

## Járműoszlop biztonsága és gazdaságossága kooperatív irányítással

Gáspár Péter<sup>1</sup>, Mihály András<sup>2</sup>, Németh Balázs<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézet, Budapest, Kende u. 13-17., gaspar@sztaki.hu

<sup>2</sup> BME Közlekedésmérnöki Kar, Budapest, Bertalan L. u. 2., andras.mihaly@mail.bme.hu

<sup>3</sup> BME Közlekedésmérnöki Kar, Budapest, Bertalan L. u. 2., bnemeth@sztaki.hu

**Abstract:** A cikk egy heterogén összetételű járműoszlop irányítástervezési módszerét ismerteti. A járműmodell és a szabályozási kritériumok rövid áttekintése után a megvalósítás során jelentkező késedelmek és környezeti zavarások által okozott hosszirányú dinamikai lengések kiküszöbölése kerül bemutatásra. Ennek kivitelezésére többféle irányítási stratégia kerül alkalmazásra és értékelésre. Bemutatásra kerül a jármű környezet (domborzati viszonyok, sebességkorlátozások) figyelembe vételének hatékonysága a járműoszlop sebesség trajektóriájának tervezésében. Az egyes irányítási eljárások szemléltetése TruckSim szimulációs környezetben történik.

### 1. BEVEZETÉS

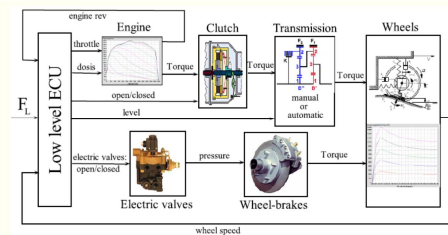
Az oszlopban haladó járművek irányítása azt a jellegzetes forgalmi szituációt kísérli meg automatizálás által biztonságosabbá és költséghatékonyabbá tenni, amikor több jármű, hosszú távon, azonos útszakaszon halad. Az oszlopban haladó járművek esetén a cél a minél kisebb követési távolság megvalósítása. A járművek közötti kommunikáció, így az egyidejű fékezés és gyorsítás lehetőségének kihasználásával a követési távolság akár 0.5-5 méter közöttire választható. A követő járművek számára ez a kisebb torlónyomást jelent, ami a fogyasztás csökkenéséhez és ezzel összefüggésben a károsanyag valamint CO<sub>2</sub> kibocsátás visszaszorításához vezet. A kisebb követési távolságok és egyenletesebb sebességtrajektóriák további pozitív hozadéka az akár kétháromszor nagyobb forgalmi kapacitás adott útszakaszon, így a torlódások elkerülésével a közlekedés externális költségei is csökkennek. Az automatizálás által tehermentesíthetők a vezetők és elkerülhetők az emberi hibák okozta balesetek, de az egyenletesebb haladás a kényelemre is pozitív hatással van.

A konvoj irányításával szembeni követelmények közül a legfontosabb a biztonság garantálása. A járműoszlop haladása során az egyes járművek hatékony és megbízható üzemét, valamint a járműoszlop és környezetének biztonságát a teljes futás során garantálni kell. Nagyszámú és különböző jellegű szituáció veszélyeztetheti a konvoj biztonságát. Azoknál az irányítási stratégiáknál, ahol a megelőző jármű adatai mellett a vezető jármű vagy „r” számú megelőző jármű adatai is a szabályozó bemeneteit alkotják, a szaturáció jelensége is balesetveszélyes lehet. Ennek illusztrálására alábbiakban ennek a kritikus baleseti forrásnak az elemzésével foglalkozunk.

