Járműdinamikai bázisú megközelítés, az Intelligens Vezetői Modell (IDM) forgalmi paramétereinek optimálásához, az autonóm járművek vezetés-támogatására

Péter Tamás.*, Háry András, Szauter Ferenc***, Lakatos István******
* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (e-mail: peter.tamas@mail.bme.hu)
** Autóipari Próbapálya Zala Kft. (e-mail: andras.hary@apnb.hu)
*** Győri Széchényi István Egyetem (e-mail: (e-mail: szauter@sze.hu)
**** Győri Széchényi István Egyetem (e-mail: drlakatosi@gmail.com)

Abstract: A kutatás, a jármű-mechanika körébe tartozó optimális redukált dinamikai jellemzők alapján határozza meg az Intelligens Vezetői Modellnél (IDM) alkalmazott ideális forgalmi modell-paraméterek halmazát, 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, járművek automatikus irányítását az egyes járműcsoportokban. *Keywords:* transport processes; smart city

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 fogyasztás és zajszint csökkentést eredményez és e-mellett a hagyományos járműveknél 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, EFOP-3.6.2-16-2017-00016.

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 immár jelentős fizikai, dinamikai ismeretek halmozódtak fel.

Elmondható, hogy az IDM modellek elméleti megalapozása és alkalmazása igen jól áll, ugyanakkor, a valós közlekedési folyamatok bonyolultsága 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, vagy robotpilóta esetén, a feldolgozandó információkat elemezzük. Hasonlóan, nagyon összetett a rendszer, ha csupán, a felszíni közlekedés folyamatainak az egészét tekintjük, valamely nagyméretű hálózaton. 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, (amely ember/robotpilóta - géprendszerek sokasága), másrészt, statikus és dinamikus közlekedési hálózati elemek sokaságából 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.

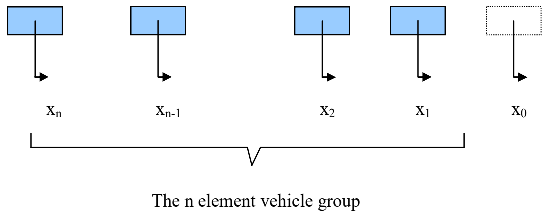
A fentiekhez kapcsolódva, az anyagunkban röviden áttekintjük IDM forgalmi alkalmazását, valamint az IDM modell és a nagyméretű hálózatok kapcsolatát. Vizsgáljuk a járművek forgalmi hosszdinamikai tulajdonságait a vezér járműhöz történő felzárkózás során.

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 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.

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.



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

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), vizsgálataikban ezt az alábbi (1) differenciálegyenlet-rendszerben foglalták össze és 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 kívánt távolságkülönbség tartása (i=1,2 ,... ,*n*)

$$\left\langle \underline{\underline{A}} \right\rangle^{-1} \ddot{\underline{x}}(t) + \left\langle \underline{\underline{V}} \right\rangle^{-1} \underline{f}_1(\dot{x}(t)) + \left\langle \underline{\underline{S}} \right\rangle \underline{f}_2(x(t)) = \underline{1} \qquad (1)$$

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

$$\left\langle \underline{\underline{S}} \right\rangle = \left\langle s_1^2, s_2^2, \ldots, s_n^2 \right\rangle$$

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

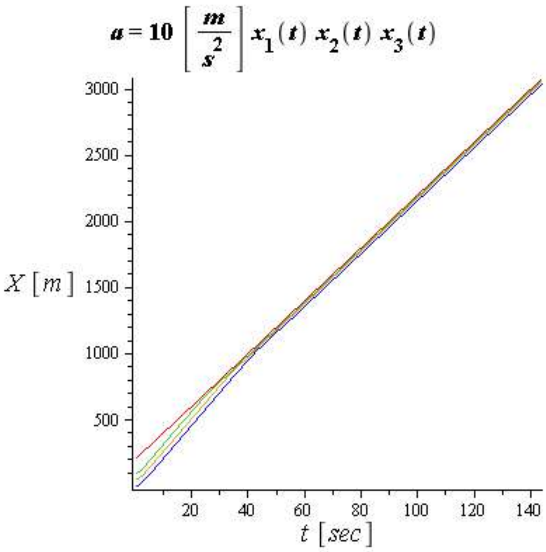
$$\underline{f}_1(\dot{x}(t)) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1^4 \\ \dot{x}_2^4 \\ \ldots \\ \dot{x}_n^4 \end{bmatrix}, \ \underline{f}_2(x(t)) = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{(x_0 - x_1)^2} \\ \dfrac{1}{(x_1 - x_2)^2} \\ \ldots \\ \dfrac{1}{(x_{n-1} - x_n)^2} \end{bmatrix}, \ \underline{1} = \begin{bmatrix}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

