* látható függvényeknél.

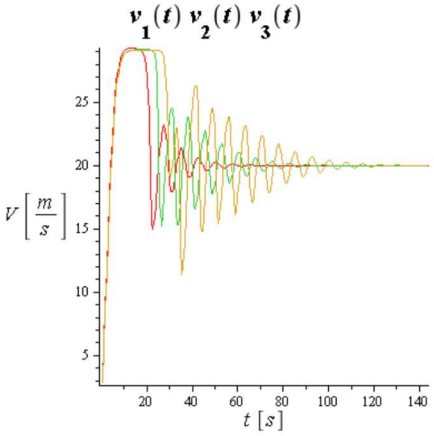
a [m/s^2]	**1**	**2**	**3**	**5**	**6**	**8**	**10**
Relatív hiba [%]	8.59	6.65	4.50	0.13	1.77	5.53	7.94

1. Táblázat

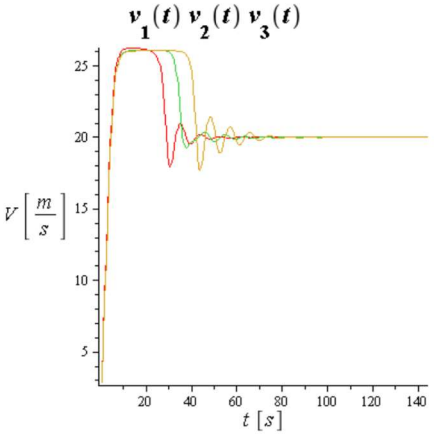
6 A δ RELATÍV CSILLAPÍTÁS VARIÁLÁSA, A=5M/S^2 GYORSULÁSI TULAJDONSÁG MELLETT ÉS FIX ω =0.2 ÉRTÉK MELLETT

Megállapítható, hogy a kis δ relatív csillapítás (δ=0.16-0.18) esetén magas a sebességtúllövés és 20 m/s helyett, elérheti pl. a 30 m/s sebességet is, ezért elég komoly fékezésekre van szükség miáltal, lemegy a sebesség a 0-10 m/s értékek közelébe is. Tehát, igen hektikusak a járműveknél a sebességek alakulása és a sebességek ingadozása 1-1.5 percig is eltarthat.

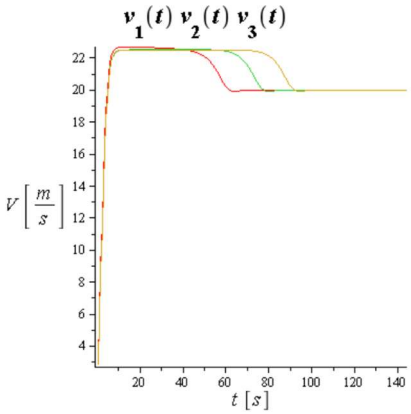
Ahogy növekszik a δ relatív csillapítás értéke δ=0.2-ig, úgy csökken a sebességtúllövés értéke és a követési sebesség felvételi ideje is, pl. δ=0.2-nél v=25, a stabilitásidő pedig 1 perc. δ=0.2-0.24 közötti relatív csillapítás értékeknél tovább csökken a sebességtúllövés értéke és sima, lengésmentessé válik a sebességfüggvények alakulása, a stabilitási idő értéke viszont el kezd növekedni.



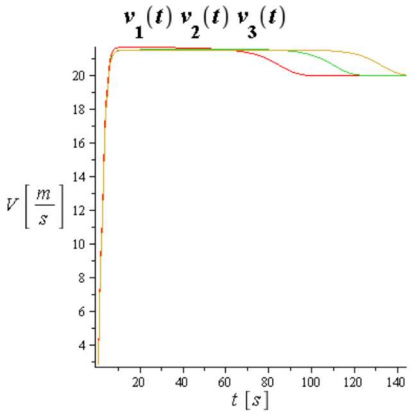
15. Ábra: a=5 [m/s^2] és δ=0.17



16. Ábra: a=5 [m/s^2] és δ=0.19



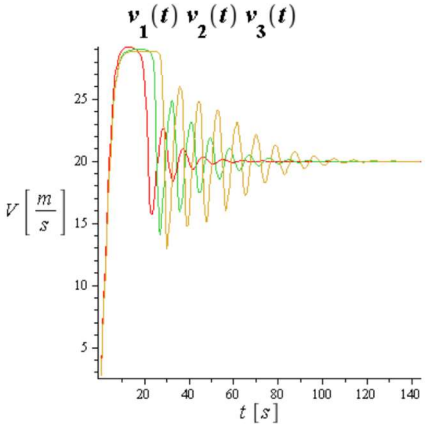
17. Ábra: a=5 [m/s^2] és δ=0.22



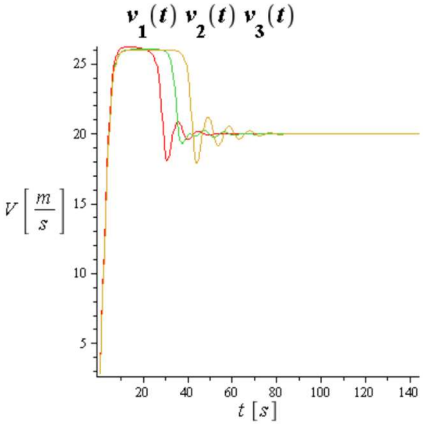
18. Ábra: a=5 [m/s^2] és δ=0.23

7 AZ ω VARIÁLÁSA, A=5M/S^2 GYORSULÁSI TULAJDONSÁG MELLETT ÉS FIX δ=0.2 RELATÍV CSILLAPÍTÁS ÉRTÉK MELLETT

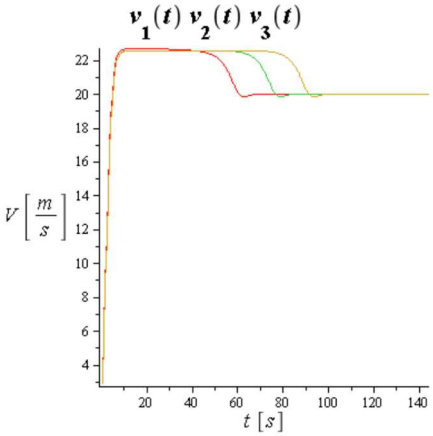
Megállapítható, hogy a kis ω sajátfrekvencia tartományban (ω<0.17) magas a sebességtúllövés és 20 m/s helyett elérheti pl. a 29 m/s sebességet is, ezért elég komoly fékezésekre van szükség és lemegy a sebesség a 13-15 m/s értékek közelébe is. Tehát hektikusak a járműveknél a sebességek alakulása és a sebességek ingadozás 90 s-ig is eltarthat. Ahogy növekszik az ω sajátfrekvencia értéke ω =0.2-ig, úgy csökken a sebességtúllövés értéke és a követési sebesség felvételi ideje is, pl. ω=0.2-nél v=25, a stabilitásidő pedig 1 perc alatti érték. ω=0.2-0.24 sajátfrekvencia értékeknél tovább csökken a sebességtúllövés értéke v=21 és sima, lengésmentessé válik a sebességfüggvények alakulása, a stabilitási idő értéke viszont el kezd növekedni.