### 2. OSZLOPBAN HALADÓ JÁRMŰVEK IRÁNYÍTÁSA

A járművek hosszirányú irányítására egy egyszerűsített járműmodellt célszerű bevezetni. Tekintve, hogy a szabályozó algoritmus kimenete a konvojban irányított jármű számára előírt gyorsulás, az alsó szintű irányítás során ennek megfelelő fizikai beavatkozót kell vezérelni (lásd 1. ábra). A jármű gyorsulásának beállítására a motor pillangószelep-

állítását (illetve dízelmotor esetén az adagoló állását vagy a befecskendező nyitási idejét) és a féknyomást használjuk. Az egyszerűsített járműmodell megfelelő elhanyagolásokkal, linearizálásokkal pontosan meghatározhatóvá teszi az előírt gyorsuláshoz szükséges beavatkozó állapotokat.



1. ábra: A szabályozó által kivezérelt erő megvalósítása

Megfelelő paraméterezéssel különböző jellemzőkkel bíró járművekre is érvényes a modell, így a konvoj stabilitását biztosító szabályozó az egyes járművek dinamikájától függetlenül tervezhető.

A konvoj szabályozása során kétféle stabilitási feladatot szükséges megoldani. Ennek meghatározására először definiáljuk a járművek közötti követési hibát a következőképpen:

$$e_i = x_i - x_{i-1} + L_{des} \quad (1)$$

ahol  $x_i$  az aktuális,  $x_{i-1}$  a megelőző jármű pozíciója,  $L_{des}$  pedig az előírt követési távolság. Az egyedi jármű stabilitás szerint a konvojban haladó járműveknek képesnek kell lenniük a megelőző jármű bármilyen korlátos gyorsulás és sebességprofilját követni korlátos követési és sebességhibával. A megelőző jármű állandó sebességű haladása esetén a követési hibának nullához kell konvergálnia. A teljes járműoszlop stabilitására az úgynevezett string stabilitási feladatot kell megoldani. Ekkor a konvoj elején keletkező követési hiba - például a vezető jármű hirtelen fékezése miatt - nem növekszik a járműoszlop mentén a később érkező járművek irányában. Ezzel elkerülhető a konvojon belüli ráfutásos ütközés, de a menetkényelem is javul. A string stabilitás norma feltétele:

$$\|e_i\|_{\infty} \leq \|e_{i-1}\|_{\infty} \quad (2)$$

A követési hiba terjedésére vonatkozó átviteli függvény:

$$H(s) = \frac{e_i}{e_{i-1}} \quad (3)$$

Ezzel a string stabilitás teljesül, amennyiben a következő két feltétel fennáll az átviteli függvényre és a hozzá tartozó súlyfüggvényre:

$$\|H(s)\|_{\infty} \leq 1 \quad h(t) > 0 \quad \forall t > 0 \quad (4)$$

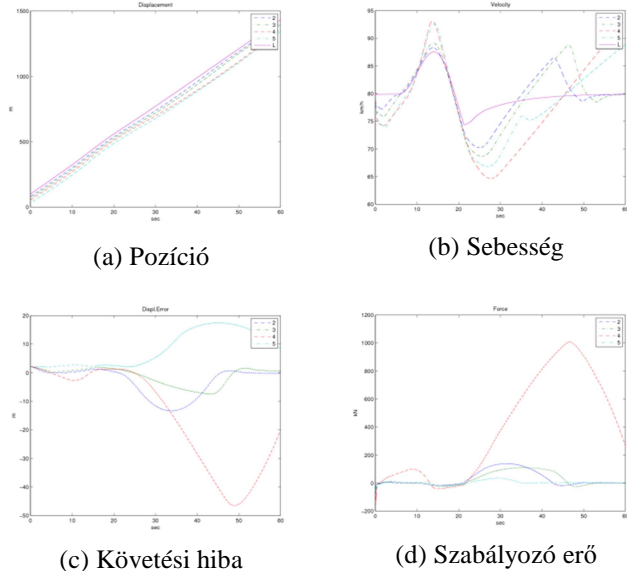
A konvoj irányítása eltérő stratégiák mentén történhet. A két fő módszer az állandó távolságok és az állandó követési idők módszere. Előbbinél a járművek közötti megkívánt követési távolság független a járműoszlop sebességétől. Utóbbinál a követési idő állandó, így a sebesség függvényében változik a követési távolság. Az irányítási stratégia a szabályozó bemeneteit is meghatározza. Az itt vizsgált szabályozó a vezető jármű és a megelőző jármű pozíció, sebesség és gyorsulás adatait használja fel konstans távolság tartására [1].

