

MOBILITÁS ÉS KÖRNYEZET

a Széchenyi István Egyetem
és a Pannon Egyetem különszáma



a *Magyar Tudomány*
2012. júliusi számának melléklete

TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KONV-2010-0003

MOBILITÁS ÉS KÖRNYEZET

Járműipari, energetikai és környezeti kutatások
a Közép- és Nyugat-Dunántúli Régióban.

A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával,
az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Főszerkesztő:

CSÁNYI VILMOS

Szerkesztőbizottság:

ÁDÁM GYÖRGY, BENCZE GYULA, BOZÓ LÁSZLÓ, CSÁSZÁR ÁKOS,
ENYEDI GYÖRGY, HAMZA GÁBOR, KOVÁCS FERENC, LUDASSY MÁRIA,
SOLYOSI FRIGYES, SPÁR ANDRÁS, SZEGEDY-MASZÁK MIHÁLY, VAMOS TIBOR

A lapot készítette:

ELEK LÁSZLÓ, GAZDAG KÁLMÁNNÉ, HALMOS TAMÁS, HOLLÓ VIRÁG,
MAJOROS KLÁRA, MAKOVECZ BENJAMIN, MATSKÁSI ISTVÁN, PERECZ LÁSZLÓ,
SIPOS JÚLIA, SPERLÁGH SÁNDOR, SZABADOS LÁSZLÓ, F. TÓTH TIBOR

Szerkesztőség:

1051 Budapest, Nádor utca 7. • Telefon/fax: 3179-524
matud@helka.iif.hu • www.matud.iif.hu
Kiadja az Akaprint Kft. • 1115 Bp., Bártfai u. 65.
Tel.: 2067-975 • akaprint@akaprint.t-online.hu

Előfizethető a FOK-TA Bt. címén (1134 Budapest, Gidófalvy L. u. 21.);
a Posta hírlapüzleteiben, az MP Rt. Hírlapelőfizetési és Elektronikus
Posta Igazgatóságánál (HELP) 1846 Budapest, Pf. 863,
valamint a folyóirat kiadójánál: Akaprint Kft. 1115 Bp., Bártfai u. 65.

Előfizetési díj egy évre: 10 440 Ft
Terjeszti a Magyar Posta és alternatív terjesztők
Kapható az ország igényes könyvesboltjaiban

Nyomdai munkák: Akaprint Kft. 26567
Felelős vezető: Freier László
HU ISSN 0025 0325

Mobilitás és környezet

Az összeállítás szerkesztői: Palkovics László, Czinege Imre, Kristóf János

Palkovics László: Beköszöntő	2
Hargitai Hajnalka – Dogossy Gábor – Sági Erik – Ibriksz Tamás – Stifter János: Műanyag nanokompozitok előállítása és vizsgálata	4
Szentes Adrienn – Varga Csilla – Horváth Géza – Bartha László – Kónya Zoltán: Szén nanocsövek: előállítás és alkalmazás	15
Jósvai János: Proaktív termelésütemezési módszerek és ipari alkalmazásai.....	26
Rechnitzer János – Smahó Melinda: A jármű- és autóipar hatása a kelet-közép-európai térség versenyképességére	38
Iván Gabriella – Koren Csaba: Az út képének hatása a sebességválasztásra külterületi utakon ...	48
Horváth Erzsébet – Kristóf János – Kurdi Róbert – Makó Éva: Agyagásvány nanokomplexek előállítása és szerkezeti jellemzése	56
Solecki Levente: Belsőégésű motorok hengerfelületének mikrogeometriai vizsgálata.....	65
Mathias Roman Dreyer – Gergye Tamás: Kopási folyamatok online mérése radionukleációs technika (RNT) segítségével	71
Kodrik László – Wágner László – Husvéth Ferenc: A járműforgalomból és kőolaj-feldolgozásból származó káros anyagok emissziójának hatása az állati eredetű élelmiszerek nehézfém-tartalmára	81
Moraszki Tamás – Mándli Péter – Horváth Zoltán: Belsőégésű motorok áramlási és égési szimulációja	86
Varga Zoltán: Kutatás a fenntartható járműhajtásért – cél: a jövő villamos energián alapuló közlekedése	92
Bagi Tamás – Horváth Barnabás – Medvegy Tibor – Molnár Gergely – Kronome Gergely – Szalai István: Léptetőmotor-forgórész elektro- és magnetoreológiai fluidumokkal csillapított lengéseinek kísérleti vizsgálata.....	114
Horváth Barnabás – Szalai István: Elektromechanikai folyadékok szerkezete: a láncképződés időbeli változásának vizsgálata dielektromos mérési módszerrel.....	123
Fodor Dénes – Weisz Róbert: Járműkerék-modellezés	132
Görbe Péter – Magyar Attila – Hangos Katalin: Megújuló energiaforrások komplex integrációja kisfeszültségű nemlineáris torzított hálózatokban.....	146
Hangos Katalin – Gerzson Miklós – Leitold Adrien – Starkné Werner Ágnes – Dulai Tibor: Petri-háló modelleken alapuló járműipari diagnosztikai módszerek.....	154
Hancsók Jenő: Belsőégésű motorok korszerű cseppfolyós üzemanyagai.....	161
Skodáné Földes Rita – Hancsók Jenő – Fehér Csaba – Kriván Eszter – Tóth Csaba: Motorbenzin- és gázolaj-keverőkomponensek előállítása, izobutén oligomerizációjának vizsgálata.....	176
Varga Zoltán – Hancsók Jenő – Eller Zoltán: Gázolajpárlat minőségjavítása katalitikus úton	184

Mobilitás és környezet

BEKÖSZÖNTŐ

Palkovics László

az MTA levelező tagja, a projekt kutatási igazgatója,
a Széchenyi István Egyetem kutatóprofesszora

Tisztelt Olvasó!

A *Magyar Tudomány* jelen különszámában egy olyan egyetemközi kutatói program eredményeivel ismerkedhet meg, amelynek célja, hogy – egy Magyarországon egyedülálló felsőoktatási partnerségre alapulva – professzionális kutatóbázist hozzon létre, egyben megalapozzon egy hosszabb távú, további intézményekre kiterjedő kutatói és oktatási együttműködést.

A győri Széchenyi István Egyetem és a veszprémi székhelyű Pannon Egyetem közös projektjének keretében olyan járműipari, energetikai és környezeti alap- és alkalmazott kutatások valósultak meg, amelyekre az érintett közép- és nyugat-dunántúli régióknak versenyképessége növeléséhez szüksége van. A járműipar fejlődéséhez való hozzájárulás nem csupán lokálisan, hanem az egész ország nemzetgazdasága szempontjából fontos tö-

rekvés, hiszen jól látható, hogy egyre több tőkeerős multinacionális nagyvállalat tervez és valósít meg jelentős beruházásokat hazánkban. Ez a szektor nagyjából 800 milliárd forinttal járul hozzá a magyar GDP-hez, az összeg felét a két egyetem vonzáskörzete adja.

A következő oldalakon a négy kutatási főirányba tagozódó ötvenöt projekt eredményeiből adunk válogatást. Ezek nem csupán különálló, egymástól elszigetelt kutatócsoportok tevékenységének eredményeit mutatják be, hiszen értékesen sikerült kiaknázni a rokon területekben és a két egyetem szakmai kompetenciájában rejlő szinergiákat. Kollégáim erőfeszítéseinek köszönhetően sikerült bebizonyítanunk, hogy egymással együttműködve képesek vagyunk lefedni egy iparág teljes vertikumát. Mi több, a projekt megvalósításával a két felsőoktatási intézmény képessé vált arra, hogy egyenrangú partnerei legyenek a kutatóintézeteknek, s nemzetközi

színtéren is piac képes szolgáltatást tudjanak nyújtani a legmagasabb elvárásokat támaztó ipari partnerek számára.

Az elért eredmények beépültek az oktatásba, s örömmünkre szolgál, hogy a beérkezett visszajelzések alapján a cégek most, a projekt eredményes megvalósításakor vonzóbbnak találják a hallgatókat, mint a projekt kezdete előtt. Ez egyértelmű visszaigazolása annak a törekvésnek, hogy gyakorlatiasabb, felkészültebb mérnökjelölteket bocsásson mindkét egyetem a munkaerőpiac rendelkezésére.

Az elért szakmai színvonal fenntartásához, illetve a további fejlődéshez elengedhetetlen feltétel a megkezdett együttműködés kiterjesztése. Ennek megfelelően csupán a projekt ér véget, az összefogást azonban fenntartjuk, sőt, ki kívánjuk terjeszteni, mind több egyetem és főiskola, valamint ipari szereplők és kutatóintézetek bevonásával. A tevékenységek összehangolása, átfogó projektek közös megvalósítása jelentheti a kitörési pontot az elhúzódo gazdasági válságból.

A *Mobilitás és környezet* projektet egyfajta szimbolikus ugródeszkaként is értelmezhetjük, amely megmutatta a fizikai távolságot és egyéb korlátokat is legyőző együttműködés, a megannyi szálon megvalósuló összefogás erejét, modellként, pozitív példaként szolgálva más intézmények számára, egyben megalapozta egy professzionális kutatói és oktatási hálózat kiépítését.

Bízunk benne, hogy az itt ismertetett eredmények vonzó erővel hatnak a járműipari, energetikai és környezeti kutatások által érintett területeken működő ipari szereplőkre, felsőoktatási intézményekre és kutatóintézetekre, akik közül mind többen kapcsolódnak majd be a megkezdett, s máris számos sikert eredményező együttműködésbe.

Mobilitás és környezet



MŰANYAG NANOKOMPOZITOK ELŐÁLLÍTÁSA ÉS VIZSGÁLATA

Hargitai Hajnalka

PhD, egyetemi docens
hargitai@sze.hu

Dogossy Gábor

PhD, egyetemi docens
dogossy@sze.hu

Sági Erik

gépészmérnök

Ibriksz Tamás

járműmérnöki MSc-hallgató

Stifter János

okleveles járműmérnök

Széchenyi István Egyetem Anyagtudományi és Technológiai Tanszék, Győr

Bevezetés

A nanoszerkezetű anyagok tudománya, a nanotechnológiai fejlesztések az utóbbi két évtizedben kerültek a figyelem középpontjába. Magyarországon is számos kutatóhelyen, felsőoktatási intézményben folynak intenzív kutatások ezen a területen. Ezek nemcsak a műszaki, de többek között a fizikai, biológiai, kémiai és orvosi kutatásokat is érintik, melyek eredményeiről különböző nemzetközi és hazai szakfolyóiratokban egyaránt olvashatunk. Többek között a *Magyar Tudomány* 2003/9 számát is ennek a területnek szentelte *Nanotechnológia – az átalakulások tudománya* címmel, amely a téma kimagasló hazai szakértőinek írásaival áttekintést ad a fontosabb hazai kutatási irányokról (Gyulai, 2003). Azóta több magyar nyelvű „nano” szakkönyv is megjelent, melynek szerzői maguk is a nanoszerkezetű anyagok kutatásával, illetve vizsgálatával foglalkoznak: betekintést nyerhetünk a nanoszerkezetű anyagok világába

(Csanády et al., 2009), a nanoelektronikába (Mojzes – Molnár, 2007), és az utóbbi egy-két évben nem egy egyetemi jegyzet is megjelent.

Definíció szerint nanoméretű anyagnak a legalább egyik dimenziójában 100 nm-nél kisebb méretekkel rendelkező részecskéket nevezünk. Különlegességük abban rejlik, hogy ebben a nanométeres tartományban méreteffektusok lépnek fel, például amikor valamely fizikai mennyiség jellegzetes hossza (például az elektronok átlagos szabad úthossza, doménméret stb.) összemérhetővé válik a tanulmányozott anyag geometriai méretével (Csanády et al., 2009).

Nanoméretű, ill. nanoszerkezetű anyagokat ma egyre nagyobb arányban alkalmaznak műanyagok erősítésére is, egyes mechanikai, illetve fizikai tulajdonságok módosítására. Munkánk során többfalú szén nanocső, illetve réteges szerkezetű agyagásvány (montmorillonit) és a tűs szerkezetű szilikát (szepiolit) hatását vizsgáltuk különböző műanyagokban, illetve műanyag keverékekben, ún. *blendekben*.