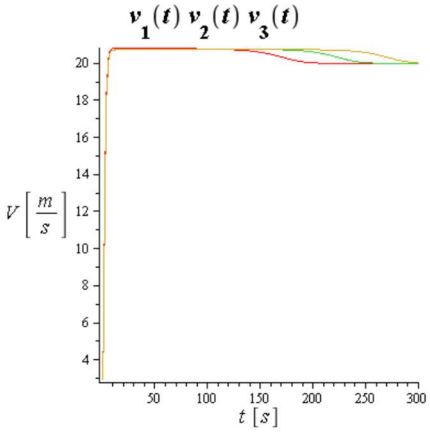
19. Ábra: a=5 [m/s^2] és ω =0.17



20. Ábra: a=5 [m/s^2] és ω =0.19



21. Ábra: a=5 [m/s^2] és ω =0.22



22. Ábra: a=5 [m/s^2] és ω=0.24

Az alábbi 2. és 3. táblázatok az ω-hoz és δ-hoz tartozó „s" és „v" számított IDM paramétereket tartalmazza, az utolsó oszlop pedig a járműcsoport 1 kg tömegének mozgására vonatkozó fajlagos energia felhasználásának mennyiségét mutatja be.

δ	s, táv [m]	v [m/s]	Fajlagos Energia [Nm]
0,16	10	31,25	689,31
0,18	10	27,77	673,29
0,20	10	25,00	666,71
0,22	10	22,73	660,50
0,23	10	21,74	656,37

2. táblázat: Fix a=5m/s^2 és Fix ω=0.2 rad/s értékek mellett

Az optimális **δ**=0,23 értéknél**,** 4,779% csökkenés lépett fel a járműcsoport energia felhasználásánál a stabil sebesség beállásáig a kezdeti **δ**=0,16 értéknél számítotthoz képest.

ω [rad/d]	s, táv [m]	v [m/s]	Fajlagos Energia [Nm]
0,17	13,84	29,41	673,45
0,18	12,35	27,78	670,08
0,20	10,00	25,00	666,71
0,22	8,26	22,73	662,98
0,24	6,94	20,83	632,74

3. táblázat: Fix a=5m/s^2 és Fix δ=0.2 értékek mellett

Az optimális ω=0,24 értéknél, 6,045 % csökkenés lépett fel a járműcsoport energia felhasználásánál a stabil sebesség beállásáig a kezdeti ω=0,17 értéknél számítotthoz képest.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az IDM alaprendszer-paraméterei közlekedési rendszerparaméterek, amelyek a közlekedési folyamatok sajátosságai, ill., hektikusságai miatt bizonytalanságokat hordozhatnak. Ez a kutatás az IDM modell járműdinamikai tulajdonságát vizsgálata a matematikai modell alkalmasan megválasztott átírásával. A dinamikai tulajdonságok további elemzésére ily módon hasznos újabb összefüggések feltárásához vezetett. A megválasztott modellszerkezet és az alkalmazott megfontolások alkalmasak a többtömegű lengéstani dinamikai modell analízisére, tisztán lengéstani fogalmak alkalmazásával. Ez alapján, fontos információkhoz juthatunk az összetettebb IDM rendszer paraméter-struktúrájával és optimálásával kapcsoltban is.

A vizsgálat az egyes megadott gyorsítási képességek esetében, figyelembe veszi a követendő jármű sebességét és meghatározza az optimális sebességmaximumot és az optimális távolságot is. Ez egyaránt kihat a sebesség túllendülés mértékére és a stabil sebességállapotra történő beállás időpontjára, továbbá a mozgási energia optimálására is. Mindezek az optimális tulajdonságok kihatnak a forgalomban jelenlévő többi szereplőre is, valamint a kibocsájtásra és a forgalmi zajra is. Ez elősegíti a simább, zökkenőmentes forgalmi folyamatokat a járműcsoportoknál és az önvezető járműveknél [25] a forgalomfüggő optimális döntések automatizálását az optimális paraméterek automatikus beállításával.

IRODALOM

[1] Csiszár, Cs., Földes, D. (2018) System Model for Autonomous Road Freight Transportation, Promet - Traffic&Transportation, Vol.30 No.1 February 2018. pp. 93-103. https://doi.org/10.7307/ptt.v30i1.2566

[2] Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2012) Modified intelligent driver model, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 40(2): 53–60. https://doi.org/10.3311/pp.tr.2012-2.02

[3] Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2013) Modified intelligent driver model for driver safety and traffic stability improvement, *IFAC Proceedings Volumes* 46(21): 744–749. https://doi.org/10.3182/20130904-4-JP-2042.00132

[4] Derbel, O., Péter, T., Mourllion B., & Basset M. (2017) Generalized Velocity–Density Model based on microscopic traffic simulation, Transport, DOI: 10.3846/16484142.2017.1292950 To link to this article: http://dx.doi.org/10.3846/16484142.2017.1292950 ISSN: 1648-4142 (Print) 1648-3480 (Online) Journal homepage: http://www.tandfonline.com/loi/tran20

[5] Farooq, A., Xie, M., Williams, E., Gahlot, V., Yan, D. and Yi, Z. (2018) "Downsizing Strategy for Cars, Beijing for People Not for Cars: Planning for People", *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 46(1), pp. 50-57. doi: https://doi.org/10.3311/PPtr.10851

[6] Ghadi, M., Török, Árpád and Tánczos, K. (2018) "Study of the Economic Cost of Road Accidents in Jordan", *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 46(3), pp. 129-134. doi: https://doi.org/10.3311/PPtr.10392

[7] Iordanopoulos, P., Mitsakis, E. and Chalkiadakis, C. (2018) "Prerequisites for Further Deploying ITS Systems: The Case of Greece", *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 46(2), pp. 108-115. doi: https://doi.org/10.3311/PPtr.11174.

[8] Istenes, G., Szauter, F. , Rödönyi, G. Vibration analysis of a suspension system subject to high level of measurement noise (2017) 2017 4th International Conference on Control, Decision and

Information Technologies (CoDIT) 5-7 April, 2017 Barcelona, Spain. DOI: 10.1109/CoDIT.2017.8102707

[9] Jerath, K.. (2010) Impact of adaptive cruise control on the formation of self-organized traffic jams on highway. Master's thesis, The Pennsylvania State University The Graduate School. Department of Mechanical and Nuclear Engineering.

[10] Kesting, A., Treiber, M., Helbing, D. (2008) Agents for traffic simulation. Physics and Society 11, 325–356.

[11] Koryagin, M. (2018) "Urban Planning: a Game Theory Application for the Travel Demand Management", *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 46(4), pp. 171-178. doi: https://doi.org/10.3311/PPtr.9410.

[12] Kovács,T., Bolla, K., Gil, R.,A., Csizmás, E., Fábián, Cs., Kovács, L., Medgyes, K., Osztényi, J., Végh A. (2016) Parameters of the intelligent driver model in signalized intersections Technical gazette, Vol.23 No.5 October 2016. pp. 1469-1474, ISSN 1330-3651 (Print), ISSN 1848-6339 (Online) DOI: 10.17559/TV-20140702174255

[13] Lakatos, A., Mándoki P. (2017) Quality evaluation of the long-distance bus and train transportation in Hungary. *Transportation Research Procedia, Volume 27, 2017, Pages 365-372.* ISSN: 2352-1465

[14] Mihály, A., Németh, B. and Gáspár, P. (2018) "Real-time Look-ahead Cruise Control Simulator", *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 46(1), pp. 11-16. doi: https://doi.org/10.3311/PPtr.9896.