### 3. KÖRNYEZETI ZAVARÁSOK ÉS KÉSÉSEK FIGYELEMBE VÉTELE A TERVEZÉSBEN

A bemutatásra kerülő 60 másodperces szimulációban a járművek közötti kommunikáció során a mintavételezési idő 100 ms, így a jelátvitel késedelmek jelentősnek mondhatók. Lassítás esetén a járművek fékrendszerének 30 ms-os késésével kell számolni, míg gyorsításnál a váltások átlagosan 20-30 ms-os lefutása és a szabályozó által előírt gyorsulás eléréséhez megkívánt fordulatszám felépítésének késése okozhat lengéseket a konvojban.

A konvoj stabilitását bonyolítja az útpálya emelkedése és lejtése. Az emelkedési szög a szimulációban meghaladja a 4 %-ot, ami nehézgépjárművek számára komoly ellenállást jelent. A szimulációs példában a konvojban résztvevő járművek eltérő méret, tömeg és teljesítményjellemzőkkel bírnak. A vezető jármű tömege 13332 kg, hossza 12,1 m, motorjának teljesítménye 330 kW, míg a nyomatékot hétfokozatú nyomatékvaltó fix 6-dik fokozata juttatja a kerekekhez. A 2. és a 3. jármű tömege 12551 kg, hosszuk 5 m és motorjuk teljesítménye 175 kW, az erőátvitelről hétfokozatú automataváltó gondoskodik. A 4. jármű tömege 26019 kg, hossza 15,356 m, motorjának teljesítménye 300 kW, ami hétfokozatú automata váltóhoz csatlakozik. Az 5. jármű tömege 10690 kg, hossza 4,49 m, motorjának teljesítménye 175 kW, a nyomatékvaltó típusa hétfokozatú automatikus. A konvoj járművei közötti megkívánt követési távolság a szimulációban 7,9 m. A különböző dinamikai jellemzőkkel bíró nehézgépjárművekből szervezett konvoj esetén a jelátvitel és az aktuátorok késése mellett szaturáció lépett fel a követő járműveknél, miközben a vezető jármű sebességtartó automatika segítségével igyekezett a beállított 80 km/h-ás sebesség tartásában. A rosszabb tömeg/teljesítmény aránnyal rendelkező járművek az emelkedőn vagy a gyorsítások során nem képesek a szabályozó által kivezérelt gyorsulást elérni, így a megkívánt követési távolságot sem képesek tartani. A leszakadás miatt a követő jármű szabályozója a vezető járműtől való távolodás miatt nagyobb gyorsulást ír elő, így a követő jármű

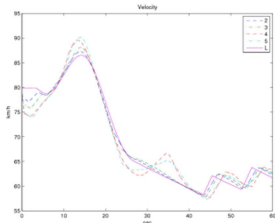
nagymértékű leszakadás esetén ráfut a leszakadó járműre. A 2/d ábrán jól látható, hogy jelentős tömege miatt a 4. jármű számára túl nagy az előírt gyorsulás tartásához szükséges erő. Ezért ennél a járműnél szaturáció lép fel, ezért leszakad a konvojtól. A jelentősen megnőtt negatív előjelű követési hiba (lásd 2/c) mutat rá a leszakadásra, ami miatt az 5. jármű szabályozója a kellesenél nagyobb gyorsulási értéket ír elő, így ráfut a 4. járműre.