Műanyag nanokompozitok

Napjainkban a műanyagok rendkívül jelentős szerepet töltenek be a műszaki életben. Anyagcsaládonként számos típus áll rendelkezésre, és a tulajdonságok széles határok között változnak. A növekvő elvárások azonban újabb és újabb anyagok, anyagkombinációk, társított szerkezeti anyagok (kompozitok) kutatását, (ki)fejlesztését teszik szükségessé (Hargitai – Rácz, 2012). A cél egyes tulajdonságok, anyagjellemzők javítása (például mechanikai jellemzők, hőállóság, gázzáró képesség, optikai tulajdonságok) figyelembe véve, illetve szem előtt tartva egyéb megfontolásokat, elsősorban a környezetvédelmi szempontokat és a költséghatékonyság kérdését.

A műanyagok, illetve kompozitjaik gyakorlatilag az ipar minden területén megtalálhatók, ezek közül is kiemelkedő a járműgyártás területe. A járművek tömegcsökkentése az egyik leghatékonyabb módja az energiatartékonyság növelésének és ebből kifolyólag az egyre szigorodó környezetvédelmi előírások teljesítésének.

A polietilén (PE) az egyik legnagyobb mennyiségben gyártott műanyag; készíthetünk belőle fóliát, tasakot, csövet, vegyszeres flakont, csővezeték, de implantátum anyaga is lehet, vagy épp golyóálló mellényben, bukósikokban nyújthat védelmet veszélyes helyzetekben. Természetesen a különböző igénybevételeket nem lehet egyféle anyaggal kielégíteni. Az adott célokhoz más-más típust alkalmaznak, eltérő anyagszerkezettel, különböző fokú rendezettséggel, bár a műanyagot felépítő molekulák minden esetben ugyanazok. A kissűrűségű polietilén (LDPE) a „leggyengébb”, a nagysűrűségű polietilén (HDPE) szerkezetében a rendezettség (kristályos hányad) nagyobb, ezáltal nagyobb a szilárdsága, merevsége, a csőgyártás és a járműgyártás kiváló szerkezeti anyaga (pl. üzemi anyagtartály). A nagymértékben orientált polietilén (HOPE) fajlagos szakítószilárdsága az acélsodronyénak közel hatszorosa, köszönhetően a közel 100%-os kristályos hányadnak, és az ezzel járó kimagasló szilárdsági jellemzőknek, valamint a rendkívül kicsi, 1 g/cm³-nél kisebb sűrűségének (az acélé 7,8 g/cm³). Ezen kívül meg kell említeni az ultranagy molekulasúlyú polietilént (UHMWPE), mely a többi polietilénnel összehasonlítva azonos szilárdság mellett nagyobb ütőhajtó szilárdsággal, nagyfokú kopásállósággal és nagyobb feszültségkorrozíós ellenállással rendelkezik. Ebből készülnek például a térdízület-implantátumok, a mesterséges csípőízületek egyes részei, de síklócsapágys és fogaskerekek is (Czvikovszky et al., 2000).

Az LDPE- és HDPE-típusoknál a feldolgozás ömledék állapotban történik, pl. extrudálással, extrúziós fúvással (flakonok), fröccsöntéssel. Az UHMWPE viszont nem olvasható meg, hasonlóan a teflonhoz (PTFE), ezért a feldolgozása nagy nyomáson szinterezéssel, adalékanyagoktól mentesen történik.

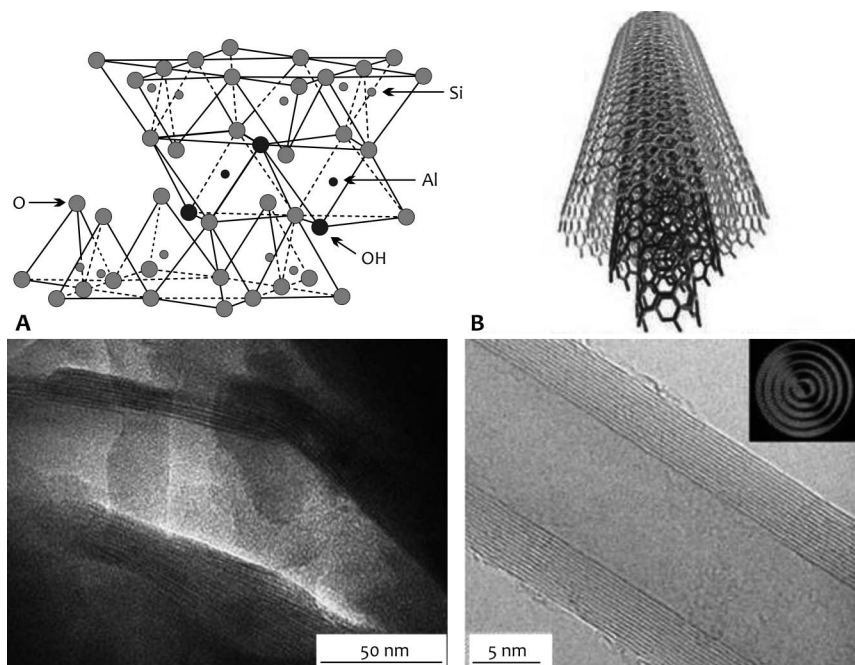
A járműiparban az egyik legelterjedtebben alkalmazott műszaki műanyag a poliamid6 (PA6), többek közt kedvező mechanikai tulajdonságai, jó hőállósága miatt.

Az esetenként felmerülő speciális igények azonban már egyfajta polimerrel önmagában nem teljesíthetők. Két vagy több műanyag összekeverésével, megtartva a polimerek egyedi tulajdonságait a keverékben, úgynevezett polimer blend előállításával ötvözhetjük a különböző anyagok jellemzőit. A tulajdonságok módosítására, javítására mikro, illetve legújabban nanorészecskékkel, szálakkal erősített ún. kompozit szerkezeteket állítanak elő. A komponensek és az összetétel megfe-

elő megválasztásával a rendszer tulajdonságai széles határok között változtathatók. Így kémiai szintézis nélkül, költségkímélő módon állíthatunk elő igényre szabott tulajdonságokkal rendelkező új anyagot.

Polimer rendszerek *nano* erősítőanyagaként kezdetben csak réteges szerkezetű agyagásványokat alkalmaztak. Az ún. *rétegszilikátokban* a nanométeres dimenziót az egyes rétegek vastagsága mutatja. A legelterjedtebben alkalmazott nanoszilikát a *montmorillonit* (1A ábra), melynek alkalmazásával a mikrométerű erősítőanyagokhoz képest nagyobb rugalmassági modulusz és szakítószilárdság érhető el, emellett kisebb a folyadék-, illetve gázáteresztő képességük, ami előnyt jelenthet a csomagolóanyagok vagy a tömítőanyagok területén. Javíthatja a hőállóságot, ezáltal nő a termikus stabilitás, amely különösen fontos

például járművek motorterében alkalmazott polimer alkatrészeknél. A megnövekedett lángállóság az égésgátlásban játszik fontos szerepet, de jobb fényáteresztő képesség, kisebb sűrűség és tömeg érhető el a csupán 1–2 tömegszázalék nanoszilikát bekeverésével, szemben a hagyományos kompozitoknál szokásos 10–30%, vagy ennél is nagyobb tömegarányban alkalmazott erősítőanyagokkal szemben. Megfelelő hatás azonban csak abban az esetben várható, ha egyrészt biztosítani tudjuk a szilikátrétegek szétválasztását és egyenletes elkeverését, diszpergálását a polimer mátrixban, másrészt pedig a szilikátrétegek és a befoglaló anyag határfelületén jó tapadás, erős adhézió alakul ki. A sikeres kompozit előállításához az agyagásványokat módosítani kell. Az organofilizálást a nanorétegek közötti kationcserével végzik, ami biztosítja az



1. ábra • A – a montmorillonit kémiai felépítése és transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) képe; B – A többfalú szén nanocső (MWNT) sématis ábrája és TEM felvétele.

egyes rétegek eltávolítását, és a megfelelően megválasztott funkciós csoportokkal növelhető a kompatibilitás, azaz a nanoszilikát rétegek és a polimer határfelületén megfelelően erős kölcsönhatás hozható létre.

A másik jelentős nanoméretű erősítőanyag a szén nanocső. Polimerek erősítésére többfalú szén nanocsöveket (MWNT) alkalmaznak, melyek gyakorlatilag atomi vastagságú grafitsíkokból feltekert, koncentrikusan egymásban elhelyezkedő csövek (1.B ábra). Ezek külső átmérője 4–30 nm, hosszuk maximum 1 μ m. Ideális szál erősítő anyagok, nagy szilárdság, jó elektromos vezetőképesség, kis sűrűség jellemzi őket, és kiemelkedően nagy az erősítés hatékonyságát tekintve meghatározó szál/átmérő arány (alaki tényező). Polimer mátrixba történő bekeverésénél a legnagyobb problémát a nanocsövek egyenletes eloszlataja jelenti, ez a szén nanocsövek felületének kémiai módosításával javítható. Alkalmazásukkal növelhetők a szilárdsági tulajdonságok, a hőállóság, legnagyobb előnyük azonban a vezetőképesség növelésében rejlik, melyet az elektronikai ipar az antisztatikus viselkedést mutató kompozit alkalmazásokban használ (számítógépek, elektromosan vezető átlátszó bevonatok, napelemek, elektromágneses árnyékolás), de ilyen kompozitokkal például a lökhárítók elektrosztatikus festése is megkönnyíthető. Míg hagyományos korommal min. 16% szükséges ehhez, a nanocsöveknél 1%-nál kevesebb mennyiség elegendő, és a feketétől eltérő szín is kialakítható (Csanády et al., 2009). A kereskedelemben ma már mind a montmorillonit, mind pedig a nanocsövek tekintetében széles választék áll rendelkezésre, kémiaiilag kezelt változatban is.

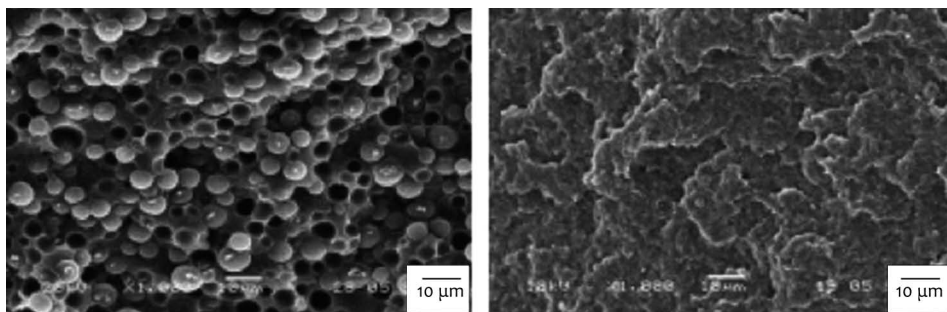
Munkánk során polimer nanokompozitokat állítottunk elő. Elsőként bemutatjuk a HDPE/PA6 polimer blend nanokompozitok

előállításával és vizsgálatával kapcsolatos eredményeinket, majd a szén nanocsővel erősített UHMWPE mátrixú nanokompozitok fejlesztésével kapcsolatos kísérletekről számolunk be.

HDPE/PA6 polimer blend mátrixú nanokompozitok előállítása és vizsgálata

A polietilént gyakran ötvözik poliamiddal. Poliamid6 – polietilén blendek gyártásánál a PA6 kiváló termo-mechanikai tulajdonságait kombinálhatjuk a polietilén könnyebb feldolgozhatóságával, a dinamikus hatásokkal szembeni jó ellenálló képességével és alacsonyabb árával. Mint a legtöbb polimer blendnél, ennél az anyagkombinációnál is számolnunk kell a kémiai inkompatibilitással, azaz hogy a polimereket ömledékfázisban összekeverve a lehűlés után fázisszétválás következik be (2. ábra). Ez gömb alakú, cseppszerű kiválásokat eredményez a fő polimer összetevőben. A keverékek tulajdonságait elsősorban a komponensek között kialakuló kölcsönhatás erőssége és az előállítás körülményei határozzák meg (Cong et al., 2008). A fázisszeparáció miatt és nem megfelelő határfelületi tapadás következtében pl. a törési szívósság jelentősen csökkenhet (Filippone et al., 2010).