3. AZ IDM MODELL ÉS A NAGYMÉRETŰ HÁLÓZAT KAPCSOLATA

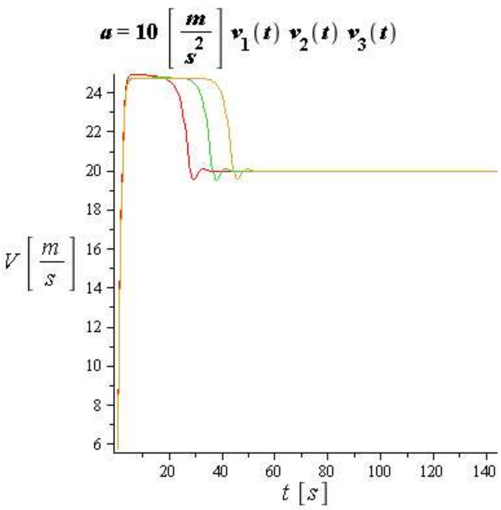
Egy adott jármű sebességét és a követési távolságot a vezető határozza meg. A döntése azonban egyaránt függ a saját észleléseitől és a járműve által, a fizikai környezetről küldött jelzésektől, továbbá a hálózati forgalom helyi és általános hatásaitól.
Az útminőségi, meteorológiai, látási viszonyokból eredő fizikai hatások az adott járműsűrűségnél meghatároznak egy választható sebességtartományt. Adott szakaszon előre haladó, jármű-jármű hatásokból eredő dinamikus kapcsolatok forgalomi leírására alkalmazható a 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 JÁRMŰVEK LEGNAGYOBB „a” GYORSÍTÁSI PARAMÉTERÉNEK HATÁSA A MOZGÁS-FOLYAMATRA, A VEZÉR JÁRMŰHÖZ TÖRTÉNŐ FELZÁRKÓZÁS SORÁN

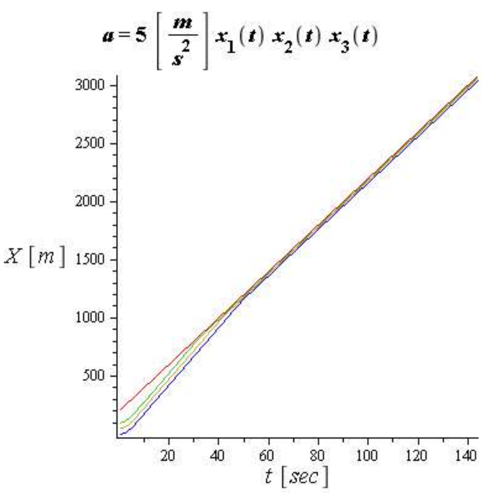
Az alábbi ábrák szimulált út-idő és sebesség-idő diagramokat mutatnak be a különböző „a” gyorsítási képességek esetében. Esetünkben egy sávban különböző kezdeti pontban, t_0=0 időpontban nyugalmi állapotban lévő járművek indulnak el és követik a vezérpont (vezér jármű) mozgását. Ezek a szimulációk ebben az esetben, a vezérjárműn kívül a gépjárműcsoportban három egymást követő járművet vettek figyelembe.