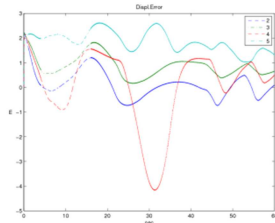
2. ábra: Szimulációs eredmények heterogén konvojra

### 3.1 RÁFUTÁS MEGELŐZÉSE A VEZETŐ JÁRMŰ SEBESSÉGÉNEK MÓDOSÍTÁSÁVAL

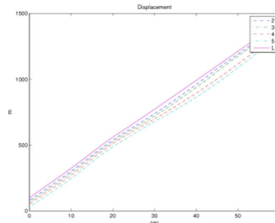
Az irányítási feladatban alapvető szerepet játszanak járművek közötti kommunikációs módszerek. Az információ gyűjtésére GPS vevő, WiFi modul és CAN járműkommunikációs csatorna szolgál. A járműoszlop irányítástervezése során figyelembe kell venni a kommunikációs hálózat késleltetéseit és a lehetséges adatvesztéseket. Minél nagyobb a kommunikációs csatorna mintavételezési ideje, annál nagyobbra kell választani a konvoj járművei között a követési távolságot. A következő stratégia alkalmazásakor a vezető járművel való kommunikáció kétirányú. A követő járművek szaturáció miatt bekövetkező leszakadását a vezető jármű sebességének mérséklésével akadályozzuk meg. A szimulációs példában a gázpedálállás szolgál a szaturáció detektálására. Amennyiben valamelyik követő jármű teljesen lenyomott gázpedállal halad több mint két másodpercen keresztül, abban az esetben üzenetet küld a vezető járműnek a sebesség mérséklésére. A vezető jármű újonnan beállított sebességét tehát az éppen szaturáló jármű határozza meg aktuális sebességi és gyorsulási állapotának megfelelő súlyozással (lásd 3/d diagram). A vezető jármű a módosított sebességet öt másodpercig követi, majd amennyiben a követő járművek között megszűnik a szaturáció, úgy visszaáll az eredetileg beállított sebesség tartására.



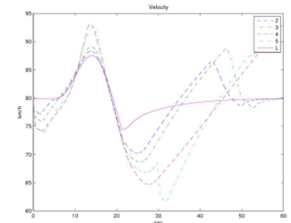
(a) Sebesség



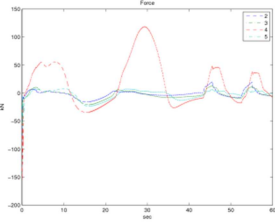
(b) Követési hiba



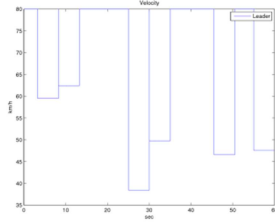
(a) Pozíció



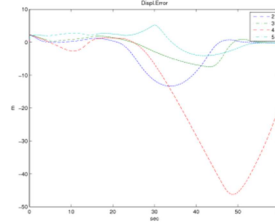
(b) Sebesség



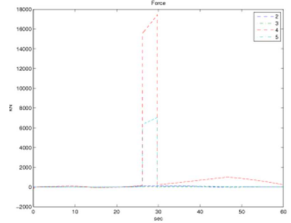
(c) Szabályozó erő



(d) Vezető jármű



(c) Követési hiba



(d) Szabályozó erő

3. ábra: Eredmények a vezető jármű sebességmódosításával

Mint a 3/c ábráról leolvasható, a szaturáló 4. jármű számára kivezérelt maximális erő közel egy nagyságrenddel kisebb, így a szaturáció ideje és mértéke is jelentősen csökken. Ennek köszönhetően a leszakadás nagysága is egy nagyságrenddel kisebb lesz, így az 5. jármű nem fut rá az előtte lévőre. A 3/b ábrán jól látható, hogy a 4. jármű maximális leszakadása körülbelül 4 m, miközben az 5. jármű az előírtnál közelebb kerül hozzá. Mindeközben a konvoj sebessége 80 km/h-áról 60 km/h alá csökken az emelkedőn, és a vízszintes szakaszon való intenzív gyorsítás is megszakad a követő járművek szaturációja miatt (lásd 3/a).