Az utóbbi években a hagyományosan alkalmazott kémiai kapcsolóanyagok mellett a nanoméretű részecskék mint kompatibilizálószer hatását is egyre szélesebb körben vizsgálják polimer blendekben (Elias et al., 2007). A nanorészecskék erőteljesen befolyásolják a nem elegyedő polimer keverékek mikroszerkezetét, például a kisebb fázis méretének jelentős csökkenését okozzák (Chow et al., 2005, Lee et al., 2006, Mallick – Khatua, 2011). Montmorillonit agyagásvány alkalmazásával emellett pl. a labirintushatás (barrier) következtében javulhat a gázáró képesség és



2. ábra • Pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) felvételek: PA46/HDPE (8/2) blend (bal) és 5 tömeg% HDPE-g-MAH-kapcsolóanyaggal (jobb) (Cong et al., 2008)

a hőállóság, de a mechanikai tulajdonságokat is javíthatja.

Sumana Mallick és társai ömledékkeverés eljárással készült, agyagásvány tartalmú polimer blend nanokompozitokat állítottak elő kémiai kapcsolóanyag alkalmazásával és anélkül. Kompatibilizálószerként (kapcsolóanyagként) maleinsav anhidriddel ojtott polietilént (PEgMA) használtak és azt tapasztalták, hogy kis mennyiségű, mindössze 1 tömeg% PEGMA növelte a szakítószilárdságot és a blend rugalmassági modulusát, de az adalékanyag arányának növelésével mindkét paraméter csökkent (Mallick – Khatua, 2011).

Kísérleteink során PA6/HDPE-blendeket állítottunk elő. Kompatibilizálószerként maleinsav anhidriddel ojtott polietilént használtunk. A blendeket emellett különböző nanoméretű erősítőanyagokkal kompozitáltuk. Réteges szerkezetű agyagásványt, montmorillonitot és tűs szilikátot, szepiolitot alkalmaztunk különböző koncentrációban és vizsgáltuk hatásukat a mechanikai tulajdonságokra és a feldolgozhatóságra.

Alkalmazott anyagok, előállítás és vizsgálatok

A kísérleteknél alkalmazott anyagok az alábbiak voltak:

- nagysűrűségű polietilén (HDPE, TIPELIN 6000B [TVK], MFR: 1,30 g/10 perc [5 kg 190 °C]), és poliamid6 (PA6, HVF [A. Schulman]),
- PEGMA kémiai kapcsolóanyag (Polybond 3009 [Chemtura Corp.] – PEGMA [Mw = 186000]) 0,5; 1; illetve 3 tömeg%-os arányban (a mátrixanyag össztömegére vonatkoztatva),
- lemezes szerkezetű rétegszilikát: montmorillonit (MMT, Cloisite 20 A, Southern Clay Products), és tűs szerkezetű szepiolit (SEP, Pangel S9, Tolsa SA), előbbi 1 és 3 tömeg%-ban, utóbbi 0,5 és 1 tömeg%-ban (a mátrixanyag össztömegére vonatkoztatva).

A 75 tömeg% HDPE- és 25 tömeg% PA6-polimerek kompaundálását ömledékkeveréssel végeztük laboratóriumi ikercsigás extruderben (Lab-Tech Scientific) (180–240 °C), majd fröccsöntéssel (Engel ES 200H/80V/50HL-2F-2K) állítottunk elő 4x10 mm-es keresztmetszetű szabványos piskóta alakú próbatesteket (MSZ EN ISO 527-2). A szabványos hajlító-, illetve ütővizsgálathoz használt próbatesteket a szakító próbatestekből alakítottuk ki. Az extrudálás előtt a PA6-polimert, fröccsöntés előtt pedig minden

blendet minimum 16 órán keresztül 80 °C-on szárítottuk.

A szakítóvizsgálatot Instron 3344 típusú számítógép-vezérelt egyoszlopos szakítógéppel, szobahőmérsékleten, az MSZ EN ISO 527-2 szabvány szerint végeztük. A háromponthoz hajlító vizsgálatot Instron 5582 típusú univerzális számítógép-vezérelt berendezésen, szobahőmérsékleten kiviteleztek, az MSZ EN ISO 178 szabványnak megfelelően. A műanyagok ütéshajlító vizsgálatához egy 15 J-os kalapáccsal felszerelt CEASt Resil Impactor Junior 8545/000 típusú Charpy-féle ingás ütőművet használtunk az MSZ EN ISO 179-1:2000/Ar:2005 szabvány előírásai szerint. A blendek folyási tulajdonságait CEASt 7026 típusú folyásindex-mérő berendezésen mértük 240 °C hőmérsékleten és 10 kg terhelés mellett.

Eredmények és értékelésük

Azt vártuk, hogy a nanoszerkezetű agyagásványok hozzáadásával a mikroszerkezet megváltozik, a gömb formájában kiváló egyik polimerfázis finomodik, és ezáltal javulnak a mechanikai tulajdonságok.

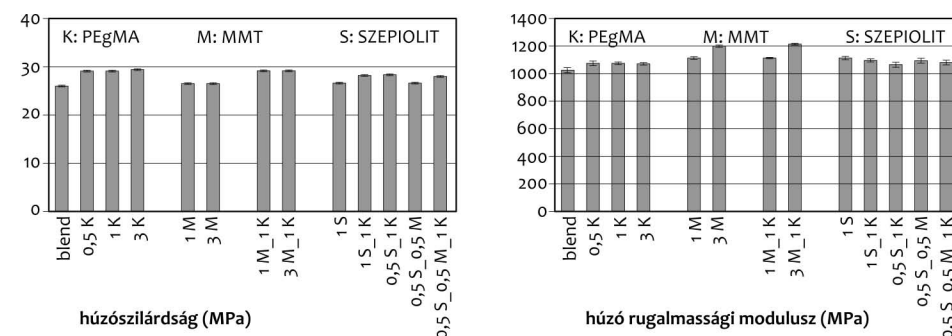
Az egymással nem elegyedő műanyagok, illetve a mátrix- és a nanoanyagok közötti

tapadás növekedését kémiai kapcsolóanyag hozzáadásától reméltük. Kíváncsiak voltunk továbbá, hogy különböző szerkezetű agyagásványok együttes alkalmazása eredményez-e valamilyen különleges (szinergetikus) hatást.

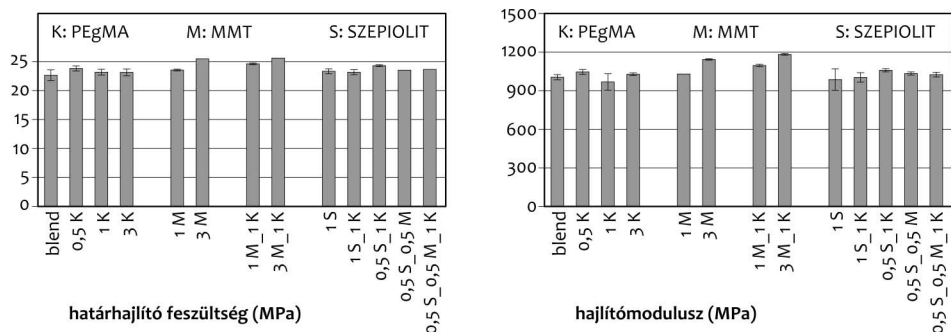
A szakítóvizsgálat eredményei alapján megállapítható, hogy a PEGMA-kapcsolóanyag alkalmazása egyértelműen növelte a húzószilárdságot a kiinduló blendhez képest, önmagában és nanoásvánnyal alkalmazva egyaránt (3. ábra). A legnagyobb szilárdsági jellemzőt 3% PEGMA bekeverésével (13%) érték el. A blendek adalékolása mindig növekedést eredményezett a húzó rugalmassági modulusz értékekben is, szemben a szilárdsággal, azonban az erőteljesebb hatást a montmorillonit mutatta. 3% MMT hozzáadása önmagában és kapcsolóanyaggal kombinálva is közel 20%-os javulást eredményezett.

A hajlító tulajdonságokat a kapcsolóanyag alkalmazása nem, vagy csak kismértékben javította, és kizárólag 3%-os montmorillonit-tartalom mellett volt tapasztalható számottevő javulás (~ 20%) (4. ábra).

Köztudott, hogy a merevség, ami arányos a rugalmassági moduluszal, a szívóssággal, azaz a dinamikus hatásokkal szembeni ellenálló képességgel ellentétes kapcsolatban áll. A



3. ábra • Húzószilárdság- és Young-modulusz-eredmények (jelölés értelmezése: 0.5 K = 0,5 tömeg% kapcsolóanyagot [PEGMA] tartalmazó blend)



4. ábra • A hajlító vizsgálat eredményei: határhajlítófeszültség- és hajlítómodulus-értékek

blendek ütvhajlító szilárdság értékei az 5. ábrán láthatók, és a korábban ismertett eredményekkel összevetve jól tükrözik az említett tendenciát. Ahogy az előre várható volt, a legnagyobb növekedést a 0,5 tömeg% kapcsolóanyag bekeverése eredményezte (23%). 1% nanoásvány, illetve a két nanoásvány együttes alkalmazása szintén kedvező eredményeket hozott.

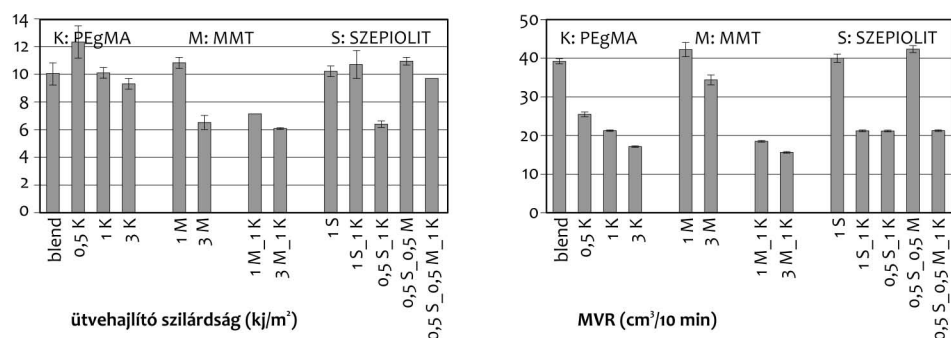
A folyóképeség-vizsgálat során a kapilláris plaztométerrel közvetlenül az MVR- (Melt Voume Rate) értéket határoztuk meg (5. ábra), ami megmutatja, hogy a vonatkozó szabványban előírt hőmérsékleten, és terhelő hatására a szabványos mérőkészülék (kapilláris plaztométer) kifolyónyílásán tíz

perc alatt hány cm³ polimer ömledék folyik ki. A kapcsolóanyag jelentősen csökkentette a blend folyóképeségét, míg az 1%-ban alkalmazott nanoanyagok, illetve a két nanoásvány kombinációja nem rontotta, sőt kis mértékben még javította is a feldolgozhatóságot.

Összefoglaló megállapítások

A vizsgálatok alapján megfogalmazható legfontosabb eredmények az alábbi pontokban összegezhetők:

- HDPE/PA6- (75/25) blendek statikus mechanikai tulajdonságai 31% MMT, valamint 1% PEGMA és 3% MMT hatására növekedtek (húzó- és hajlítómodulus



5. ábra • Ütvhajlító szilárdság (kJ/m²) és a folyóképeséget jellemző MVR- (cm³/10 perc; 240 °C, 10 kg) értékek

egyenként 18–20%), míg az ütvhajlító szilárdság jelentősen csökkent.

- 0,5% PEGMA nem, vagy csak kis mértékben növelte a szakító, illetve hajlító tulajdonságokat, viszont a dinamikus hatással szembeni ellenállás 23%-kal javult. 1% nanoásvány alkalmazása kapcsolóanyag nélkül is kedvezően befolyásolta az ütvhajlító szilárdságot, míg a statikus mechanikai tulajdonságokat nem vagy csak kis mértékben javította.
- A folyóképeséget az 1%-ban bekevert nanoanyagok külön-külön, illetve egymással kombinálva kismértékben javították, míg az összes többi esetben kisebb értéket mértünk.