[15] Péter T, and Bokor J. (2010.1) Research for the modelling and control of traffic, In: Scientific Society for Mechanical Engineering ,33rd Fisita-World Automotive Congress: Proceedings, Budapest, Magyarország, 2010.05.30-2010.06.04. Budapest: GTE, 2010. pp. 66-73. (ISBN:978-963-9058-28-6)

[16] Péter T, and Bokor J. (2010.2) 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)

[17] Peter, Fülep and Bede (2011) 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 Society of Automotive Engineers (STA), 2011. pp. 26-36. (ISBN:978-84-615-1794-7)

[18] Péter T. and Bokor J. (2011) 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

[19] Péter, T. (2012) 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

[20] Péter T, Fazekas S. (2014) Determination of vehicle density of inputs and outputs and model validation for the analysis of network traffic processes *PERIODICA POLYTECHNICA: TRANSPORTATION ENGINEERING* 42:(1) *pp. 53-61.* (2014) (Budapest University of Technology and Economics)

[21] Pokorádi, L. (2018) Graph model-based analysis of technical systems IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 393 (2018) 012007pp. 1-9. doi:10.1088/1757-899X/393/1/012007

[22] Takács, Á., Drexler, D., A., Galambos, P., Rudas, I., J., Haidegger, T. (2018) Assessment and Standardization of Autonomous Vehicles 2018 IEEE 22nd International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES) 21-23 June., Las Palmas de Gran Canaria, Spain, pp. 185-192., ISSN: 1543-9259. DOI: 10.1109/INES.2018.8523899

[23] Szabó, G., Szabó, K. and Zerényi, R. (2004) Safety Management Systems in Transportation: Aims and Solutions. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 32(1):123-134

[24] Szabó K., Szabó G., Renner P. (2009) Emberi hibamodellezés alkalmazása a légiközlekedési kockázatelemzésekben KÖZLEKEDÉSTUDOMÁNYI SZEMLE 59:(5) pp. 29-35.(2009)

[25] Szalay, Z., Tettamanti, T., Esztergár-Kiss, D., Varga, I. and Bartolini, C. (2018) "Development of a Test Track for Driverless Cars: Vehicle Design, Track Configuration, and Liability Considerations", *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 46(1), pp. 29-35. doi: https://doi.org/10.3311/PPtr.10753.

[26] Treiber, M., Helbing, D. (2002) Realistische mikrosimulation von straenverkehr mit einem einfachen modell. In: Symposium "Simulationstechnik ASIM.

[27] Treiber, M.; Hennecke, A.; Helbing, D. (2000a) Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations, *Physical Review E* 62(2): 1805–1824. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.1805

[28] Treiber, M.; Hennecke, A.; Helbing, D. (2000b) Microscopic simulation of congested traffic, in D. Helbing, H. J. Herrmann, M. Schreckenberg, D. E. Wolf (Eds.). *Traffic and Granular Flow'99: Social, Traffic, and Granular Dynamics*, 365–376. https://doi.org/10.1007/978-3-642-59751-0_36

[29] Treiber, M., Hennecke, A., Helbing, D. (2004) Microscopic simulation of congested traffic. Physical Review E 62, 1805–1824

[30] Treiber, M., Hennecke, A., Helbing, D. (2006) Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models. Physica A 360, 71–88.

[31] Treiber, M., Kesting, A. (2011) Evidence of convective instability in congested traffic flow: A systematic empirical and theoretical investigation. Procedia Social and Behavioral Sciences 17, 698–716.

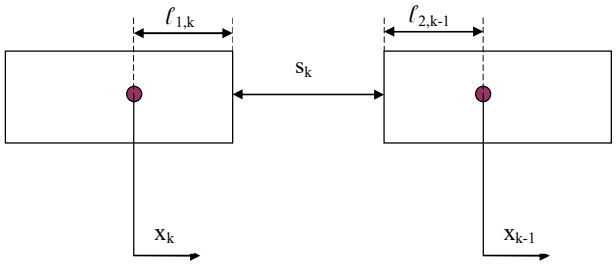
7. Az Univerzális IDM-modell matematikai felírása és alkalmazási területe

Ennek a kutatásnak az a fontos eredménye, hogy a modell, egyetlen differenciálegyenlet-rendszert alkalmaz, amely egyszerre képes leírni az összes különböző (n!) sorrend szerint kialakuló IDM rendszerek dinamikus működését. Ennek megfelelően, a modell azokat az átmeneti állapotokat is figyelembe veszi, amelyek két különböző tetszőleges sorrend esetén (egy P_j, kiindulási és P_k célsorrend között) alakulhatnak ki. Ez a vizsgálat az autonóm járművek vezetés-támogatására szolgál, állandóan figyelembe véve a forgalomi folyamatok állapotjellemzőinek dinamikus változását. Az alkalmazott megközelítést a jelenlegi modellezési technikában fontos kérdések motiválják és ezek a nagyméretű ITS hálózati modellek alkalmazásánál jelentős gazdasági problémákat érintenek. Az alkalmazás, a járművek hálózati tartományon történő optimális átvezetését szolgálja. Ez új szempontokat határoz meg a járműforgalom irányítás kulcsfontosságú területén, a kapcsolódó célzott alapkutatásoknál elsősorban a nagyméretű dinamikus hálózatok forgalmi folyamatainak elemzésénél. A modell, a pozitív nemlineáris rendszerek osztályába tartozik, amely ugyancsak modern megközelítés a közlekedéskutatások területén

1. BEVEZETŐ

A klasszikus IDM modell egy láncmodell szerű mikroszkopikus modell, amely n db. jármű előrehaladása során a hosszirányú dinamikát írja le. Minden vezető csak előre figyel és igyekszik egy megfelelő követési távolságot betartani. Nincs előzés, a járművek megtartják sorrendjüket. Meghatározó szerepe van az első járműnek és a csoportban haladó lassú járműveknek is. A gépjárműforgalmi rendszer hosszdinamikáját a rendszerparaméterek és a kapcsolati függvényeik határozzák meg és ez lehetővé teszi a jármű számára, hogy a sebességet a környezethez igazítsa. Az Intelligens Driver Model (IDM) az Adaptive Cruise Control (ACC) családba tartozik. Treiber, Hennecke és a Helbing 2000-ben, a Drezdai Műszaki Egyetem közlekedési laboratóriuma dolgozta ki az (1) Intelligens Vezető Modellt (IDM), amelyet a BMW autógyár használ. A Multi-modell nyílt forráskódú közúti közlekedési szimulátor esetében Treiber és Helbing (2002) az IDM-et használja a hosszirányú jármű mozgások szimulálására és ez a szimulátor sávváltási stratégiát is bemutat. Modell-alapuló egysávos közlekedési inhomogenitását tanulmányoz Treiber et al. (2004). A járműközlekedés stabilitását és az IDM paraméter érzékenységét vizsgálja Treiber és mtsai. (2006). Kesting et al. (2008) és javaslatot tesz az IDM modell vezetői paramétereinek kiterjesztésére. Vizsgálják az IDM-el felszerelt járművek hatását a forgalmi áramlásra és az utazási időkre, mint szűk keresztmetszete. Jerath (2010) szintén az IDM modellt használja és az Adaptive Cruise Control forgalmi folyamatokra gyakorolt hatását tanulmányozza. Fenti munkák eredményei azt mutatják, hogy az ACC járművek arányának növelése a forgalom hatékonyságágának növekedését idézi elő az utazási idők csökkentésével. Treiber és Kesting (2011) az IDM segítségével tanulmányozta az instabilitást a torlódó forgalomban.

$$\dot{v}_k = a_k \left[1 - \left(\frac{v_k}{v_k^0} \right)^4 - \left(\frac{s^*\left(v_k, \Delta v_k\right)}{s_k} \right)^2 \right] \qquad (1)$$



$$s_k = (x_{k-1} - \ell_{2,k-1}) - (x_k + \ell_{1,k}) = (x_{k-1} - x_k) - (\ell_{2,k-1} + \ell_{1,k}) = (x_{k-1} - x_k) - \ell_k$$