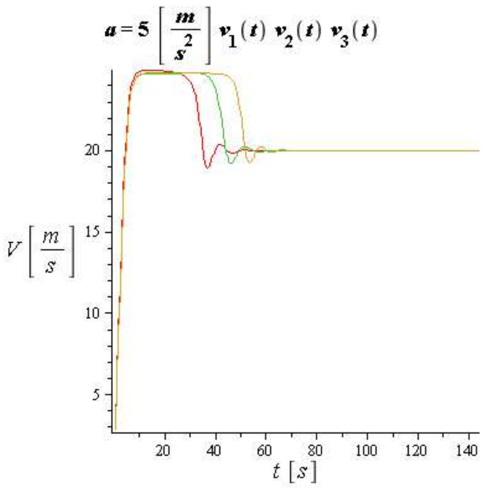
2.ábra: a=10 [m/s^2] esetén, a felzárkózás mozgásfolyamata



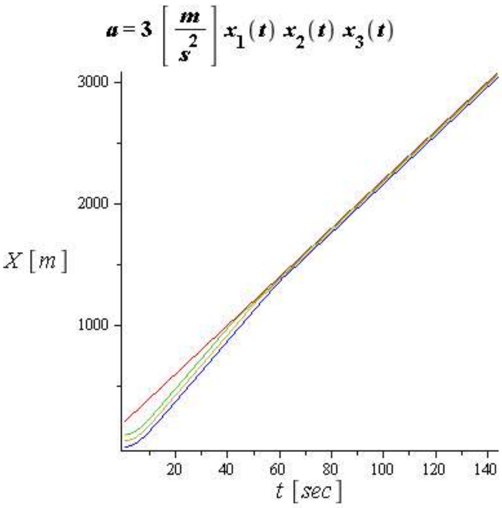
3. *ábra:* a=10 [m/s^2] esetén, a felzárkózás sebességfolyamata



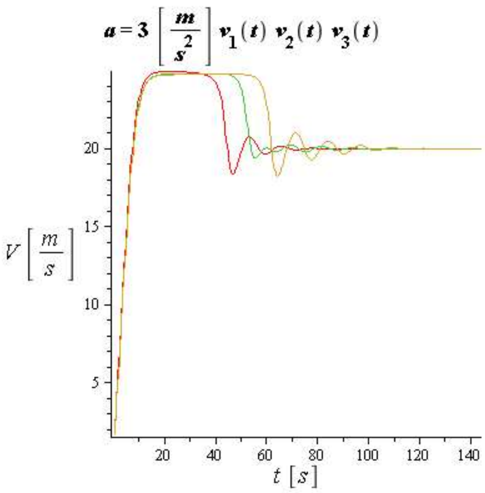
4 ábra: a=5 [m/s^2] esetén, a felzárkózás mozgásfolyamata



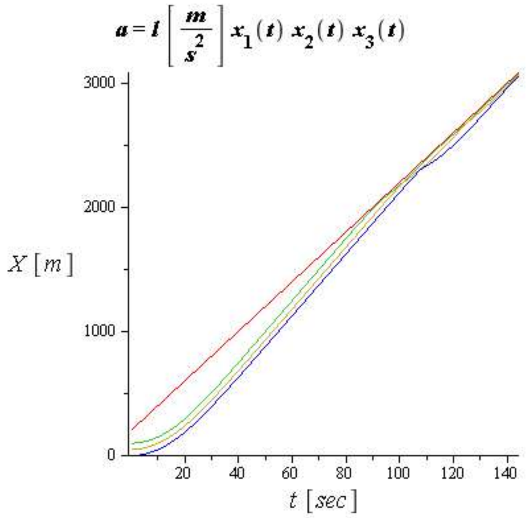
5. ábra: a=5 [m/s^2] esetén, a felzárkózás sebességfolyamata



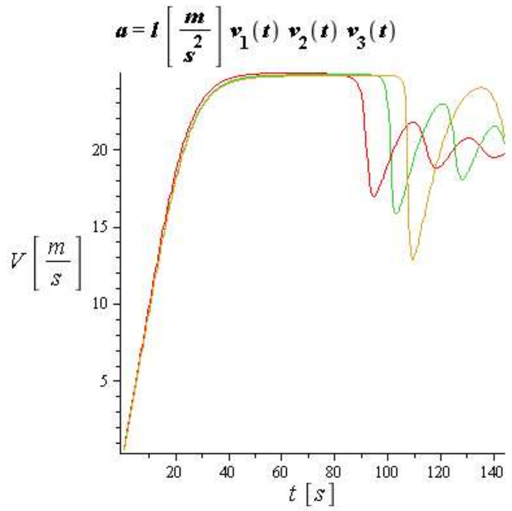
6. ábra: a=3 [m/s^2] esetén, a felzárkózás mozgásfolyamata



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



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



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

A kisebb gyorsítási képességű járművek esetében jól megfigyelhetők a lomhább és nagyobb kilengésű mozgások. A gyorsítási képességek tehát hatnak a túllendülés mértékére, és 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 célszerű 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 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.