Többszálú szén nanocsővel erősített UHMWPE-kompozitok

A szakirodalom alapján elmondható, hogy a szén nanocső polimerekben történő alkalmazására igen nagyszámú kutatást folytattak az elmúlt évtizedekben. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a CNT-vel történő erősítés következtében különböző mechanikai tulajdonságok, mint például szakítószilárdság, rugalmassági modulus, ütvhajlító szilárdság, valamint fizikai tulajdonságok, mint például kopásállóság, vezetőképesség kedvező irányban változtathatóak (Kanagaraj et al., 2007; Belina – Ádámné Major, 2009). A kompozit-előállítási technikák közül a legelterjedtebb, az ömledékkeverés eljárás (Zhang et al., 2011), mely megfelelő homogenitást, illetve határfelületi kapcsolatot biztosít a keverékeknek. Vannak azonban olyan anyagok, amelyek hőérzékenyséjük miatt nem alkalmasak az ömledékkeverés előállításra, ezekből az anyagokból valamilyen száraz keverés eljárással lehet kompozitot készíteni (Esawi et al., 2010). Erre is többféle megoldás létezik

(szabadeséselvű, eltoláselvű keverőlapátos, eltolás- és repítéselvű fekvő henger keverő, centrifugális elvű nagysebességű örvény keverő), ám ezek hatásfoka nem minden esetben kielégítő (Czvikovszky et al., 2000). A ma divatos nanokompozitok gyártása során biztosítani kell a homogén eloszlást, hogy elérhessük a kívánt erősítő hatást, illetve csökkenteni kell az aggregátumképződés lehetőségét (Campo – Visco, 2010; Mészáros et al., 2007). Ezért a hagyományos száraz keverőgépek nem alkalmasak ezen anyagok összekeverésére, egy újfajta módszer, a golyós malmos keverés viszont teljesítheti a követelményeket.

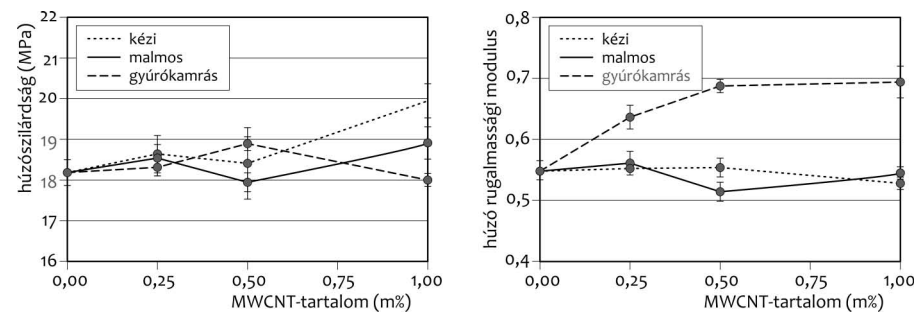
Alkalmazott anyagok, előállítás és vizsgálatok

A kísérleteknél alkalmazott anyagok az alábbiak voltak:

- mátrixanyagként GUR 4120 típusú ultranagy molekulatömegű polietilént (UHMWPE) használtunk (Ticona),
- amelyhez a Pannon Egyetem Vegyipari Műveleti Intézeti Tsz. által gyártott többszálú szén nanocsövet (MWCNT) adalékoltunk 0,25; 0,5 és 1 tömeg% arányban.

A blendeket háromféle módon állítottuk elő: ömledékkeveréssel (Brabender Plasti Corder gyúrókamrával), szobahőmérsékleten végzett kézi keveréssel, illetve golyós malomban homogenizálva (o1HD/HDDM Union Process). Az előkevert kompozitokból 170 × 170 × 4 mm-es lemezeket préseltünk Labtech LP-20B berendezéssel 220 °C-on 150 bar nyomással 10 perc előmelegítéssel, 10 perc hűtőzárral, majd 6 perc 80 °C-os folyadék-hűtéssel. A préselt lapokból szakító és hajlító próbatesteket vágtunk ki.

A próbatesteken szakítóvizsgálatot, hárompontos hajlítóvizsgálatot, ütvhajlító vizsgálatot végeztünk az előző fejezetben megadott berendezéseken a vonatkozó szabványok



6. ábra • A különböző keverési módok hatása a húzó igénybevétellel szemben az egyes MWCNT-tartalmak esetében

előírásai szerint. A koptató vizsgálatokat Taber Linear Abreser 5750 típusú műszerrel végeztük, a kiértékelése tömegcsökkenés-méréssel, és felületi érdesség mérésével történt.

Eredmények és értékelésük

A kísérletek során a kézi és a golyós malmos száraz keverési eljárásokat hasonlítottuk össze a belső keverővel végzett ömledékkeverési eljárással. A 6. ábra a szakítóvizsgálatok eredményeit foglalja össze. Megállapítható, hogy a nanocsőtartalom a húzószilárdságot nem befolyásolta lényegesen egyik eljárásnál sem, a modulust azonban ömledékkeverés esetén szignifikánsan növelte. A száraz keverési eljárások során kapott közel állandó modulusértékek az aggregátképződésre utalnak, amiből az eljárások alacsony hatásfokára lehet következtetni.

A 7. ábrán a hárompontos hajlítóvizsgálat eredményei láthatóak. A határhajlító szilárdság, valamint a hajlító modulus esetében is az ömledékkeverés eljárásnál tapasztaltunk tulajdonságjavulást, a többfalú szén nanocső mennyiségének növelése során. A hajlító tulajdonságok változása a kézi- és a golyós malmos keverés esetében először csökkent, majd 1 m%-os arányánál növekedésnek indult. Ez arra utal, hogy ezeknél a keverési eljárások-

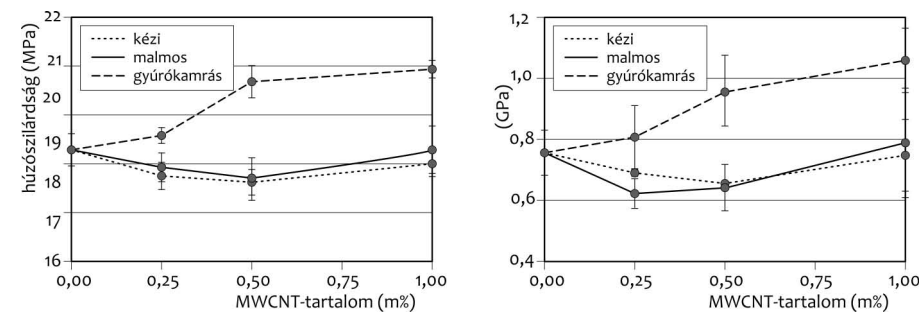
nál még nem értük el az optimális MWCNT-tartalmat, mennyiségének növelése valószínűleg erősítő hatást eredményezne.

Az ütvehajlító szilárdságot a MWCNT szintén ömledékkeverésnél befolyásolta a legnagyobb mértékben, növekvő nanocsőtartalomnál az értéke nagymértékű csökkenést mutatott (8. ábra). A dinamikus mechanikai igénybevétellel szembeni ellenállás változása kézi és golyós malmos keverés esetében ezeknél az összetételi arányoknál nem mutatott egyértelmű trendet. A változások a mérési hibahatárok tartományán belül maradtak, az átlagértékek csekély csökkenést mutatnak.

A koptató vizsgálatok eredményeit elemelve megállapítható, hogy az ömledékkeveréssel előállított kompozitok koptatás utáni átlagos felületi érdessége csökken legnagyobb mértékben a nanocsőtartalom növelésének függvényében, a kézi és a malmos keverésű anyagoknál ez az érték kisebb mértékű kezdeti csökkenés után növekszik. A 9. ábra a száz koptatási ciklus utáni tömegvesztés ábrázolja, a nanocső-adalékolás ezt az értéket mindhárom keverési módnál csökkentette.

Összefoglaló megállapítások

A vizsgálatok alapján megfogalmazható eredmények az alábbi pontokban összegezhetők:



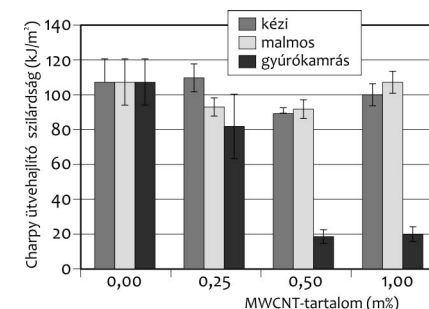
7. ábra • A különböző keverési módok hatása a hajlító igénybevétellel szemben az egyes MWCNT-tartalmak esetében

- ömledékkeverésnél a szén nanocső tartalom függvényében nőtt a statikus igénybevétellel szembeni; csökkent a dinamikus igénybevétellel szembeni ellenállás, ami homogénebb nanocső-eloszlásra utal,
- homogén eloszlás esetén a szén nanocső a molekulaláncozat jobban tördeli, ami a mikro-Brown-mozgások nagyobb gátlását teszi lehetővé,
- a homogén eloszlás következtében továbbá a nanocső jobban fel tudja venni a statikus terhelést is.

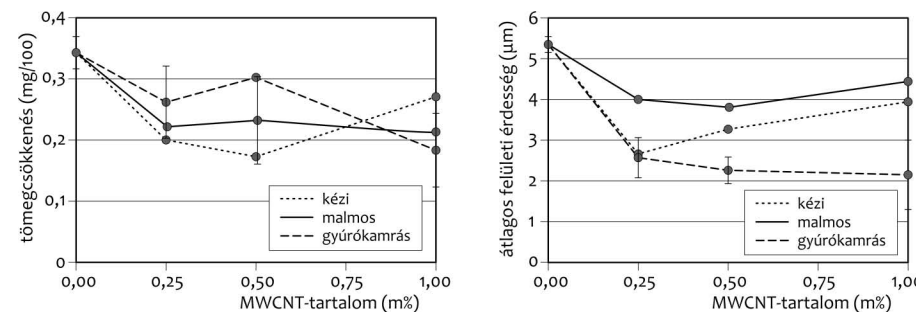
Konklúzió

Fenti eredményekből jól látszik, hogy a polimerek tulajdonságainak módosítására számos lehetőség kínálkozik, kombinálhatunk

különböző polimereket, erősíthetjük a mátrixot nemcsak a hagyományos mikro-, de nanoszerkezetű erősítőanyagokkal is, melyek kombinálása szintén számos előnyt tartogat.



8. ábra • A különböző keverési módok hatása az ütvehajlító igénybevétellel szemben az egyes MWCNT-tartalmak esetében



9. ábra • A különböző keverési módok hatása a koptató igénybevétellel szemben az egyes MWCNT-tartalmak esetében

A szálerősítés előnyeit azonban csak abban az esetben tudjuk maximálisan kihasználni, ha biztosítani tudjuk az erősítőanyagok homogén eloszlását a polimer (blend) mátrixanyagban, és egyidejűleg a komponensek között jó kapcsolatot, megfelelő határfelületi adhéziót sikerül kialakítani.