1. ábra: az egymást kövező járművek s_k távolsága

Az egyes járműveknél a pozícióik szerinti mozgásokat az alábbi differenciálegyenlet-rendszer határozza meg a járműcsoport 1.,2., ..., n. tagja esetében. Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2012), Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2013) munkáikban javasoltak szerint:

$$\begin{aligned}
&\frac{\ddot{x}_1}{a_1} + \left(\frac{\dot{x}_1}{v_1^0}\right)^4 + \left(\frac{s_1^0}{(x_0 - x_1) - l_1}\right)^2 = 1 \\
&\frac{\ddot{x}_2}{a_2} + \left(\frac{\dot{x}_2}{v_2^0}\right)^4 + \left(\frac{s_2^0}{(x_1 - x_2) - l_2}\right)^2 = 1 \\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\
&\frac{\ddot{x}_n}{a_n} + \left(\frac{\dot{x}_n}{v_n^0}\right)^4 + \left(\frac{s_n^0}{(x_{n-1} - x_n) - l_n}\right)^2 = 1
\end{aligned} \tag{2}$$

Ahol:

a_k a k-ik jármű legnagyobb gyorsulása

x_k k-ik jármű pozíciója

$\dot{x}_k = v_k$ k-ik jármű sebessége

$\ddot{x}_k$ k-ik jármű gyorsulása

v_k^0 a k-ik jármű kívánt sebessége

$x_{k-1} - x_k$ k-1-ik és k-ik jármű tömegközéppontjának távolsága

s_k^0 a k-ik jármű, torlódási távolsága

$\Delta v_k = v_{k-1} - v_k$ k-1-ik és a k-ik jármű sebességének különbsége

Munkáikban javaslatot dolgoztak ki az IDM modell pontosabb működésére és az IDM módosításaival foglalkoznak a gépjárművezető biztonsága és a jármű valós képességének figyelembe vételével. Ez alapján, az IDM modell már nagyobb teljesítményt nyújt a vezető biztonsága érdekében, a valós reakciókat követve az ütközés közeli kritikus helyzetekben. Az intelligens járművezető modell módosítását és korszerű működését mutatja be, a jármű valós képességével kapcsolatban. A modellezés és kutatási munka komplex területet ölel fel, és egyaránt tartalmazza a mikroszkopikus és makroszkopikus modellezés megközelítéseit is, Derbel, O., Péter, T., Mourllion B., & Basset M.

(2017). A bonyolult makroszkopikus forgalmi környezetet a nagyméretű hálózati modell generálja, Péter T, and Bokor J (2010), Péter and Bokor J (2011), Péter, T (2012), amelyen a meghatározott trajektóriák szakaszain a mikroszkopikus forgalmi modell szimuláció biztosítja az egyedi járműmozgást a forgalomban. Ennek a mikroszkopikus modellnek azonban ugyancsak megfelelően kell reprodukálnia a dinamikus közlekedési folyamatokat és szintén validáltnak kell lennie. Ennek megfelelően, Munkánk ebben a szakaszában támaszkodunk a Treiber et al. 2000a. 2000b. Derbel, O., Péter, T., Mourllion B.,& Basset M. (2017) Intelligens Driver Model kutatásokra és fejlesztésekre, amelynél v_i az i-ik jármű kívánt sebessége.

$$\langle \underline{\underline{A}} \rangle^{-1} \ddot{x}(t) + \langle \underline{\underline{V}} \rangle^{-1} \underline{f_1}(\dot{x}(t)) + \langle \underline{\underline{S}} \rangle \underline{f_2}(x(t)) = \underline{1} \tag{3}$$

$$\langle \underline{\underline{A}} \rangle^{-1} = \left\langle \frac{1}{a_1}, \frac{1}{a_2}, ..., \frac{1}{a_n} \right\rangle ; \langle \underline{\underline{V}} \rangle^{-1} = \left\langle \frac{1}{v_1^4}, \frac{1}{v_2^4}, ..., \frac{1}{v_n^4} \right\rangle ; \langle \underline{\underline{S}} \rangle = \langle s_1^2, s_2^2, ..., s_n^2 \rangle$$

$$s_i = s_{0i} = const, \text{ vagy: } s_i = s_i(\dot{x}_{i-1}, \dot{x}_i) \text{ (i=1,2,…,}n\text{).}$$

$$\underline{f_1}(\dot{x}(t)) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1^4 \\ \dot{x}_2^4 \\ ... \\ \dot{x}_n^4 \end{bmatrix}, \ \underline{f_2}(x(t)) = \begin{bmatrix} \frac{1}{(x_0 - x_1)^2} \\ \frac{1}{(x_1 - x_2)^2} \\ ... \\ \frac{1}{(x_{n-1} - x_n)^2} \end{bmatrix}, \ \underline{1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ ... \\ 1 \end{bmatrix}$$

2. AZ UNIVERZÁLIS IDM MODELL

Az Univerzális IDM modellt az alábbi módon definiáljuk: Tekintsük a klasszikus IDM modell olyan általánosítását, amelynél egy hálózati szektorokon az i=1,2,...,n járműelemek szabad előzési stratégiákat valósítanak meg $c_i(t)$ irányító jelek alkalmazásával.

Ennek megfelelően a modell figyelembe veszi egy-egy szektoron a valóságos közlekedésnek megfelelően, azokat az előzési manőverezéseket is amelyek akkor lépnek, amikor az adott IDM csoportban lassúbb haladású, vagy kevésbé dinamikus paraméterekkel rendelkező járművek haladnak előttük.

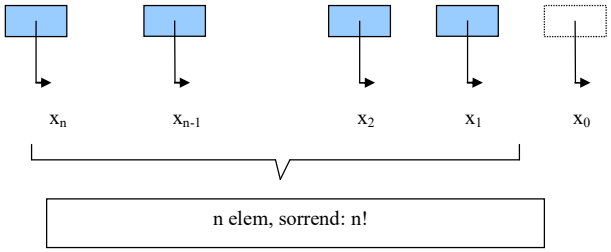
A modell további fontos alkalmazása a járműelemek hálózati tartományon történő átvezetéséhez kapcsolódik. Ezzel kapcsolatos fontos feladat, a minden járműre vonatkozó dinamikusak útvonalkód megadása. Ezt alkalmazva, a matematikai modellünkben az egyes szektorokról más szektorokra történő átmeneteknél, a szektorok végein, minden egyedi jármű, a dinamikusak útvonalkódja alapján a számára meghatározott kapcsolati mátrixból a megfelelő átmeneti kódot kapja meg, a következő szektorra lépést kijelölve.

A folyamat optimálása két szinten történik párhuzamosan. *Első szint a tartományon működik*, a minden jármű igényét figyelembe vevő folyamat-optimáló makroszkopikus, modell-prediktív módszer. Ennél a fő intézkedések a forgalomirányító lámpák forgalomfüggő programjainak folyamatos optimális beállításai, a változtatható jelzésképű táblák állapotfüggő optimális beállításai a sebességhatároknál, de a későbbi fejlesztéseknél a változtatható forgalmi irányok beállításai is megtörténhet!

A másodi szintet jelenti a mikroszkopikus modell irányítása az IDM modellek járműelemeinél. Ezeknél folyamatosan irányíthatók a dinamikusak útvonalkódok az optimális célba érési időket figyelembe véve.