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

A (2) differenciálegyenlet-rendszer, dimenzió nélküli tagokat tartalmaz a baloldalon, mert a szorzatok tényezőinél a dimenziók egymás reciprokai. Ebből következik, hogy szükségszerűen a jobb oldali vektor is dimenzió nélküli. A differenciálegyenlet-rendszer megoldásainak numerikus értékei nem változnak, ha az egyes tagoknál, a következő fizikai dimenziókat alkalmazunk a mátrix és vektorok elemeinél:
A^{-1} [kg]; V^{-1} f_1 [N], S f_2 [N] és 1(t) [N]; x(t) [m]; (következésképp: x(t) első deriváltnál [m/s]; x(t) második deriváltnál [m/s^2]);

Ennek a megközelítésnek az a jelentősége, hogy amíg a matematikai modell, a két esetben ekvivalens, addig a fizikai interpretáció már telesen eltérő a két esetben. Az első esetben egy közlekedés-dinamikai modellt vizsgálunk, a második esetben pedig egy lengéstani, dinamikai modellt. Ugyanakkor, a második fizikai modell paraméterei alapján, már olyan következtetések vonhatók le, amelyek az első modellnél nem.

Ennél, a (2) modellnél, értelmezhető az $\underline{\underline{\mathrm{M}}}$ tömegmátrix, a $\psi(\dot{x}(t))$ nemlineáris csillapítási vektor és az $\varphi(x(t))$ nemlineáris rugóerő vektor, amely a (3) klasszikus nemlineáris járműdinamikai modellt határozza meg.

$$\underline{\underline{\mathrm{M}}} = \left\langle \underline{\underline{\mathrm{A}}} \right\rangle^{-1};$$

$$\psi(\dot{x}(t)) = \left\langle \underline{\underline{\mathrm{V}}} \right\rangle^{-1} \underline{\mathrm{f}_1}(\dot{x}(t));$$

$$\varphi(x(t)) = \left\langle \underline{\underline{\mathrm{S}}} \right\rangle \underline{\mathrm{f}_2}(x(t));$$

$$\underline{\underline{\mathrm{M}}} \in \Re^{nxn}; \psi(\dot{x}(t)) \in \Re^{n}; \varphi(x(t)) \in \Re^{n};$$

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

$$\underline{\underline{\mathrm{M}}}\ddot{x}(t) + \psi(\dot{x}(t)) + \varphi(x(t)) = \underline{1} \qquad (3)$$

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:

$$\begin{gathered}\ddot{x}_i(t) \to 0 \\ \dot{x}_i(t) \to v_i^* = const! \\ x_{i-1}(t) - x_i(t) \to s_i^* = const!\end{gathered} \tag{4}$$

A (4) 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. Ily módon származtathatók olyan közlekedési rendszerjellemző paraméterek, amelyek jól értelmezhetők a lengéstani és járműdinamikai vizsgálatokból és amely által 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 az m_i tömegnél:

$$k_i = \left[\frac{d}{d\dot{x}_i}\left(\frac{\dot{x}_i}{v_i}\right)^4\right]_{\dot{x}_i = v_i} = \frac{4}{v_i}; \tag{5}$$

$$S_i = \left[\frac{d}{dx_i}\left(\frac{s_i}{x_{i-1} - x_i}\right)^2\right]_{x_{i-1} - x_i = s_i} = \frac{2}{s_i}; \tag{6}$$

$$m_i = \frac{1}{a_i}; \tag{7}$$

Az (5),(6) és (7) 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 közlekedési modell paraméterek alapján az alábbiak:

$$\omega_i^2 = \frac{S_i}{m_i} = 2\frac{a_i}{s_i}; \tag{8}$$

A δ_i relatív csillapítási tényezőre a (9) definíció alapján az alábbi érvényes, továbbá (8) és (10) alapján:

$$\frac{k_i}{m_i} = 2 \cdot \delta_i \cdot \omega_i \tag{9}$$

$$\frac{k_i}{m_i} = \frac{\frac{4}{v_i}}{\frac{1}{a_i}} = 4\frac{a_i}{v_i} \tag{10}$$

$$\delta_i = \sqrt{2}\frac{\sqrt{a_i \cdot s_i}}{v_i} \tag{11}$$

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:

$$|\cos(\omega \cdot t_1)| = |\cos(\omega \cdot t_2)| = |\cos(\omega \cdot t_3)| = \ldots = |\cos(\omega \cdot t_k)|$$