A kutatást a TÁMOP 4.2.1/B-9/1/KONV-2010-0003 számú pályázat támogatja: Mo-

bilitás és környezet: Járóipari, energetikai és környezeti kutatások a Közép- és Nyugat-Dunántúli Régióban. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Kulcsszavak: *nanokompozit, szén nanocső, montmorillonit, szepiolit, PA6, HDPE, UHMWPE, polimer blend, extrudálás*

IRODALOM

- Belina K. – Ádámné Major A. (2009): Többfalú szén nanocső tartalmú kompozitok vizsgálata. *Műanyag és Gumi*. 46, 231–233.
- Campo, N. – Visco, A. M. (2010): Incorporation of Carbon Nanotubes into Ultra High Molecular Weight Polyethylene by High Energy Ball Milling. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. 15, 438–449.
- Chow, W. S. – Mohd Ishak, Z. A. – Karger-Kocsis J. (2005): Morphological and Rheological Properties of Polyamide 6/Poly(propylene)/Organoclay Nanocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering*. 290, 2, 122–127.
- Cong, P. – Xiang, F. – Liu, X. – Li, T. (2008): Effect of Crystalline Form on the Tribological Properties of PA46/HDPE Polyblends. *Wear*. 265, 7–8, 1106–1113.
- Csanády Á. – Hargitai H. – Konczos G. (2009): Kompozitok-nanokompozitok II.2.1. fejezet. In: Csanády Á. – Kálmán E. – Konczos G. (szerk.): *Bevezetés a nanoszerkezetű anyagok világába*. ELTE Eötvös, Budapest
- Czvikovszky T. – Nagy P. – Gaál J. (eds.) (2000): *A polimertechnika alapjai*. Műegyetemi, Budapest
- Elias, L. – Fenouillot, F. – Majesté, J. C. – Cassagnau, P. (2007): Morphology and Rheology of Immiscible Polymer Blends Filled with Silica Nanoparticles. *Polymer*. 48, 6029–6040.
- Esawi, A. M. K. – Salem, H. G. – Hussein, H. M. – Ramadan, A. M. (2010): Effect of Processing Technique on the Dispersion of Carbon Nanotubes within Polypropylene Carbon Nanotube-Composites and Its Effect on Their Mechanical Properties. *Polymer Composites*. 31, 772–780.
- Filippone, G. – Dintcheva, N.Tz. – La Mantia, F. P. – Acerno D. (2010): Using Organoclay to Promote Morphology Refinement and Co-Continuity in High-density Polyethylene/Polyamide 6 Blends – Effect of Filler Content and Polymer Matrix Composition. *Polymer*. 51, 3956–3965.
- Gyulai J. (ed.) (2003): Nanotechnologia. *Magyar Tudomány*. 9, 1076–1082.
- Hargitai H. – Rácz I. (2012): *Applications of Macro- and Microfiller-Reinforced Polymer Composites*. In: Sabu, T. et al. (eds.): *Polymer Composites*. Vol. 1, Wiley-VCH, Weinheim, 749–791
- Kanagaraj, S. – Varanda, F. R. – Zhiltsova, T. V. – Oliveira, M. S. A. – Simoes, J. A. O. (2007): Mechanical Properties of High Density Polyethylene/Carbon Nanotube Composites. *Composites Science and Technology*. 67, 3071–3077.
- Lee, M. H. – Dan, C. H. – Kim, J. H. et al. (2006): Effect of Clay on the Morphology and Properties of Pmma/Poly(Styrene-Co-Acrylonitrile)/Clay Nanocomposites Prepared by Melt Mixing. *Polymer*. 47, 4359–4369.
- Mallick, S. – Khatua, B. B. (2011): Morphology and Properties of Nylon6 and High Density Polyethylene Blends in Absence and Presence of Nanoclay. *Journal of Applied Polymer Science*. 121, 1, 359–368.
- Mészáros L. – Ronkay F. – Oláh L. – Dogossy G. – Czigány T. (2007): *The Effect of the Extrusion Temperature on the Mechanical Properties of MMT Filled PA6*. Eurofillers 2007 konferencia, Zalakaros
- Mojzes I. – Molnár L. M. (2007): *Nanotechnologia*. Műegyetemi, Budapest
- Zhang, Z. – Peng, K. – Chen, Y. (2011): Mechanical Performance of Ozone Functionalized MWCNTs/PC Nanocomposites. *EXPRESS Polymer Letters*. 5, 516–525.

SZÉN NANOCÖVEK: ELŐÁLLÍTÁS ÉS ALKALMAZÁS

Szentes Adrienn Varga Csilla

MSc, egyetemi tanársegéd, PhD, egyetemi adjunktus,
Pannon Egyetem Vegyészmérnöki és Folyamatmérnöki Intézet
szentesa@almos.uni-pannon.hu vcsilla@almos.uni-pannon.hu

Horváth Géza Bartha László

CSc, egyetemi docens, CSc, egyetemi tanár,
Pannon Egyetem Vegyészmérnöki és Folyamatmérnöki Intézet

Kónya Zoltán

DSz, egyetemi tanár,
Szegedi Tudományegyetem Alkalmazott és Környezeti Kémiai Tanszék

Kivonat

Többfalú szén nanocsöveket (MWCNT) állítottunk elő szénhidrogének katalitikus bontásával egy forgóüzemű nagylaboratóriumi berendezésben. A hozamot a katalizátor és a szénforrás minőségén és a hőmérsékleten túl számos paraméter befolyásolja. Vizsgáltuk a katalizátorhordozó típusának szerepét, majd az etilén áram- és a vízkoncentráció hatását a hozamra. A termékek morfológiai jellemzőit transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) vizsgáltuk. A szén nanocsőnek számos alkalmazási területe lehet a műanyagiparban, ezek közül néhány polipropilénnel (PP) elért eredményt ismertetünk.

1. Bevezetés

A szén nanocsöveket (CNT) Iidzima Szumio (Sumio Iijima) fedezte fel 1991-ben, amikor ívkiüléssel módszerrel előállított, ún. fullerén korommintát vizsgált transzmissziós elektron-

mikroszkóppal (Iijima, 1991). Ezt követően szén nanocsövek előállítására a kilencvenes években számos módszer dolgoztak ki (Yacaman et al., 1993; Guo et al., 1995). Kimutatták, hogy elektromos ívet, illetve lézert alkalmazó eljárásokkal jellemzően kis mennyiségű, de szabályozott átmérőjű és hosszúságú csövek állíthatók elő, míg alacsonyabb hőmérsékleten katalitikus módszerekkel szabálytalanabb, több hibát tartalmazó, de nagyobb mennyiségű szén nanocső állítható elő. A szén nanocsövek ipari előállítása azonban a módszertől függetlenül továbbra is nehézségekbe ütközik.

Többfalú szén nanocsövek nagy mennyiségben történő előállítására legalkalmasabb módszernek a szénhidrogének gázfázisú katalitikus bontása (CVD, az angol *chemical vapor deposition* elnevezésből) bizonyult. A módszer alapja, hogy átmeneti fémek oxidjait vagy sóit hordozón rögzítik, ezt a katalizátort 700–1000°C közötti hőmérsékletre fűtik, majd szénhidrogéneket vezetve a rendszerbe a

bomlás során a katalizátoron szén nanocsövek képződnek. A szén nanocsövek szintéziséhez alkalmazott átmenetifém alapú katalizátorok között külön csoportot képviselnek a kétfémes katalizátorok. A kétfémes katalizátorok közül, kiugró aktivitásuk és szelektivitásuk alapján, ki kell emelni a Fe–Co- és a Ni–V-tartalmúakat. A Fe-, illetve a Co-tartalmú, egyfémes katalizátorok önmagukban is nagy aktivitást és jó szelektivitást mutattak, a szénlerakódásból számolt hozam alapján a Fe–Co katalizátor aktivitása azonban jelentősen meghaladja az egyfémes minták járulékaiból összeadódó együttes aktivitást. A katalizátor minőségén kívül a katalizátorhordozó szerepe is jelentős. Feltételezhető, hogy a katalizátor aktivitása összefügg a fém és a hordozó között kialakult kölcsönhatással. Ha a kölcsönhatás erős a katalizátorhordozó és a katalizátor anyaga között, a katalizátor részecske nem tud leszakadni a hordozóról, emiatt nem kezdődik el a nanocsőképződés. Ha viszont a kölcsönhatás gyenge, a részecske elszakad a hordozótól, és megindulhat a szén nanocső-növekedés (Kónya, 2002).

A szén nanocsövek növekedése időben nem állandó. A csövek hossza a reakció kezdetén gyorsan nő, idővel a folyamat lelassul, majd leáll. A jelenség a katalizátor aktivitásával függ össze. A növekedési sebesség a szénhidrogén (itt etilén) térfogatáramával nő, mert a nanocső növekedéséhez szükséges szénforrás egységnyi katalizátormennyiségre vonatkoztatva nő. A katalizátor élettartama viszont csökken az etilén térfogatáramának növekedésével, mivel a szénforrás egyre gyorsabb felhalmozódása miatt amorf szén is keletkezik, amely lerakódik a katalizátoron, s ezzel meggátolja a csövek növekedését (Futaba et al., 2005). A két paraméter ellentétes hatása miatt az etilén térfogatáramának optimuma van.

Bizonyították, hogy kis mennyiségű vízgőz jelenléte növeli a katalizátor aktivitását és élettartamát (Hata et al., 2004). Szabályozott mennyiségű víz hozzáadásával 2,5 mm hosszú egyfalú szén nanocsövek alakultak ki, amelyek rendkívül hosszúnak számítanak. A katalizátor tömegére vonatkoztatott hozam meghaladta az ötszázszorosot. A módszer *super growth CVD*, illetve *water-assisted CVD* elnevezésekkel került a szakirodalomba. Ezután reakcióban a vízgőz szerepét többen vizsgálták (Liu et al., 2010; Okamoto et al., 2011). A víz optimális mennyiségét tekintve az irodalmi értékek jelentősen eltérnek egymástól, 1000 ppm és 20 000 ppm között változnak.

A szén nanocsövekkel kapcsolatosan jelenleg intenzív kutatások folynak a nagy mennyiségű, gazdaságos, jó minőségű szén nanocső előállítására, a műanyagokban való egyenletes eloszlására és a nanocső/polimer határfelületi adhéziójának növelésére. Bár egyik problémára sem találtak még általánosan alkalmazható műszaki megoldást, a polimerek nanocsővel történő erősítésének mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását többen vizsgálták (Coleman et al., 2006).

A kedvező mechanikai szilárdságú nanokompozitok fejlesztése során két kritikus tényezőt vesznek figyelembe: a szén nanocső megfelelő diszperzióját a mátrixon belül, illetve a nanocső és a mátrix közötti erős határfelületi kölcsönhatás szükségességét. Ezen túlmenően még a szennyezések következményével is számolni kell. A szén nanocsövek tisztítása költséges folyamat. Ha például olyan katalizátorhordozót alkalmazunk, amely a szén nanocsövek felhasználása során nem okoz problémát, akkor a tisztítási lépés kihagyható. Munkánk során katalizátorhordozóként talkumot és kalcium-karbonátot használtunk. Mindkét hordozó használatos

a műanyagiparban adalékanyagként, így a rajtuk növesztett szén nanocsövek akár tisztítás nélkül adhatók a polimer mátrixhoz.

A diszperzió finomítására és a határfelületi adhézió javítására számos felületkezelő és módosító eljárást dolgoztak ki (Chen et al., 2008). Ide sorolható például a nagy koncentrációjú savakkal (kénsav, salétromsav) vagy savak elegyével történő kezelés (Xiao, 2008); kémiai módosítás UV-fénnyel, ózonnal, kálium-permanganáttal vagy hidrogén-peroxiddal végzett oxidációval (Špitalský et al., 2009); polimer láncok ojtása a felületre különböző módszerekkel (Coleman et al., 2006); szilán kapcsoló ágensek alkalmazása (Xiao et al., 2008); valamint ezek kombinációja (Prashantha et al., 2009).

Munkánk célja egyrészt, hogy a CNT-gyártó nagylaboratóriumi berendezés működési paraméterei és a CNT hozama, illetve alakú tulajdonságai közötti összefüggéseket meghatározzuk. Másrészt pedig, mivel a szén nanocsöveket műanyagipari felhasználásra állítottuk elő, ilyen irányú kísérleteink néhány eredményét ismertetjük.

2. Kísérletek

2.1. Felhasznált anyagok • A szén nanocsövek előállításánál szénforrásként 99,9% tisztaságú etilént (Messer Hungarogáz Kft.), öblítógázként és vivőgázként 99,5% tisztaságú nitrogént alkalmaztunk (Linde Gáz Magyarország Zrt). Az etilén nedvesítésére desztillált vizet használtunk.

A katalizátorokat a Szegedi Tudományegyetem Alkalmazott és Környezeti Kémia Tanszéke állította elő. A katalizátorok kétfémes katalizátorok voltak, amelyek készítéséhez vas-nitrátot ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) és kobalt-acetátot ($\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) használtuk. A hordozóra vitt fém sók koncentrációja

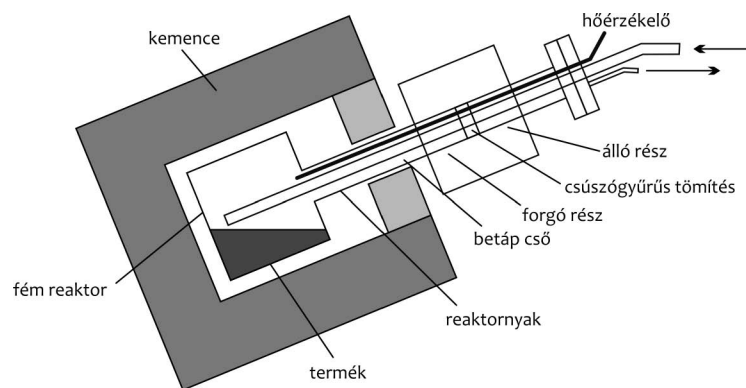
vasra és kobaltra vonatkoztatva is 2,5 m/m% volt. A hordozó kalcium-karbonát (CaCO_3), illetve talkum volt.