3. AZ IDM MODELL ÉS A HÁLÓZATI TARTOMÁNY KAPCSOLATA

Egy adott jármű esetében, a sebességet és a követési távolságot a vezető határozza meg. A döntése egyaránt függ a saját észleléseitől és a járműve által, a fizikai környezetből küldött jelzésektől. Mindezeknek meghatározó a hatása van a hálózati forgalomra. Ennek megfelelően, az út minősége, a meteorológiai, látási viszonyokból eredő fizikai hatások az adott járműsűrűségnél, meghatároznak egy választható sebességtartományt. Az adott szakaszon egy irányban haladó jármű – jármű hatásokból eredő dinamikus kapcsolatok forgalomi leírására alkalmazható az IDM modell.
Ugyanakkor, az IDM modellcsoport mozgásának dinamikája sem öntörvényű, ezt a nagyméretű hálózaton, illetve hálózati szektorokon kialakuló vezérlő sebességek determinálják. Lelassulnak, ha torlódás lép fel, megállnak, ha a forgalomirányító lámpa pirosra vált, de a reakciókésedelmi időket követően felgyorsulnak a megengedett legnagyobb sebességhatárig, ha előttük az útszakasz szabad. **Ezt jelöli a *2. ábrán* az x_0(t) vezérlő függvény, amelyet az egyes trajektóriáknál a nagyméretű makroszkopikus hálózati folyamatok határoznak meg.**



2. ábra az $x_0(t)$ vezérlő függvény

Ehhez kapcsolódik a bevezetőben tárgyalt $c_i(t)$ mikro irányítás, amely figyelembe veszi az egyes járművek tulajdonságait, de általa figyelembe lehet venni a megkülönböztetett járművek igényeit is, szintén az irányítások alkalmazásával. A fentiek alapján, minden szektoron folytonosan újra szerveződnek az IDM csoportok is. Ennek alapján fontos kiemelni, hogy minden szektoron a valóságnak megfelelően:

1. Dinamikusan változik a járműszám
2. Dinamikusan változik a járművek sorrendje
3. Dinamikusan változik a járművek összetétele
4. A rendszerben lévő járművek paramétereinek megfelelően, a valóságos feltételeknek megfelelő előzési manőverezések történnek
5. Irányíthatók ezek a folyamatok a megkülönböztetett járművek és a forgalmi helyzet igényeinek megfelelően

A modell alkalmazásával:

1. Minden szektor önállóan kezeli a folyamatosan a rá - és kiáramló járművek felvételét, ill., törlését a rajta működő IDM - modellből.
2. Minden szektor önállóan kezeli és irányítja a rajta működő aktuális IDM rendszernél az előzéseket az input - output áramlást és figyelembe veszi a hálózati forgalomirányításból következő szabályozásokat és tiltásokat is.

4. A MODELLEZÉS SORÁN KÖVETETT MATEMATIKAI MEGKÖZELÍTÉS ÉS ELJÁRÁS

A modellben egy-egy fix kiindulási alap pozíciót ír le a **p** vektor, amelynél *pl.* n=3 esetén a következő, az alapállapot: p[1]:=1, p[2]:=2, p[3]:=3,. A haladás során, természetesen a pozíciók változhatnak és a p_i vektor *k* értéke, tehát a: p_i = k azt jelenti, hogy a hogy az i-ik pozíción a sorban, a k-ik jármű van az adott időpontban, (i=1,2,…,n; k=1,2,…,n;). A modellben a két jármű közötti közvetlen kapcsolat fennállását egy általunk definiált **U** mátrix elemeinek értékei határozzák meg. A kapcsolat fennállását az 1 érték, azt pedig, hogy nincs köztük kapcsolat a 0 érték határozza meg. Ezeket a kapcsolatokat tehát, az u[i,k] mátrix tartalmazza, (i=1,2,…,n; k=1,2,…,n;), amelynek minden i-ik sorában csak az u[i,p[i]] = 1**,** az-az u[i,k] = 1 az i-ik sor többi eleme pedig zérus, (i=1,2,…,n).
A differenciálegyenlet-rendszer modellben, az u[i,k] mátrix elemit az **A** és **B** mátrixokban használjuk fel. Az **A** mátrix veszi figyelembe az i-ik jármű legnagyobb a_i gyorsulását, a **B** mátrix pedig az i-ik jármű kívánt v_i sebességét veszi figyelembe.
A differenciálegyenlet-rendszer modellben az ***f*** vektorban használjuk fel a k[j,p,i] 3 dimenziós mátrixot, amely a két jármű között, a távolságok négyzeteinek hányadosainál fennálló kapcsolatokat, vagy a kapcsolatok mentességét határozza meg

A differenciálegyenlet-rendszer első egyenletnél a k[j,p,i] mátrix esetében, csak a (4) esetben 1 az érték:

$$k[0,p[1],1]=1 \tag{4}$$

p[1] határozza meg ugyanis, hogy melyik k-ik jármű halad leg elől és követi az $x_0(t)$ vezérjelet. Ennek megfelelően a szummában szereplő többi elem értéke zérus.
Vizsgálva tovább a k[j,p,i] mátrix elemeinek értékeit, a differenciálegyenlet-rendszer második egyenletnél, csak a p_1 és p_2 pozíciókon elhelyezkedő sorszámú járműveknél lehet 1 az érték, mégpedig, az alábbi feltételek szerint:

$$\begin{aligned} &\text{if } ((p[1]<p[2])) \text{ then } k[p[1],p[2],2]:=1; \\ &\text{if } ((p[1]>p[2])) \text{ then } k[p[2],p[1],2]:=1; \end{aligned} \tag{5}$$

a szummában szereplő többi elem zérus, és így tovább, …, A differenciálegyenlet-rendszer utolsó sorában csak a p_{n-1} és p_n pozíciókon elhelyezkedő sorszámú járműveknél lehet 1 az érték, mégpedig:

$$\begin{aligned} &\text{if } ((p[n-1]<p[n])) \text{ then } k[p[n-1],p[n],n]:=1; \\ &\text{if } ((p[n-1]>p[n])) \text{ then } k[p[n],p[n-1],n]:=1 \end{aligned} \tag{6}$$

a szummában szereplő többi elem zérus.

Ennek a módszernek az egyik eredménye az, hogy egyetlen modellben összefoglalható az *n* elemű járműcsoport összes permutációjához tartozó IDM modell. Ez alapján az u[i,k] és k[j,p,i] mátrixok elemeinek megfelelő beállításával felírható bármely járműsorrendhez tartozó IDM modell. Ez a modell-definíció tehát, a véglegesen kialakult sorrendek komplex modellezését teszi lehetővé egyetlen modell alapján.
A módszer másik fontos eredménye az, hogy egyetlen modellben foglalható össze az *n* elemű járműcsoportban fellépő előzési folyamatok modellezése is. Ha tehát, akár egy tetszőlegesen megtervezett, vagy optimális $c_i(t)$ előzési stratégiát valósítanak meg a járművek, akkor az előzési folyamatban már több kapcsolat is fellép. Ekkor, egyes kapcsolatok nem változnak meg és az u[i,k], k[j,p,i] mátrixok ezekre vonatkozó elemei konstans 0, vagy 1 értékeken maradnak. Más kapcsolatok viszont, folyamatosan erősödnek meg, illetve szűnnek meg az előzés során. Az u[i,k] és k[j,p,i] mátrixok ezekre vonatkozó elemei viszont már nem konstansok! Erősödő kapcsolatoknál 0-ról folyamatosa 1-re változnak, a gyengülő kapcsolatok viszont folyamatosan 1-ről, 0-ra változnak az adott előzési folyamat megkezdése és befejezése során.

Összefoglalva: a két különböző járműsorrendre vonatkozó P_j, és P_k permutációk esetében a kiindulási állapotban az u[i,k] -nál és k[j,p,i] -nál felvett konstansok nem változnak meg azoknál a járműveknél, amelyeknek egymáshoz viszonyított pozíciói nem változik meg a P_k permutáció bekövetkeztekor.