Ennek a stratégiának egyik legnagyobb előnye, hogy a konvoj feloszlata nélkül sikerül kiküszöbölni a ráfutásos balesetet előidéző leszakadást. Emiatt a konvojba rendezés összes előnye megmarad, és a feloszlata elkerülésével a konvoj újraegyesítésének nehézségeitől is el lehet tekinteni. A módszer hátránya a kétirányú kommunikáció alkalmazásának szükségessége, és hogy a vezető jármű sebességének korrigálása bizonytalanságot kelthet a sofőrben.

### 3.2 RÁFUTÁS MEGELŐZÉSE A JÁRMŰOSZLOP FELOSZLATÁSÁVAL

A következő irányítási stratégia az úgynevezett mini-platoon struktúrán alapszik [1]. Ebben az elrendezésben a járműoszlop több egymást követő szakaszra oszlik, ahol a megelőző szakasz utolsó járműve lesz a referencijárműve a következő szakasznak.

A fent leírt mini-platoon stratégia szerint a szaturáló jármű a közvetlenül előtte haladót tekinti vezető járműnek, míg a sorban mögötte lévőknél új vezető járművévé válik. A szimuláció feladatban először a 2. jármű szaturál és alakít új konvojt a 27,4-edik másodpercben. Nem sokkal később, a 31,1-edik másodpercben a 4. jármű is leválik és új konvojt alakít, így az emelkedő végén már három szakaszra oszlik a járműoszlop. Mint az 4. ábrán jól látható, az eredeti konvoj felállás szerinti követési hibák jelentősek, ám a mini-platoon stratégia alkalmazásával a ráfutások elkerülhetők. A módszer hátránya az eredeti konvoj feloszlata.

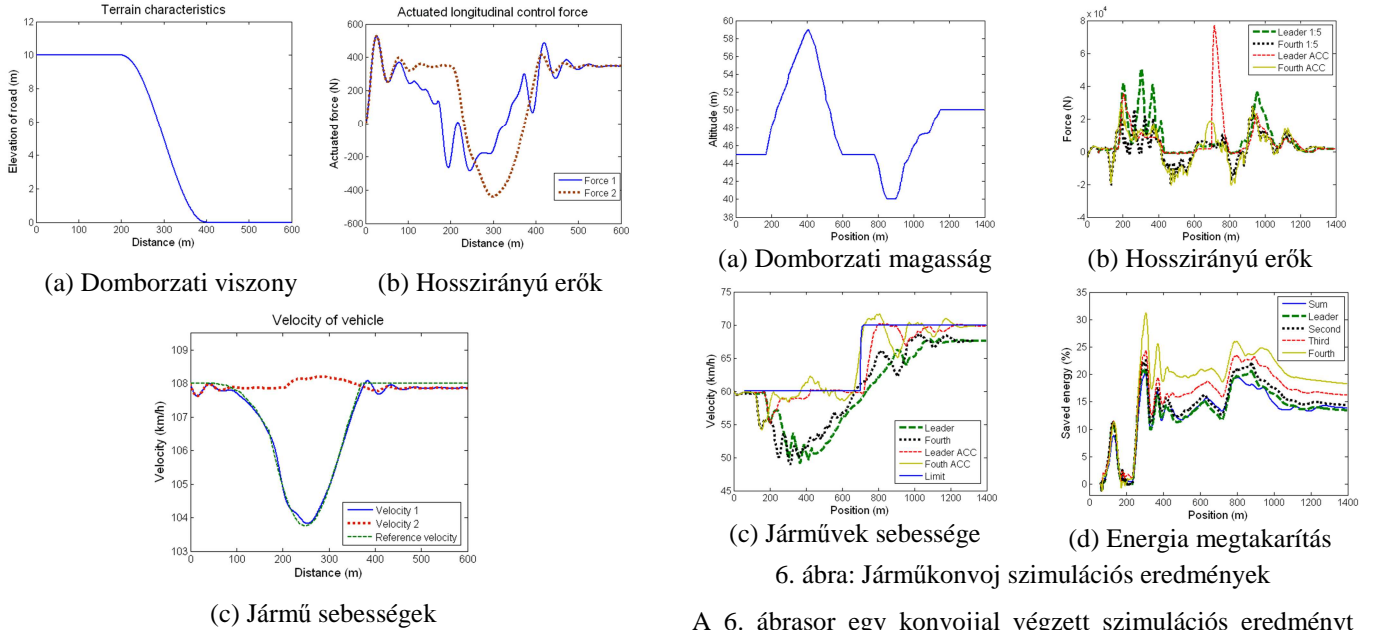
4. ábra: Eredmények a járműoszlop feloszlataival