A polimer kompozitokhoz mátrixként polipropilént használtunk, melynek folyási mutatószáma (MFI) 25,0 g/10 perc 230 °C-on és 2,16 kg terhelés mellett, húzószilárdsága 34,5 MPa, húzó modulusza 1450 MPa, a folyáshatárnál fellépő nyúlása pedig 10%. Erősítőanyagként a Pannon Egyetemen gyártott, ~80% tisztaságú többfalú szén nanocsöveket, illetve a belga Nanocyl cégtől vásárolt NC 7000 márkajelzésű, ~90% tisztaságú nanocsöveket alkalmaztunk. A csövek átmérője jellemzően 10–20 nm közötti, hosszuk 1–50 µm tartományban változik.

2.2. Kísérletek bemutatása • A kísérleteket nagylaboratóriumi berendezésben végeztük (1. ábra). A reaktorba 5 g katalizátort töltöttünk, majd a reaktort 30 percen keresztül, forgatás közben 100 dm³/h nitrogén árammal öblítettük. Ezután a reaktort 710 °C-ra fűtöttük, majd 30–360 dm³/h etilént vezettünk a reaktorba. A kísérletekhez szükséges 10–120 perc elteltével megszüntettük az etiléngáz bevezetését, és öblítógáz áramoltatása mellett hűlni hagytuk a reaktort. A terméket zárt szívórendszeren keresztül gyűjtőedénybe szedtük. A termék makroszkopikus megjelenése sajátos, mélyfekete színű, a levegőben könnyen szálló, pelyhes szerkezetű, tapintása szivacszerű volt.

2.3. Vizsgálati módszerek • A szén nanocsövek előállításánál hozam alatt nem a klasszikus értelemben vett hozamot, hanem a katalizátor tömegére vonatkoztatott értéket értjük, amely megmutatja, hogy egységnyi tömegű katalizátoron mennyi szén nanocső képződött (1. sz. egyenlet, a következő oldalon).

A konverziót a keletkezett termék mennyisége alapján határoztuk meg. A termék tar-



1. ábra • A nagylaboratóriumi berendezés vázlata

talmazza a katalizátort is, ezért a termék tömegéből ($m_{\text{termék}}$) minden esetben kivontuk a katalizátor tömegét ($m_{\text{katalizátor}}$), így kaptuk a szén nanocsövek tömegét ($m(\text{CNT}_{\text{mért}})$) (2. sz. egyenlet, lent).

A termék gázok összetételét egy Carlo Erba FRACTOVAP 2400T típusú hővezető-képességű detektorral működő 5A zeolitkolonás gázkromatográf (GC) mértük. A mérések során a detektor hőmérséklete 150 °C, a kolonna hőmérséklete pedig 100 °C volt. Vivőgázként argont használtunk.

A szén nanocsövek transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) felvételei a Szegedi Tudományegyetem Alkalmazott és Környezeti Kémia Tanszékén készültek, egy Philips CM10 típusú transzmissziós elektronmikroszkóppal. A pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) felvételeket egy Hitachi S-3000N típusú elektronmikroszkóppal készítették.

3. Eredmények

3.1. Paraméteroptimalizálás • 3.1.1. A katalizátorhordozó szerepe • Kísérleteink során vizsgáltuk a katalizátorhordozó szerepét. Hordozóként talkumot és kalcium-karbonátot használtunk. A Szegedi Tudományegyetemen elvégzett alapkísérletek során nem adódott különbség a talkum és a kalcium-karbonát alkalmasságát illetően. A nagylaboratóriumi berendezésben azonban a talkumhordozós katalizátorral lényegesen jobb eredmények születtek, mint a kalcium-karbonát esetén. A kísérletek paramétereit és az eredményeket az 1. táblázat tartalmazza. Etilén esetén nincs szükség vivőgázra, ám a gázkromatográf (GC) kolonnája nem alkalmas etilén kimutatására, ezért ismert mennyiségű vivőgázt (nitrogént) adtunk az etilénhez, hogy a kilépő gázban a hidrogén mennyiségét elemezzni

$$\text{Hozam (\%)} = \frac{m_{\text{termék}} - m_{\text{katalizátor}}}{m_{\text{katalizátor}}} \times 100 = \frac{m(\text{CNT}_{\text{mért}})}{m_{\text{katalizátor}}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Konverzió (\%)} = \frac{m_{\text{termék}} - m_{\text{katalizátor}}}{m(\text{CNT}_{\text{elméleti}})} \times 100 = \frac{m(\text{CNT}_{\text{mért}})}{m(\text{CNT}_{\text{elméleti}})} \times 100 \quad (2)$$

kód	kat. hord. típusa	C ₂ H ₄ áram (dm ³ /h)	N ₂ áram (dm ³ /h)	reakcióidő (perc)	$m(\text{CNT}_{\text{mért}})$ (g)	konverzió (%)	hozam (%)
T2/4	talkum	20	40	120	28,8	72,0	576
T3/3	talkum	30	30	90	33,9	84,8	678
T4/2	talkum	40	20	60	30,7	76,8	614
Ca2/4	CaCO ₃	20	40	120	13,3	33,3	266
Ca3/3	CaCO ₃	30	30	90	11,1	27,8	222
Ca4/2	CaCO ₃	40	20	60	12,3	30,8	246

1. táblázat • A katalizátorhordozó hatása a termékhozamra

tudjuk. A reakcióidőket úgy választottuk meg, hogy minden kísérlet során a rendszerbe összesen 40 dm³ (20 °C-on és atmoszférikus nyomáson), azaz 1,67 mol etilén kerüljön.

A kilépő gázból ötpercenként mintát vettünk, és GC segítségével mértük az összetételt. A 2. ábra a hidrogén móltörtjét ($x(\text{H}_2)$) mutatja az idő függvényében. Az ábrákon feltüntetett az elméleti, 100%-os konverzióhoz tartozó hidrogén móltörtjének alakulását is. Ha a konverzió 100% lenne a kísérlet teljes ideje alatt, akkor a bevezetett etilénből kétszeres mennyiségű hidrogén keletkezne, vagyis a kilépő gázban a hidrogén móltörtje a szagatott vonallal jelölt görbe szerint alakulna.

A kísérletek során a hidrogén móltörtje nem érte el a 100%-os konverzióhoz tartozó elméleti értéket, hanem mindvégig 100% alatt maradt. Minden kísérlet alkalmával, a hidrogén móltörtje a kilépő gázban az elméleti 100% konverzióhoz képest kisebb léptékben nőtt, elért egy maximumot, majd lecsökkent. A talkumhordozós katalizátor magasabb hidrogén móltörtöket és hosszabb katalizátoraktivitást eredményezett a reakció idejétől függetlenül.

A termékekről készített elektronmikroszkópos felvételeken (3. ábra) jól látható, hogy kalciumkarbonát-hordozó esetén képződtek ugyan szén nanocsövek, de átmérőjük és

hosszuk széles tartományban változott. A talkumhordozós katalizátoron keletkezett szén nanocsövek átmérője általában 10–20 nm között változott, hosszuk pedig több mikrométer volt.

A mérési adatok alapján megállapítottuk, hogy a talkummal egyrészt közel háromszoros hozamot lehetett elérni, mint a kalcium-karbonáttal, másrészt a szén nanocsövek átmérője kisebb szórást mutatott talkum esetén. A szegedi laboratóriumi reaktorban elért szén nanocső hozamokhoz képest (12–76%) (Kukovecz et al., 2005) a kalcium-karbonát hordozóval a nagylaboratóriumi berendezésben jelentősen nagyobb hozamot (222–266%) értünk el, de a talkum még ezen értékeket is felülmúlta. Nagyobb gyakorlati jelentősége tehát a talkum alkalmazásának van.

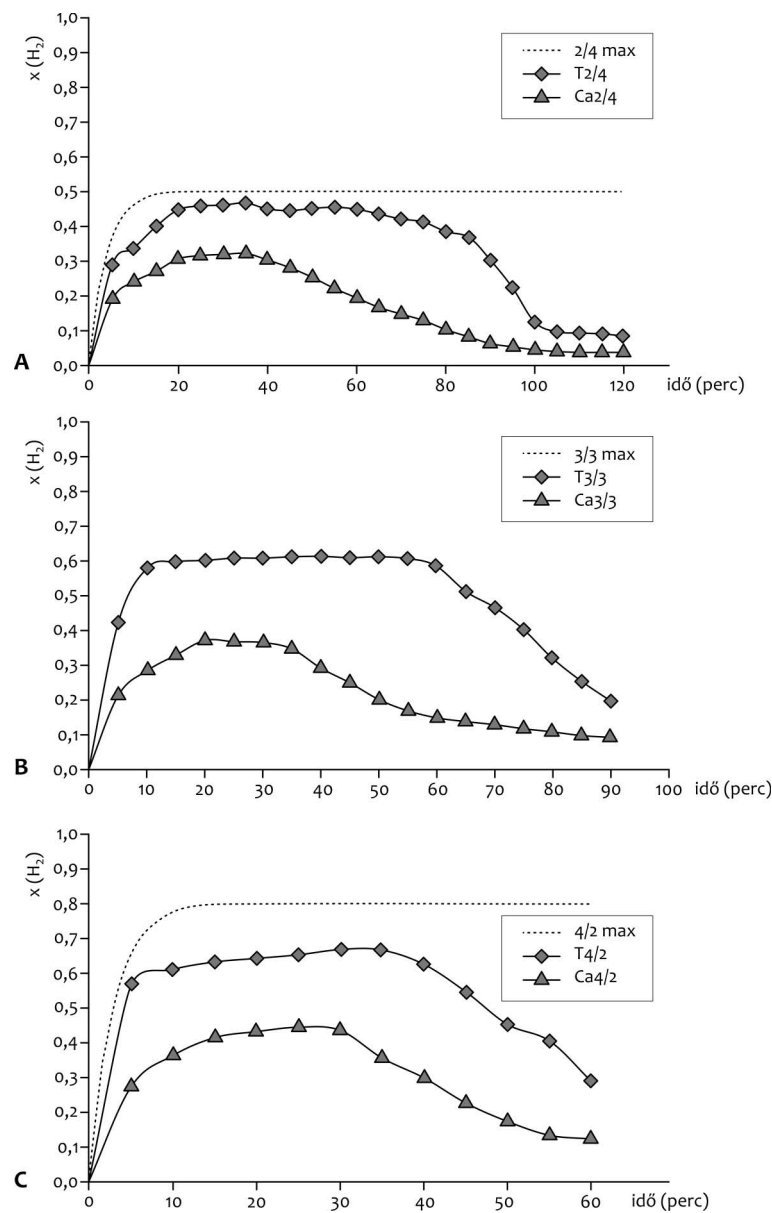
3.1.2. Az etilénbetáplálás sebességének hatása

• Tanulmányoztuk, hogy 2,5 mol etilént különböző (30–360 dm³/h) sebességgel a rendszerbe juttatva, milyen konverziót és hozamot kapunk. A kísérletek paramétereit és az eredményeket a 2. táblázat tartalmazza.