Azokat a kapcsolatokat tekintve, amelyek a P_j, permutációról a P_k-ra történő átmenet során megszűnnek, a hozzájuk tartozó u[i,k] és k[j,p,i] kapcsolati értékek folytonos függvények mentén, aszimptotikusan 1-ről 0-ra változnak a P_k permutációra történő átmenet során
Ezzel párhuzamosan, az új P_k, pozíciókhoz tartozó kapcsolatok folyamatosa épülnek fel és a hozzájuk tartozó u[i,k] és k[j,p,i] kapcsolati értékek folytonos függvények mentén, aszimptotikusan 0-ról 1-re változnak.

5. AZ UNIVERZÁLIS IDM MODELL DIFFERENCIÁLEGYENLET-RENDSZERE N JÁRMŰ ESETÉN

A követelményeket az alábbi mátrix- differenciálegyenlet-rendszer írja le:

$$A \cdot \ddot{x} + B \cdot \dot{x}^4 + f(x) = e(t) \qquad (7)$$

Ahol, a fenti mátrix differenciálegyenlet-rendszer bal oldalán, a szorzatok oszlopvektorok. Az ***A*** és ***B*** mátrixok elemei tartalmazzák a fentiekben tárgyalt $u_{i,j}$ mátrixelemeket, az alábbi módon: A= [$u_{i,j}1/a_j$]; B= [$u_{i,j}$ $1/v_j^{\,4}$]

A matematikában ez a **Hadamard-szorzat**, v. más néven **Schur-szorzat** amely a két mátrix azonos helyen álló elemeinek szorzata, amelynek eredménye a két mátrixal azonos dimenziójú mátrix. Nevét a francia Jacques Hadamard és a német Issai Schur után kapta. Az ***f*** vektor pedig a $k_{j,p,i}$ mátrixelemeket tartalmazza.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{u_{11}}{a_1} & \frac{u_{12}}{a_2} & \dots & \frac{u_{1n}}{a_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \frac{u_{ij}}{a_j} & \dots \\ \frac{u_{n1}}{a_1} & \frac{u_{n2}}{a_2} & \dots & \frac{u_{nn}}{a_n} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{u_{11}}{v_1^{\,4}} & \frac{u_{12}}{v_2^{\,4}} & \dots & \frac{u_{1n}}{v_n^{\,4}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \frac{u_{ij}}{v_j^{\,4}} & \dots \\ \frac{u_{n1}}{v_1^{\,4}} & \frac{u_{n2}}{v_2^{\,4}} & \dots & \frac{u_{nn}}{v_n^{\,4}} \end{bmatrix}; f = \begin{bmatrix} \sum_{p=1}^{n} \frac{k_{0,p,1} \cdot s_{0,p}^{\;2}}{(x_0 - x_p - l_p)^2} \\ \dots \\ \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{p=j+1}^{n} \frac{k_{j,p,i} \cdot s_{j,p}^{\;2}}{(x_j - x_p - l_p)^2} \\ \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{p=j+1}^{n} \frac{k_{j,p,n} \cdot s_{j,p}^{\;2}}{(x_j - x_p - l_p)^2} \end{bmatrix}$$

$x \in \Re^n$ a jármű pozíciók állapotjellemző vektora, n = járműszám

$\dot{x} \in \Re^n$, $\ddot{x} \in \Re^n$ a jármű sebességek és gyorsulások vektora

$A, B \in \Re^{nxn}$ $f, e \in \Re^n$

Tömörebb felírásmódban, az alábbiak szerint foglalhatók össze az egyenletrendszerben szereplő mátrixok és vektor:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{u_{ij}}{a_j} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{u_{ij}}{v_j^{\,4}} \end{bmatrix} f = \begin{bmatrix} f_i \end{bmatrix}$$

$$(i=1, 2,\dots,n; j=1, 2,\dots,n)$$

i=1-re:

$$\sum_{p=1}^{n} \frac{k_{0,p,1} \cdot s_{0,p}^{\;2}}{(x_0 - x_p - 1_p)^2}$$

i>1-re:

$$f_i = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{p=j+1}^{n} \frac{k_{j,p,i} \cdot s_{j,p}^{\;2}}{(x_j - x_p - 1_p)^2}$$

Az összes IDM modell száma n! Tekintsük példaként, az összes sorrendet tartalmazó közös differenciálegyenlet-rendszert az n=3 esetén:

$$\begin{bmatrix} \frac{u_{1,1}}{a_1} & \frac{u_{1,2}}{a_2} & \frac{u_{1,3}}{a_3} \\ \frac{u_{2,1}}{a_1} & \frac{u_{2,2}}{a_2} & \frac{u_{2,3}}{a_3} \\ \frac{u_{3,1}}{a_1} & \frac{u_{3,2}}{a_2} & \frac{u_{3,3}}{a_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d^2}{dt^2} x1(t) \\ \frac{d^2}{dt^2} x2(t) \\ \frac{d^2}{dt^2} x3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_{1,1}}{v_1^4} & \frac{u_{1,2}}{v_2^4} & \frac{u_{1,3}}{v_3^4} \\ \frac{u_{2,1}}{v_1^4} & \frac{u_{2,2}}{v_2^4} & \frac{u_{2,3}}{v_3^4} \\ \frac{u_{3,1}}{v_1^4} & \frac{u_{3,2}}{v_2^4} & \frac{u_{3,3}}{v_3^4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left(\frac{d}{dt} x1(t)\right)^4 \\ \left(\frac{d}{dt} x2(t)\right)^4 \\ \left(\frac{d}{dt} x3(t)\right)^4 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{k_{0,1,1}\, s_{0,1}^2}{(x_0 - x_1 - l_1)^2} + \frac{k_{0,2,1}\, s_{0,2}^2}{(x_0 - x_2 - l_2)^2} + \frac{k_{0,3,1}\, s_{0,3}^2}{(x_0 - x_3 - l_3)^2} \\ \frac{k_{1,2,2}\, s_{1,2}^2}{(x_1 - x_2 - l_2)^2} + \frac{k_{1,3,2}\, s_{1,3}^2}{(x_1 - x_3 - l_3)^2} + \frac{k_{2,3,2}\, s_{2,3}^2}{(x_2 - x_3 - l_3)^2} \\ \frac{k_{1,2,3}\, s_{1,2}^2}{(x_1 - x_2 - l_2)^2} + \frac{k_{1,3,3}\, s_{1,3}^2}{(x_1 - x_3 - l_3)^2} + \frac{k_{2,3,3}\, s_{2,3}^2}{(x_2 - x_3 - l_3)^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e(t) \\ e(t) \\ e(t) \end{bmatrix} \tag{8}$$

Az egyes kiindulási eseteket tekintve összesen hat sorrend alakulhat ki. Az alábbiakban írtuk fel az összes esetet, amelyet computer-algebrai módszerrel automatikusan lehet elő állítani.