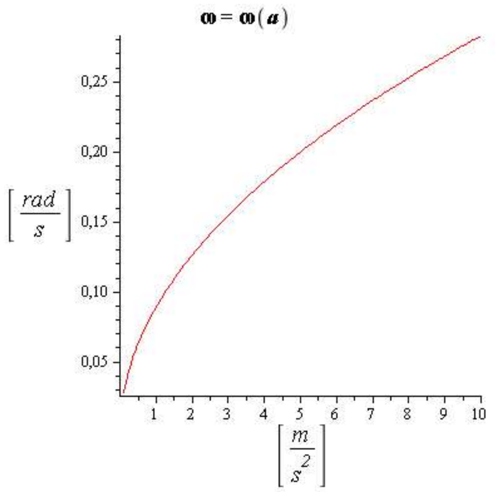
majd, tekintjük az alábbi tetszőleges $t_i \neq t_j (t_1 \leq t_i \prec t_j \leq t_k)$ időpontokat és alkalmazzuk az alábbi összefüggéseket:

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

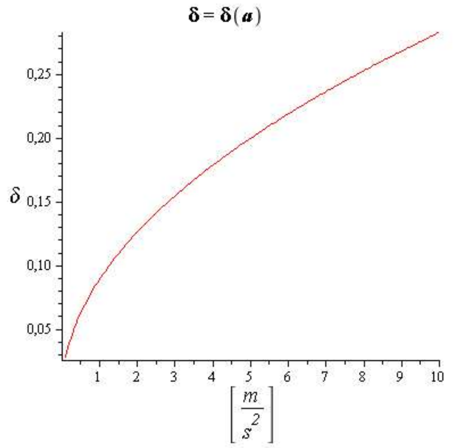
$$\ln A_i - \ln A_j = 2 \cdot \delta \cdot \omega \cdot (t_j - t_i) \tag{17}$$

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

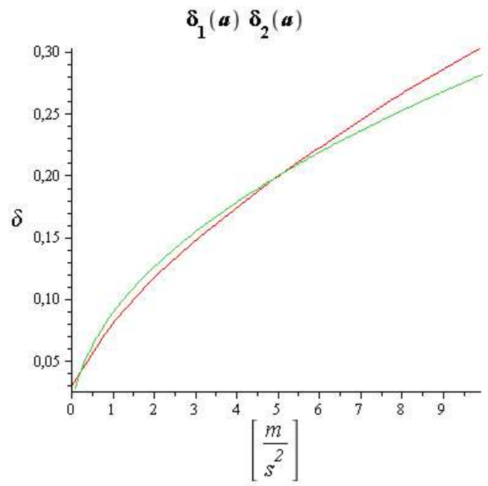
A gyakorlati számítások esetén a t_1, t_2, t_3, ... t_k sorozat első 3-4 eleme használható fel az amplitúdók gyors csökkenése és a relatív mérési hiba növekedése miatt, ezért a legnagyobb amplitúdót és őt követő, elfogadható mérési hibával rendelkező amplitúdókat célszerű figyelembe venni.
Az „a” gyorsítási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



10. ábra: IDM modellparaméterek alapján számított $\omega = \omega(a)$ függvény



11. ábra: IDM modellparaméterek alapján számított $\delta=\delta(a)$ függvény



12. 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 is 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 ($1<\delta<1$). 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 "a" értékeknél az alábbi táblázat, a *12. ábrán* látható függvényeknél.