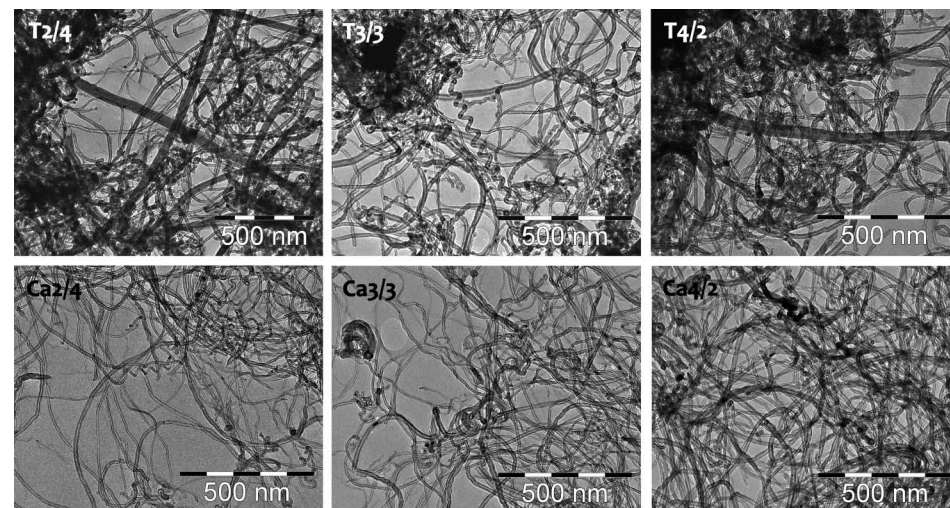
A legnagyobb hozamot a 60 dm³/h etilénárammal végzett, 60 perces kísérlet (E60) eredményezte. Magasabb etilénáramok esetén a szén nanocsövek kezdeti növekedési sebessége ugyan kellőképpen nagy volt, de a felhalmozódó szénforrás az amorf szén kelet-

kezelésének kedvezett, ami a katalizátor élet-tartamát csökkentette. Alacsony etilénára-mok esetén a kezdeti növekedési sebesség kicsi, viszont kisebb mértékben csökken az

idő előrehaladtával, mert az amorf szén ke-letkezésének mértéke is kisebb volt. Az etilén optimális betáplálási sebessége tehát 12 dm³/ (h-g katalizátor)-nak adódott.



2. ábra • A hidrogén móltörtjének alakulása: A – 120 perces reakciók esetén; B – 90 perces reakciók esetén; C – 60 perces reakciók esetén



3. ábra • Elektronmikroszkópos felvételek a szén nanocsövekről

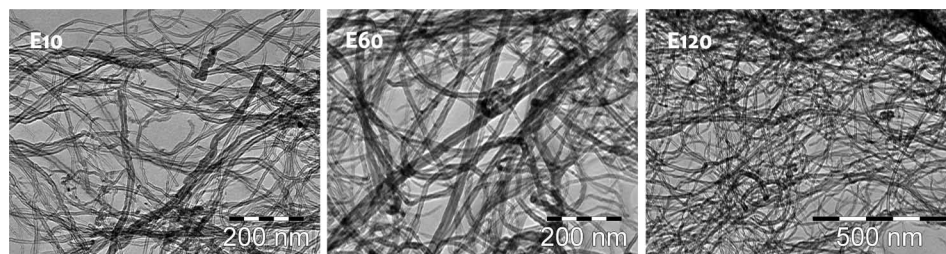
Az elektronmikroszkópos felvételekről (4. ábra) megállapítható, hogy az etilén térfogat-áramának nagysága nem befolyásolta a szén nanocsövek fő méreteit.

3.1.3. A víz szerepe • A szén nanocső előál-lítási reakcióban a vízgőz szerepét többen

vizsgálták (Liu et al., 2010; Okamoto et al., 2011). A víz optimális koncentrációját tekintve az irodalmi értékek jelentősen eltérnek egymástól, 1000 ppm és 20000 ppm között változnak (a ppm koncentráció a gázok tér-fogatára vonatkozik). Célunk az volt, hogy

kód	idő (perc)	$V(C_2H_4)$ (dm ³ /h)	$m(CNT_{mért})$ (g)	konverzió (%)	hozam (%)
E10	10	360	21,4	35,7	428
E20	20	180	30,2	50,3	604
E30	30	120	33,6	56,0	672
E40	40	90	37,3	62,2	746
E50	50	72	39,9	66,5	798
E60	60	60	41,5	69,2	830
E70	70	51	40,1	66,8	802
E80	80	45	38,2	63,7	764
E90	90	40	35,6	59,3	712
E100	100	36	35,1	58,5	702
E110	110	33	34,5	57,5	690
E120	120	30	34,3	57,2	654

2. táblázat • Az etilénáram hatása a termék mennyiségére és minőségére



4. ábra • Elektronmikroszkópos felvételek a szén nanocsövekről

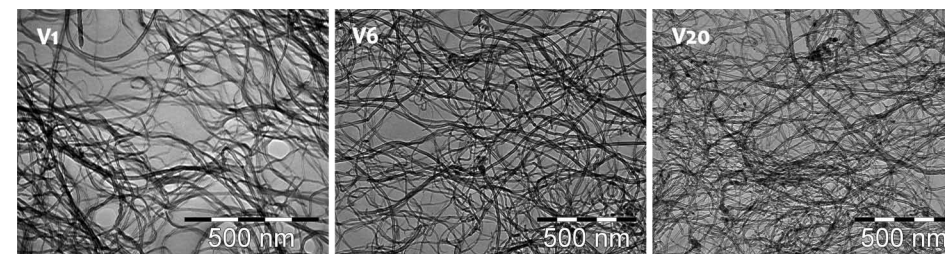
az eddig meghatározott működési paraméterek mellett meghatározzuk az optimális koncentrációt. Kísérleteinkben az etilénáram víztartalmát 1000 ppm és 20000 ppm között változtattuk. Az etilénáram egy részét vízben buborékolattuk át, így az adott hőmérsékleten vett telítési koncentrációból számítani lehetett a teljes etilénáram víztartalmát. A kísérletek során talkumhordozós katalizátort alkalmaztunk, az etilénáram 60 dm³/h, az időtartamot pedig 60 percrek választottuk

(20°C-on és atmoszférikus nyomáson ez 2,5 mol etilént jelent). A kísérletek paramétereit és az eredményeket a 3. táblázat tartalmazza.

A víztartalom 3000 ppm koncentráció alatt nem volt jelentős hatással a hozamra. 4000–8000 ppm tartományban kaptuk a legmagasabb hozamokat. 9000 ppm feletti víztartalmak esetén viszont a hozam alacsonyabb volt, mint a vízmentes (E60) kísérletnél. A legjobb eredményt 6000 ppm víztartalomnál értük el.

kód	víztartalom (ppm)	m(CNT _{mért}) (g)	Konverzió (%)	Hozam (%)
V1	1000	40,9	68,2	818
V2	2000	42,4	70,7	848
V3	3000	43,3	72,2	866
V4	4000	47,5	79,2	950
V5	5000	46,7	77,8	934
V6	6000	48,7	81,2	974
V7	7000	46,2	77,0	924
V8	8000	47,9	79,8	958
V9	9000	41,9	69,8	838
V10	10 000	37,5	62,5	750
V12	12 000	38,2	63,7	764
V15	15 000	33,8	56,3	676
V20	20 000	28,3	47,2	566

3. táblázat • A víztartalom hatása a termék mennyiségére és minőségére



5. ábra • Elektronmikroszkópos felvételek a szén nanocsövekről

A termékekről készített elektronmikroszkópos felvételekről (5. ábra) megállapítható, hogy a vízkoncentráció változása nem befolyásolta a szén nanocsövek alaki jellemzőit.

Összehasonlítás céljából összefoglaltuk az etilénáram- (E jelűek) és a víztartalom (V jelűek) változtatásával készült kísérletek hozamait (6. ábra). Látható, hogy kis mennyiségű víz kedvezően hatott a hozamra.

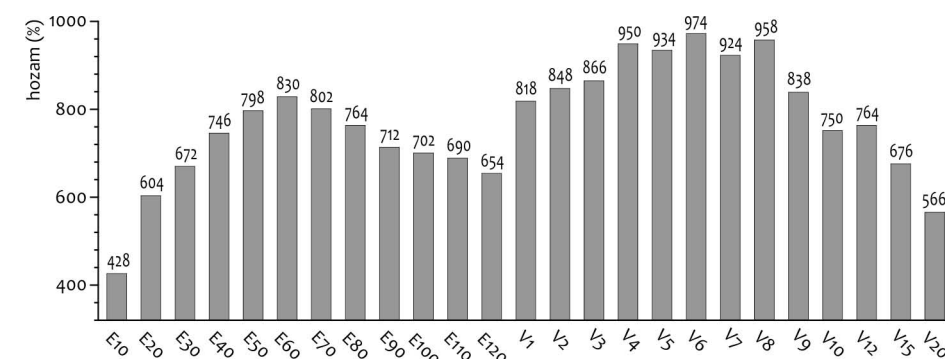
3.2. Szén nanocsövek alkalmazása polipropilénben • Többfalú szén nanocső erősítő hatásának vizsgálatára többek közt PP-kompozit előállításával tettünk kísérletet. A szén nanocsövek felületét a szénszálnál korábban már sikeresen alkalmazott kapcsoló ágenssel (Varga, 2011) kezeltük különböző felületkezelési és bedolgozási körülmények között.

A kompozitokat ikercsigás extruderben állítottuk elő, mert a SEM-felvételek alapján

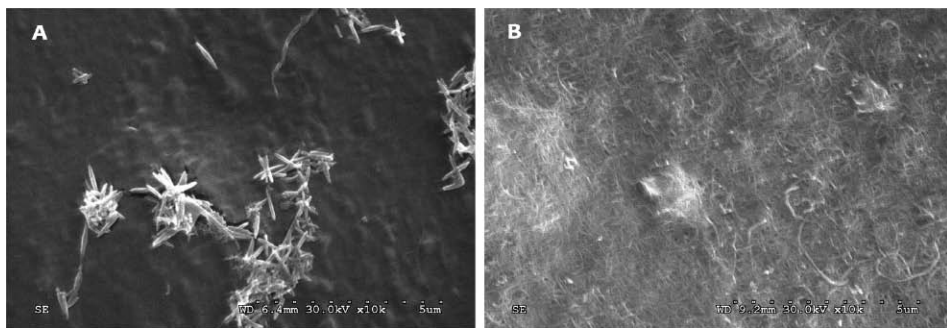
(7. ábra) az így készült minták töretfelületén a szén nanocsövek eloszlása lényegesen homogénebb volt, mint az egycsigás extruderben készült mintákén, amelyeken nagy foltokban látszottak a CNT-agglomerátumok.

A bedolgozott szén nanocsövek szerkezetét, illetve a kapcsoló adalékokkal történő kezelés morfológiára gyakorolt hatását különböző nagyítású SEM-felvételeken vizsgáltuk (8. ábra). A Pannon Egyetemen és a Nanocyl cégnél előállított többfalú nanocsövek morfológiája között nem volt különbség. A kompozitokban alkalmazott minimális adalék-koncentrációt előkísérletek alapján állapítottuk meg.

A nanocsövet 0,5–5 m/m% tartományban dolgoztuk be a műanyagba, és az ebből készült próbatestek húzó, valamint hajlító igénybevételekkel szembeni viselkedését tanulmányoz-



6. ábra • Az etilénáram- (E) és a víztartalom (V) változtatásával készült kísérletek hozamai



7. ábra • Különböző extrudálási körülmények között előállított CNT/PP-kompozitok töretfelületéről készített SEM-felvételek • A – egycsigás extrudernél jellemző kompozit töretfelület; B – kétszigás extrudernél jellemző kompozit töretfelület

tuk, közülük a 2% szén nanocsövet tartalmazó kompozitok eredményeit mutatjuk be.

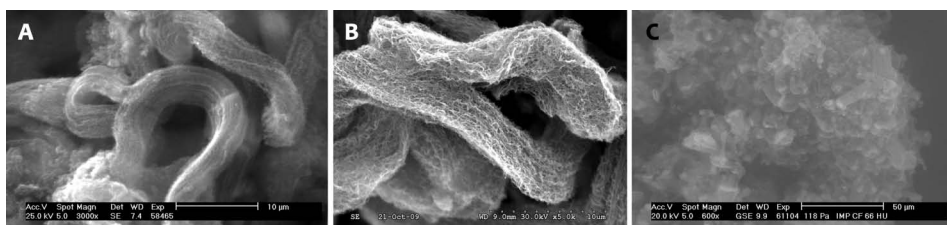
A szilárdsági jellemzők alapján a szén nanocső PP-be történő bedolgozása eredményesnek tekinthető (9. ábra). A Pannon Egyetemen előállított szén nanocső alkalmazásával rendre hasonló húzó-, szakító- és nagyobb hajlítószilárdságot kaptunk, mint a kezeletlen, Nanocyltől származó szén nanocső alkalmazásakor.