1. eset: amelynél az egyes járművek sorrendje: 1, 2, 3, ezt tartalmazza a p vektor:p_1

$$p_1=1,\ p_2=2,\ p_3=3$$

Ekkor, a számított $u_{i,j}$ értékek: u[i,p[i]]:=1; (i=1,2,3) esetekben az alábbi:

$$u_{1,1}=1,\ u_{2,2}=1,\ u_{3,3}=1$$

Az alábbi algoritmus alapján számítjuk a **k**[j,p,i] értékek k[0,p[1],1]:=1; esetekben:

```
if ((p[1]<p[2])) then k[p[1],p[2],2]:=1; end; if ((p[1]>p[2])) then k[p[2],p[1],2]:=1; end if;
if ((p[2]<p[3])) then k[p[2],p[3],3]:=1; end; if ((p[2]>p[3])) then k[p[3],p[2],3]:=1; end if;
```
(9)

Az algoritmus alkalmazásával számított $k_{i,j,l}$ értékek az alábbiak:

$$k_{0,1,1}=1,\ k_{1,2,2}=1,\ k_{2,3,3}=1$$

A fentiek alapján, az 1. esetben (10) szerint meghatároztuk az alábbi végleges differenciálegyenlet-rendszert:

$$\begin{bmatrix} \frac{\frac{d^2}{dt^2} x1(t)}{a_1} \\ \frac{\frac{d^2}{dt^2} x2(t)}{a_2} \\ \frac{\frac{d^2}{dt^2} x3(t)}{a_3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\left(\frac{d}{dt} x1(t)\right)^4}{v_1^4} \\ \frac{\left(\frac{d}{dt} x2(t)\right)^4}{v_2^4} \\ \frac{\left(\frac{d}{dt} x3(t)\right)^4}{v_3^4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{s_{0,1}^2}{(x_0 - x_1 - l_1)^2} \\ \frac{s_{1,2}^2}{(x_1 - x_2 - l_2)^2} \\ \frac{s_{2,3}^2}{(x_2 - x_3 - l_3)^2} \end{bmatrix} = \boldsymbol{e}(t) \tag{10}$$

A fenti algoritmust követve, a computer-algebrai módszer automatikusan szolgáltatja a további eredményeket.

2. eset: az egyes járművek sorrendje sorrend: 1, 3, 2
A számított $u_{i,j}$ és $k_{i,j,l}$ értékek:

$$p_1=1,\ p_2=3,\ p_3=2$$

$$u_{1,1}=1,\ u_{2,3}=1,\ u_{3,2}=1$$

$$k_{0,1,1}=1,\ k_{1,3,2}=1,\ k_{2,3,3}=1$$

A 2. végleges esetben az alábbi a differenciálegyenlet-rendszer:

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}x1(t)}{a_1} \\ \dfrac{\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}x3(t)}{a_3} \\ \dfrac{\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}x2(t)}{a_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}x1(t)\right)^4}{v_1^4} \\ \dfrac{\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}x3(t)\right)^4}{v_3^4} \\ \dfrac{\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}x2(t)\right)^4}{v_2^4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{s_{0,1}^2}{(x_0-x_1-l_1)^2} \\ \dfrac{s_{1,3}^2}{(x_1-x_3-l_3)^2} \\ \dfrac{s_{2,3}^2}{(x_2-x_3-l_3)^2} \end{bmatrix} = \boldsymbol{e}(t) \tag{11}$$

3. eset: az egyes járművek sorrendje sorrend: 2, 1, 3

A számított $u_{i,j}$ és $k_{i,j,l}$ értékek:

$$p_1=2,\ p_2=1,\ p_3=3$$

$$u_{1,2}=1,\ u_{2,1}=1,\ u_{3,3}=1$$

$$k_{0,2,1}=1,\ k_{1,2,2}=1,\ k_{1,3,3}=1$$

A 3. végleges esetben az alábbi a differenciálegyenlet-rendszer:

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}x2(t)}{a_2} \\ \dfrac{\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}x1(t)}{a_1} \\ \dfrac{\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}x3(t)}{a_3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}x2(t)\right)^4}{v_2^4} \\ \dfrac{\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}x1(t)\right)^4}{v_1^4} \\ \dfrac{\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}x3(t)\right)^4}{v_3^4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{s_{0,2}^2}{(x_0-x_2-l_2)^2} \\ \dfrac{s_{1,2}^2}{(x_1-x_2-l_2)^2} \\ \dfrac{s_{1,3}^2}{(x_1-x_3-l_3)^2} \end{bmatrix} = \boldsymbol{e}(t) \tag{12}$$

4. eset: az egyes járművek sorrendje sorrend: 2, 3, 1
A számított $u_{i,j}$ és $k_{i,j,l}$ értékek:

$$p_1=2,\ p_2=3,\ p_3=1$$

$$u_{1,2}=1,\ u_{2,3}=1,\ u_{3,1}=1$$

$$k_{0,2,1}=1,\ k_{2,3,2}=1,\ k_{1,3,3}=1$$

A 4. végleges esetben az alábbi a differenciálegyenlet-rendszer:

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\frac{d^2}{dt^2}x2(t)}{a_2} \\ \dfrac{\frac{d^2}{dt^2}x3(t)}{a_3} \\ \dfrac{\frac{d^2}{dt^2}x1(t)}{a_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{\left(\frac{d}{dt}x2(t)\right)^4}{v_2^4} \\ \dfrac{\left(\frac{d}{dt}x3(t)\right)^4}{v_3^4} \\ \dfrac{\left(\frac{d}{dt}x1(t)\right)^4}{v_1^4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{s_{0,2}^2}{(x_0 - x_2 - l_2)^2} \\ \dfrac{s_{2,3}^2}{(x_2 - x_3 - l_3)^2} \\ \dfrac{s_{1,3}^2}{(x_1 - x_3 - l_3)^2} \end{bmatrix} = \boldsymbol{e}(t) \tag{13}$$

5. eset: az egyes járművek sorrendje sorrend: 3, 1, 2
A számított $u_{i,j}$ és $k_{i,j,l}$ értékek:

$$p_1=3,\ p_2=1,\ p_3=2$$

$$u_{1,3}=1,\ u_{2,1}=1,\ u_{3,2}=1$$

$$k_{0,3,1}=1,\ k_{1,3,2}=1,\ k_{1,2,3}=1$$

Az 5. végleges esetben az alábbi a differenciálegyenlet-rendszer:

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\frac{d^2}{dt^2}x3(t)}{a_3} \\ \dfrac{\frac{d^2}{dt^2}x1(t)}{a_1} \\ \dfrac{\frac{d^2}{dt^2}x2(t)}{a_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{\left(\frac{d}{dt}x3(t)\right)^4}{v_3^4} \\ \dfrac{\left(\frac{d}{dt}x1(t)\right)^4}{v_1^4} \\ \dfrac{\left(\frac{d}{dt}x2(t)\right)^4}{v_2^4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{s_{0,3}^2}{(x_0 - x_3 - l_3)^2} \\ \dfrac{s_{1,3}^2}{(x_1 - x_3 - l_3)^2} \\ \dfrac{s_{1,2}^2}{(x_1 - x_2 - l_2)^2} \end{bmatrix} = \boldsymbol{e}(t) \tag{14}$$

6. eset: az egyes járművek sorrendje sorrend: 3, 2, 1
A számított $u_{i,j}$ és $k_{i,j,l}$ értékek:

$$p_1=3,\ p_2=2,\ p_3=1$$

$$u_{1,3}=1,\ u_{2,2}=1,\ u_{3,1}=1$$

$$k_{0,3,1}=1,\ k_{2,3,2}=1,\ k_{1,2,3}=1$$

A 6. végleges esetben az alábbi a differenciálegyenlet-rendszer:

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\frac{d^2}{dt^2}x3(t)}{a_3} \\ \dfrac{\frac{d^2}{dt^2}x2(t)}{a_2} \\ \dfrac{\frac{d^2}{dt^2}x1(t)}{a_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{\left(\frac{d}{dt}x3(t)\right)^4}{v_3^4} \\ \dfrac{\left(\frac{d}{dt}x2(t)\right)^4}{v_2^4} \\ \dfrac{\left(\frac{d}{dt}x1(t)\right)^4}{v_1^4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{s_{0,3}^2}{(x_0 - x_3 - l_3)^2} \\ \dfrac{s_{2,3}^2}{(x_2 - x_3 - l_3)^2} \\ \dfrac{s_{1,2}^2}{(x_1 - x_2 - l_2)^2} \end{bmatrix} = \boldsymbol{e}(t) \tag{15}$$