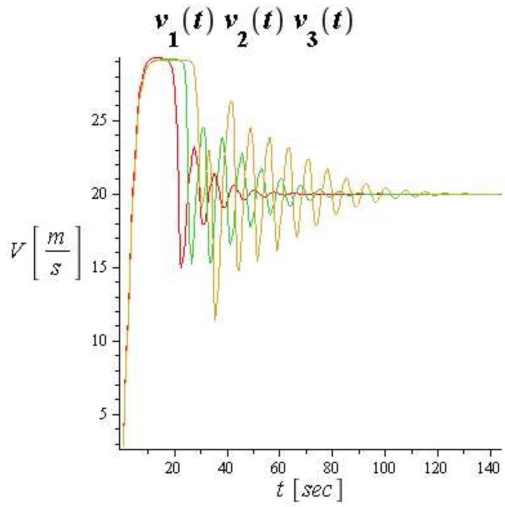
a [m/s^2]	**1**	**2**	**3**	**5**	**6**	**8**	**10**
Relatív hiba [%]	8.59	6.65	4.50	0.13	1.77	5.53	7.94

1. táblázat

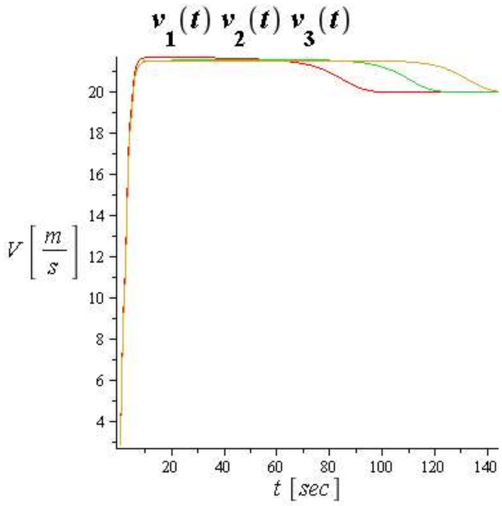
6. A δ RELATÍV CSILLAPÍTÁS VARIÁLÁSA, a=5M/S^2 GYORSULÁSI TULAJDONSÁG MELLETT ÉS FIX ω =0.2 ÉRTÉK MELLETT

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 (*13.ábra* és *14. ábra*).

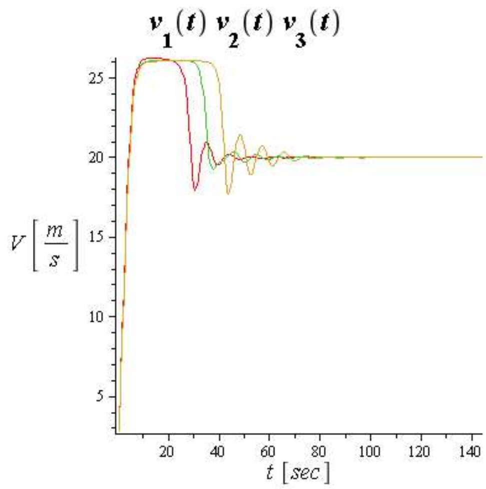
Ahogy növekszik a δ relatív csillapítás értéke δ=0.2-ig, úgy csökken a sebességtúllövés értéke és a követési sebesség felvételi ideje is, pl. δ=0.2-nél v=25, a stabilitásidő pedig 1 perc. δ=0.2-0.24 közötti relatív csillapítás értékeknél tovább csökken a sebességtúllövés értéke és sima, lengésmentessé válik a sebességfüggvények alakulása, a stabilitási idő értéke viszont el kezd növekedni. (*15.ábra* és *16. ábra*).