### 4. JÁRMŰ KÖRNYEZET FIGYELEMBE VÉTELE A SEBESSÉGÉTRAJEKTÓRIA TERVEZÉSÉBEN

Az előző fejezetekben felvázolt járműkonvoj irányítási struktúrák a konvoj stabilitásának és menetbiztonságának garantálására teszik a hangsúlyt. Tekintetbe véve, hogy a járműkonvoj rendszerek rendelkeznek többirányú kommunikációval, valamint a vezető járművet kivéve a sorban lévő többi jármű sebessége mind szabályozott, lehetőség nyílik arra, hogy a járműkonvoj haladási sebessége mindig a pillanatnyi domborzati és közlekedési viszonyoknak megfelelően, optimálisan legyen megválasztva. Ennek megfelelően a járműkonvoj sebességének megtervezésében a domborzati viszonyok (útemelkedések és lejtések), valamint a megengedett maximális sebességek és azok változása (sebességkorlátozás) kerülnek figyelembe vételre.

A domborzati viszonyok figyelembe vételével számos kutatóintézet foglalkozik [2,3,4]. A figyelembe vétel hatását jól szemlélteti a következő példa. A jármű a 5/a ábrán vázolt útvonalon halad, a 200. méterről egy lejtős szakaszra lép rá. Amennyiben a jármű rendelkezik információval az előtte lévő útszakaszról, abban az esetben már a lejtő előtt elkezd csökkenti a sebességét (5/c) – tudva, hogy a lejtő úgyis gyorsítani fogja. Ezen a szakaszon a jármű a vonóerejét csökkenti, tehát tüzelőanyag megtakarítás érhető el (5/b). Másrészt viszont a jármű egy csökkentett sebességgel érkezik a lejtőhöz, tehát a lejtőn kisebb sebességről kezd el gyorsulni, tehát a maximális megengedett sebesség betartásához kevesebb fékerőt kell létrehoznia – ebből kifolyólag a fékrendszer beavatkozása csökken, mely a féktárcsa(dob) fékhatását csökkenti.

A 5. ábrában továbbá fel van tüntetve egy olyan szimulációs eset, mikor a jármű nem rendelkezik domborzati információkkal, hanem a pillanatnyi megengedett maximális sebességet követi referenciának. Az ábrában jól láthatók a sebességprofilban és a kifejtett hosszirányú erőben megnyilvánuló különbségek.



6. ábra: Járműkonvoj szimulációs eredmények

5. ábra: Domborzat figyelembe vétele a sebesség tervezésben

Járműkonvoj esetében a konvoj egészére optimális sebesség trajektória meghatározása két lépcsőben történik. Első lépésként egy formula segítségével [4] a konvoj egyes tagjainak optimális sebességei, a konvoj többi tagjától függetlenül meghatározható ( $\lambda_j$ ). Ez azt jelenti, hogy mivel a konvoj minden tagja előre ismer egy véges horizonton adott domborzati és sebességkorlátozási információ mennyiségét, ezért az egyes járművek számára optimális egyedi járműsebesség eltérő lehet. Másfelől viszont igaz az, hogy az egyes járművek konvojba vannak szervezve valamilyen stratégia mentén, tehát az egyes járművek pillanatnyi sebességei függenek egymástól, végeredményben az egész konvoj sebességét alapvetően meghatározza a vezető jármű sebessége. Ennek megfelelően második lépésben a vezető járműnek egy olyan sebességet kell megválasztania, aminek hatására a konvoj többi tagjának sebessége egyenként a lehető legközelebb lesz a saját optimális sebességéhez ( $\bar{\lambda}_1$ ).