A fentiek tehát, a már kialakult és egy időtartamban állandó sorrendet írnak le. Ha viszont a P_j, és P_k permutációk között, valamely $t \in [0,T]$ időintervallumban változó átmeneti állapotok lépnek fel, akkor ennek során a korábbi jármű-jármű kapcsolatok folyamatosan gyengülnek, az új P_k kapcsolatok pedig megerősödnek. Ez a hatás vehető figyelembe az alábbiak szerint a **p, u** és **k** vektoroknál a T ideig tartó új alakzat kialakulásánál

$$\mathbf{p}_j = \mathbf{p}_j(1 - t/T);\ \mathbf{p}_k = \mathbf{p}_k(t/T);$$

$$\mathbf{u}_j = \mathbf{u}_j(1 - t/T);\ \mathbf{u}_k = \mathbf{u}_k(t/T); \tag{16}$$

$$\mathbf{k}_j = \mathbf{k}_j(1 - t/T);\ \mathbf{k}_k = \mathbf{k}_k(t/T);$$

Ennek szükségességét az indokolja, hogy az egy sávon haladó járművek sorrendje a valóságban megváltozik.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott Univerzális IDM modell egyetlen matematikai modellbe integrálja a járművek által végrehajtható összes lehetséges előzési manővereket. Ez írja le a valóságos folyamatot és fontos az optimális előrehaladás biztosításánál a csoportban haladó lassú járművek megelőzésekor.
A modell ennek megfelelően n! sorrendet vesz figyelembe és a probléma leírásánál elvben, bármely P_j járműcsoport permutációt követhet bármely P_k permutáció, figyelembe véve a két permutáció közötti valóságos és dinamikus átmeneti állapotokat.
Az Univerzális IDM – modell matematikai modelljében fontos szerepet játszanak az átmeneteket irányító $c_i(t)$ függvények. Ezek biztosítják azt, hogy egyetlen differenciálegyenlet-rendszer modellezze a folyamatosan átalakuló rendszereket!
Az optimális előzési stratégiákat is a $c_i(t)$ időfüggvényekkel határozzuk meg. Ez tovább fejleszthető irányítási terület. Az elvek megfogalmazása alapján ugyanis fontos, hogy milyen célokat alkalmazzunk, az adott forgalmi körülmények közepette Ezek lehetnek: optimális átjutás a kereszteződéseken, optimális energiafogyasztás a forgalmi folyamatoknál, ezzel kapcsolatos optimális CO2 kibocsájtás, optimális környezetterhelés, konvojok tartományon történő gyors átvezetése.
A matematikai vizsgálat során, egy sávon folyó forgalmat írtunk le és ez továbbfejleszthető a két, vagy több párhuzamos rendszer együttes vizsgálatára is, amely lehetővé teszi, a párhuzamos sávok közötti többirányú dinamikus járműátadási kapcsolatok optimálását is.
Az IDM rendszer paraméterei általánosabb megközelítésben közlekedési rendszerparaméterek. Pontosabban megfogalmazva járműdinamikai paraméterek, vezetői képességek és környezeti tényezők határozzák meg őket. Az IDM rendszer paramétereinek pontos ismerete, a közlekedési folyamatok sajátosságai és hektikussága miatt bizonytalanságokat hordozhatnak magukban.
Az IDM modell járműdinamikai paramétereit vizsgálhatjuk a matematikai modell alkalmasan megválasztott átírásával. A megválasztott modellszerkezet alkalmas a többtömegű lengéstani dinamikai modell analízisére, tisztán lengéstani fogalmak alkalmazásával is.
A dinamikai tulajdonságok ily módon történő további elemzésére hasznos újabb összefüggések feltárásához vezetet ezen a területen is. Ez alapján fontos információkhoz juthatunk az összetettebb IDM rendszer paraméter-struktúrájával és forgalomban történő optimálásával kapcsoltban is, T., Péter; I., Lakatos (2019). A vizsgálat az egyes megadott gyorsítási képességek esetében, figyelembe veszi a követendő jármű sebességét és meghatározza az optimális sebességmaximumot és az optimális távolságot is. Ez, egyaránt kihat a sebesség túllendülés mértékére és a stabil sebességállapotra történő beállás időpontjára, továbbá a mozgási energia optimálására is. Mindezek az optimális tulajdonságok kihatnak a forgalomban jelenlévő többi szereplőre is, valamint a kibocsájtásra és a forgalmi zajra is. Ez elősegíti a simább, zökkenőmentes forgalmi folyamatokat a járműcsoportoknál és az önvezető járműveknél a forgalomfüggő optimális döntések automatizálását az optimális paraméterek automatikus beállításával.

IRODALOMJEGYZÉK

Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2012). Modified intelligent driver model, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 40(2): 53–60. https://doi.org/10.3311/pp.tr.2012-2.02

Derbel, O.; Peter, T.; Zebiri, H.; Mourllion, B.; Basset, M. (2013). Modified intelligent driver model for driver safety and traffic stability improvement, *IFAC Proceedings Volumes* 46(21): 744–749. https://doi.org/10.3182/20130904-4-JP-2042.00132

Derbel, O., Péter, T., Mourllion B., & Basset M. (2017), Generalized Velocity–Density Model based on microscopic traffic simulation, Transport, DOI: 10.3846/16484142.2017.1292950 To link to this article: http://dx.doi.org/10.3846/16484142.2017.1292950 ISSN: 1648-4142 (Print) 1648-3480 (Online) Journal homepage: http://www.tandfonline.com/loi/tran20

Jerath, K., (2010). Impact of adaptive cruise control on the formation of self-organized traffic jams on highway. Master's thesis, The Pennsylvania State University The Graduate School. Department of Mechanical and Nuclear Engineering.

Kesting, A., Treiber, M., Helbing, D., (2008). Agents for traffic simulation. Physics and Society 11, 325–356.

T., Péter; I., Lakatos (2019). Vehicle dynamic-based approach for the optimization of traffic parameters of the Intelligent Driver Model (IDM) and for the support of autonomous vehicles' driving ability ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 16 : 3 pp. 121-142. , 22 p. (2019)

Péter T, and Bokor J (2010) Research for the modelling and control of traffic, In: Scientific Society for Mechanical Engineering ,33rd Fisita-World Automotive Congress: Proceedings, Budapest, Magyarország, 2010.05.30-2010.06.04. Budapest: GTE, 2010. pp. 66-73. (ISBN:978-963-9058-28-6)

Péter and Bokor J (2011) 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) 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

Treiber, M., Helbing, D., (2002). Realistische mikrosimulation von straenverkehr mit einem einfachen modell. In: Symposium "Simulationstechnik ASIM.

Treiber, M.; Hennecke, A.; Helbing, D. (2000a). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations, *Physical Review E* 62(2): 1805–1824. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.1805

Treiber, M.; Hennecke, A.; Helbing, D. (2000b). Microscopic simulation of congested traffic, in D. Helbing, H. J. Herrmann, M. Schreckenberg, D. E. Wolf (Eds.). *Traffic and Granular Flow'99: Social, Traffic, and Granular Dynamics*, 365–376. https://doi.org/10.1007/978-3-642-59751-0_36

Treiber, M., Hennecke, A., Helbing, D., (2004). Microscopic simulation of congested traffic. Physical Review E 62, 1805–1824

Treiber, M., Hennecke, A., Helbing, D., (2006). Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models. Physica A 360, 71–88.

Treiber, M., Kesting, A., (2011). Evidence of convective instability in congested traffic flow: A systematic empirical and theoretical investigation. Procedia Social and Behavioral Sciences 17, 698–716.