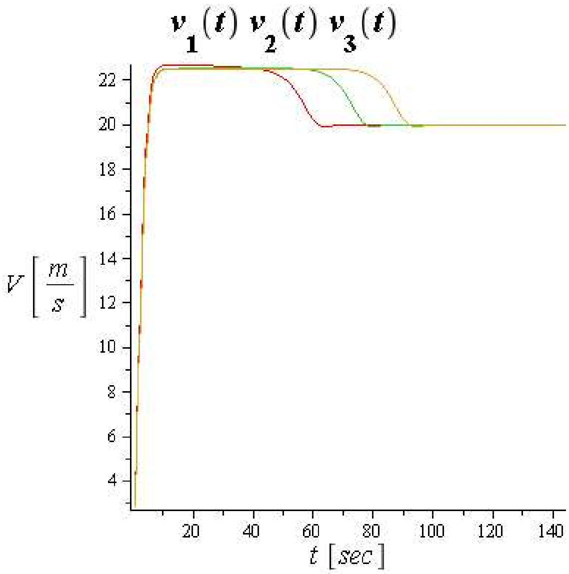
13. ábra: a=5 [m/s^2] és δ=0.17



16. ábra: a=5 [m/s^2] és δ=0.23



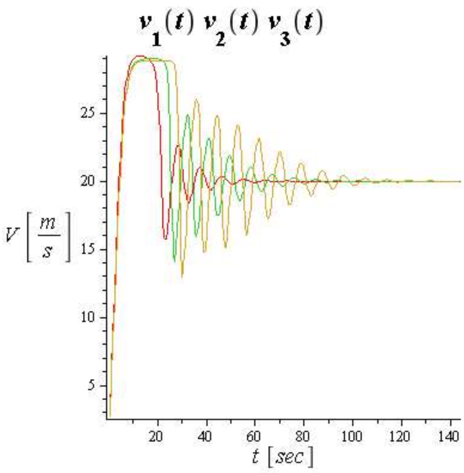
14. ábra: a=5 [m/s^2] és δ=0.19



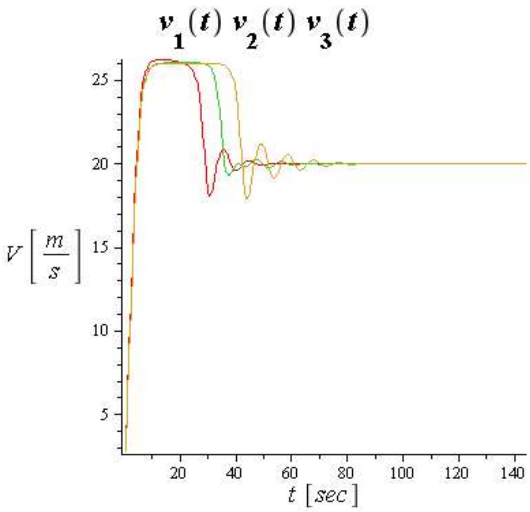
15. ábra: a=5 [m/s^2] és δ=0.22

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

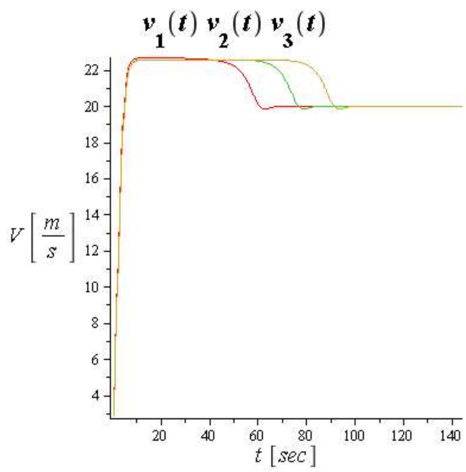
Megállapítható, hogy a kis ω sajátfrekvencia tartományban (ω<0.17) magas a sebességtúllövés és 20 m/s helyett elérheti pl. a 29 m/s sebességet is, ezért elég komoly fékezésekre van szükség és lemegy a sebesség a 13-15 m/s értékek közelébe is. Tehát hektikusak a járműveknél a sebességek alakulása és a sebességek ingadozás 90 s-ig is eltarthat (*17.ábra* és *18. ábra*).
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* és *20. ábra*).



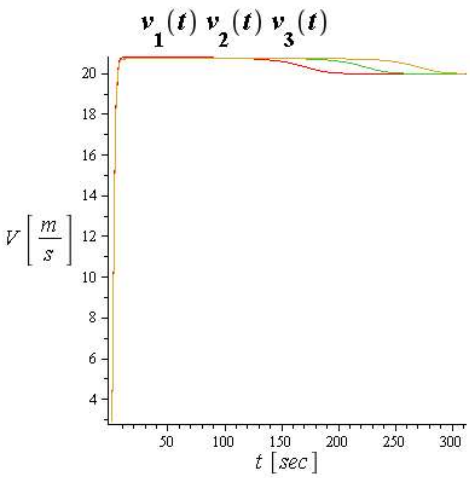
17. ábra: a=5 [m/s^2] és ω =0.17



18. ábra: a=5 [m/s^2] és ω =0.19



19. ábra: a=5 [m/s^2] és ω =0.22



20. 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: δ variálása *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: ω variálása *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.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

Az IDM alaprendszer paraméterei, közlekedési rendszer-paraméterek, 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 időtartamára, 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.

Köszönetnyilvánítás

A konferencia cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)" projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg

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

EFOP-3.6.2-16-2017-00016 Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában

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.