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^2 + \sum_{j=1}^n \left( \prod_{k=1}^{j-1} G_k \bar{\lambda}_1 \right)^2 - 2 \sum_{j=1}^n \left( \lambda_j \prod_{k=1}^{j-1} G_k \bar{\lambda}_1 \right) \rightarrow 0$$

A vezető jármű számára optimális sebesség tehát:

$$\bar{\lambda}_1 \cong \frac{\sum_{j=1}^n \left( \lambda_j \prod_{k=1}^{j-1} G_k \right)}{\sum_{j=1}^n \left( \prod_{k=1}^{j-1} G_k \right)^2}$$

Ebben a lépésben célszerű figyelembe venni, hogy a kiadott referencia sebességet nem azonnal, hanem késleltetéssel követik az egyes járművek, azaz

$$\dot{\xi}_{0,j}(t) = \dot{\xi}_{0,j}(t_0) + (\dot{\xi}_{0,j-1}(t) - \dot{\xi}_{0,j}(t_0))(1 - e^{-(t-t_0)/T})$$

ahol  $\dot{\xi}_{0,j}$  a  $j$ -edik jármű pillanatnyi sebessége,  $T$  a késleltetés hossza. Ez a kapcsolat a  $\dot{\xi}_{0,j} = G_j \dot{\xi}_{0,j-1}$  összefüggéssel közelíthető.

A 6. ábrásor egy konvojval végzett szimulációs eredményt közöl két esetben: a környezet figyelembe vételével, illetve anélkül (ACC-vel jelzett). A járművek a 6/a útvonalon haladnak, miközben a járművek referenciasebessége folyamatosan változik (6/c). Látható, hogy hegyemenetben ACC esetben a járművek az előírt maximális sebesség elérésére törekednek, mely nagy vonóerőt igényel a járművektől. A domborzat figyelembe vételénél viszont a járművek sebessége szabályozott módon lecsökken, mely által kevesebb vonóerőt kell kifejteni, és energia takarítható meg. Ennek oka az, hogy a járművek információval rendelkeznek arról, hogy a hegyemenet átmeneti csupán, utána völgyemenet fog következni, ahol vissza tudnak majd gyorsulni. Hasonló tendencia vehető észre a megengedett maximális sebesség növekedésekor. ACC esetben a maximális sebességet azonnal el szeretnék érni a járművek, míg a jelzőtábla utáni útviszony ismeretében egy folyamatos sebességnövekedés tapasztalható. Összességében a jármű környezet figyelembe vételével 15%-os energia megtakarítás érhető el, míg a menetidő csupán 81s-ot növekedett ezáltal.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS: A kutatás az NFÜ TECH-08-2/2-2008-0088 pályázat finanszírozásával valósult meg.

A kutatásokat az OTKA CNK 78168 pályázat támogatta..

#### HIVATKOZÁSOK

- [1] Swaroop. D. and J. Hedrick (1996). String stability of interconnected systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 41, 349–357.
- [2] Ivarsson, M., Aslund, J., and Nielsen, L. (2009). Look ahead control - consequences of a nonlinear fuel map on truck fuel consumption. Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part D, J. Automobile Engineering, 223, 1223–1238.
- [3] Nouveliere, L., Braci, M., Menhour, L., and Luu, H. (2008). Fuel consumption optimization for a city bus. UKACC Control Conference, Manchester.
- [4] Németh B., Gáspár P. (2010). Road conditions in the design of vehicle speed control using the LPV method. In: Mediterranean Control Conference, Marrakech.