A kapcsoló adalékot is tartalmazó kompozitok többségében a kezeletlen szén nanocsövet tartalmazó kompozitokra jellemző mechanikai szilárdsági értékeket mértük. A kapcsoló adalékkal történt felületkezeléssel csak a szakítószilárdságot sikerült mintegy 50%-kal növelni, ami szintén a polimer mátrixba

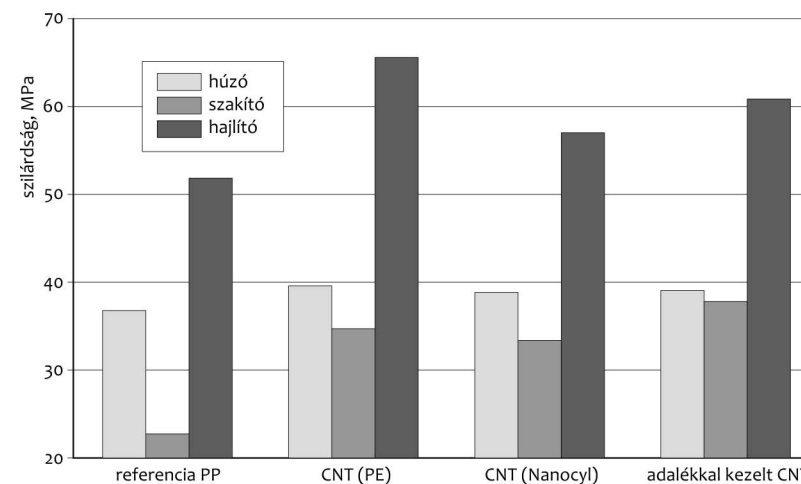
bedolgozott szén nanocső eloszlásának nagyobb diszperzitásfokának a következménye.

4. Összefoglalás

Megállapítottuk a szén nanocsövek gyártására alkalmas nagylaboratóriumi berendezés főbb működési paramétereit és a szén nanocsőhozam közti összefüggéseket. A műanyagiparban adalékként alkalmazott katalizátorhordozók közül a talkumot és a kalcium-karbonátot vizsgáltuk. A talkummal közel háromszoros hozamot értünk el, mint a kalcium-karbonáttal. Meghatároztuk, hogy nagylaboratóriumi berendezésbe az etilén optimális betáplálási sebessége 12 dm³/(h·g katalizátor). Az etilénhez kis koncentrációban vizet adva a hozam nő. A legnagyobb hozamot 6000



8. ábra • CMT-felületekről készített SEM-felvételek • A – kezeletlen CNT felülete (PE) (3000-szeres nagyítás); B – Nanocyl CNT felülete (5000-szeres nagyítás); C – Adalékkal impregnált CNT felülete (600-szoros nagyítás)



9. ábra • 2m/m% CNT/PP-kompozitok szilárdsági jellemzőinek változása a CNT típusával

ppm víztartalomnál kaptuk, ami 974% volt. Kimutattuk, hogy a szén nanocsövet polipropilénhez 2%-ban adalékolva a mechanikai szilárdsági jellemzők 10–30%-os növekedése érhető el. A szakítószilárdság poláris kapcsoló ágens felhasználásával és így a szén nanocső nagyobb mértékű diszpergáltságával további 10%-kal növelhető.

Jelen cikk a TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KONV-2010-0003 és a TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0025 projektek keretében készült. A projektek a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósulnak meg.

Kulcsszavak: szén nanocső, kapcsoló ágens, PP

IRODALOM

- Chen, W. – Lu, H. – Nutt, S. R. (2008): *Composites Science and Technology*. 68, 2535–2542.
 Coleman, J. N. – Khan, U. – Blau, W. J. – Gun'ko, Y. K. (2006): *Carbon*. 44, 1624–1652.
 Futaba, D. N. – Hata, K. – Yamada, T. et al. (2005): *Physical Review Letters*. 95, 056104.
 Guo, T. – Nikolaev, P. – Rinzier, A. G. et al. (1995): *The Journal of Physical Chemistry*. 99, 10694–10697.
 Hata, K. – Futaba, D. N. – Mizuno, K. et al. (2004): *Science*. 306, 1362–1364.
 Iijima, S. (1991): *Nature*. 354, 56–58.
 Kónya Z. – Biró L. P. – Hernádi K. (szerk.) (2002): *A kémia újabb eredményei 2001: Szén nanocsövek előállítása, tulajdonságai és alkalmazási lehetőségei*. Akadémiai, Budapest

- Kukovecz Á. – Méhn D. – Nemes-Nagy E. et al. (2005): *Carbon*. 43, 2842–2849.
 Liu, H. – Zhang, Y. – Li, R. et al. (2010): *Applied Surface Science*. 256, 4692–4696.
 Okamoto, A. – Gunjishima, I. – Inoue, T. et al. (2011): *Carbon*. 49, 294–298.
 Prashantha, K. – Soulestin, J. – Lacrampe, M. F. et al. (2009): *Composites Science and Technology*. 69, 1756–63.
 Špitalský, Z. – Krontiras, C. A. – Georga, S. N. – Galotis, C. (2009): *Composites Part A*. 40, 778–783.
 Varga Cs. – Szakács H. – Bartha L. – Falussy L. (2011): *Műanyag és Gumi*. 48, 468–471.
 Xiao, Q. – He, S. – Liu, L. et al. (2008): *Composites Science and Technology*. 68, 321–328.
 Yacamán, M. J. – Yoshida, M. M. – Rendon, L. et al. (1993): *Applied Physics Letters*. 62, 202–204.

PROAKTÍV TERMELÉSÜTEMEZÉSI MÓDSZEREK ÉS IPARI ALKALMAZÁSAIK

Jósvai János

egyetemi adjunktus,
Széchenyi István Egyetem Járműgyártási Tanszék
josvai@sze.hu

A jelen kor termelési rendszereit jelentős terhelésingadozások és bizonytalanságok közegette kell eredményorientáltan működtetni. A velük szemben támasztott technológiai kihívásokon túl rendkívül összetett termékvariáns elvárásoknak is meg kell felelniük, továbbá a vevői igények alapján az egyedi termékek tömeggyártására – *mass customization* – kell berendezkedniük.

Az elmúlt évek válsága is nagy valószínűséggel egy korszakváltás kezdetét jelzi, amikor jó néhány korábban bevált paradigmáról le kell majd mondani, és számos, ma nagyon jelentős szerepet játszó technológia innovációja is sürgetővé válik.

A változó piacok ellen a termékek növekvő egyediségével próbálnak a vállalatok ellenhatást gyakorolni. Az innovációkat mind rövidebb időközökben integrálják a termékekbe, és dobják piacra. Az életciklus rövidülését az alábbi szempontok is alátámasztják:

A 25%-kal, márkánként nyolc modellre megnövekedett kínálat spektrum mellett a járműgyártásban a modellciklusok az elmúlt húsz évben körülbelül négy évre rövidültek.

A 80-as évek végén a Mercedes gyártócsoportjánál 0,9 új termékbevezetés jutott egy

évre, ez jelenleg átlagosan évi 2,5 termékbevezetésre emelkedett.

Az innovációt és technikai fejlesztést piaci versenylőnyként értékelik. A járműgenerációk ehhez kapcsolódó gyors cseréje az új termékbevezetések gyakoriságának növekedéséhez vezet a járműiparban.

Az OEM-ek (*Original Equipment Manufacturer*) saját gyártásának aránya 2015-ig tovább fog csökkenni a mostani 35%-ról 20%-ra. Ez a járműipar további strukturális átalakulásához vezet.

A rövidebb termék-életciklusból, a növekvő variánsok számából fakadó jelentős komplexitásbővülés a termelő rendszerek számára jelentős kihívást eredményez a rugalmasság és a termelékenység területén (Ackermann, 2007; Erdélyi, 2009; Spearman – Hopp, 2008; Näser, 2007).

A termék-előállítási folyamat lehatárolása

A termék-előállítási folyamat magas szintű megközelítése magában foglalja a terméktervezést, folyamatfejlesztést, gyártervezést, kapacitásmenedzsmentet, termékelosztást, termelésütemezést, minőségbiztosítást, munkaerőszervezést, eszközkarbantartást, stratégiai

tervezést, ellátásilánc-menedzsmentet, üzemek közötti koordinációt ugyanúgy, ahogy a részletes megközelítés a közvetlen termelési funkciókat, amilyenek például a vágás, hengerelés vagy szerelés. A két megközelítés közötti középút kompromisszumát az értékteremtő folyamatnézet jelenti. Az értékteremtő folyamat fogalma az erőforrások alkalmazására vonatkozik a termék vagy szolgáltatás előállítása érdekében.

Az értékteremtési folyamat irányítása, koordinációja a termelő vállalatok esetében külön funkcióként szerepel az alábbi nevek alatt például: termelésirányítás, gyártástervezés, üzemszervezés (*industrial engineering*). Ezen területek többek között az alábbi tevékenységek elvégzéséért is felelősek: termelésütemezés, készletgazdálkodás, minőségbiztosítás, munkaerő-ütemezés, anyaggazdálkodás, eszközgazdálkodás, kapacitástervezés, valamint minden, ami elősegíti a termék előállítását. Az értékkalkotási folyamatszemplét az üzemen belüli anyagáramlási folyamatra koncentrálni (Tempelmeier – Günther, 2005; Schuh, 2003; Ackermann, 2010).

Termelési struktúrák

Az értékteremtési folyamatszemplét eltekintve a teljes részletességtől a termékek és folyamatok leírásakor, a termelő környezetek ennek ellenére nagyban különböznek a folyamatstruktúrájukat tekintve, amely leírja az anyagáramlását az üzemen belül. Robert Hayes és Steven Wheelwright folyamatstruktúrájuk alapján a termelési rendszereket négy kategóriába sorolják, amelyeket a következőképpen lehet összegezni (Spearman – Hopp, 2008):

- *Műhelyszerű gyártás*: kis mennyiségek termelése jellemző, az üzemen belüli bejárású utak nagyban eltérnek. Kevert anyagáram jellemzi, az átállások rendszeresek.

- *Szakaszolt gyártás*: kötegetelt termelés zajlik korlátozott számú azonosítható útvonalon az üzemen. Az egyes állomások az útvonalon nincsenek taktolt anyagmozgató rendszerrel összekötve, köztük készletek halmozhatók fel.
- *Folyamatos gyártás*: ez a klasszikus mozgó szerelősor, amely Henry Ford által vált híressé. A termék szerelése kötött útvonalon zajlik, ahol az egyes állomások taktolt anyagmozgató rendszerrel vannak összekötve.
- *Folyamatos áramlású folyamatok*: ömlesztett termékek automatikusan áramlanak végig egy rögzített útvonalon.

A termelési folyamatok lényegesen különböznek akkor, ha nagyon sokféle terméket gyártunk egyedi igények alapján, és akkor, ha ugyanazt a terméket nagy tömegben készítjük hosszú időszakon keresztül. Az, hogy egy termékből mekkora mennyiség gyártása tekinthető egyedinek, illetve tömegesnek, függ a termék gyártási idejétől is. A gyártott mennyiségnek az igénybe vett kapacitáshoz viszonyított relatív nagyságát nevezzük a gyártás tömegszerűségének. A termék tömegszerűségi foka szerint négy kategóriába sorolható:

- *Egyedi gyártás*: ritkábban jelenik meg a termék a termelőrendszerben, mint amennyi idő egyetlen darab elkészítéséhez szükséges, tehát a termék nincs mindig jelen a termelőrendszerben.
- *Kis- és középsorozat-gyártás*: gyakrabban jelenik meg a termék a termelőrendszerben, mint amennyi idő egyetlen darab elkészítéséhez szükséges, tehát a termék mindig jelen van a rendszerben, de még egyetlen erőforrást sem foglal le teljesen.
- *Nagysorozatgyártás*: gyakrabban jelenik meg a termék a termelőrendszerben, mint amennyi idő az elkészítéséhez szükséges,

tehát a termék mindig jelen van a termelőrendszerben, és van egyetlen (esetleg néhány) olyan erőforrás, amelyet a termék mindig lefoglal.

- **Tömeggyártás:** valamennyi erőforrás specializálódik egyetlen termék gyártására. Minden erőforrás állandóan egyetlen terméket gyárt, továbbá a nagyobb mennyiség, valamint a jobb kapacitáskihasználás érdekében az egyes tevékenységeket párhuzamosan több erőforráson is végzik. Nagysorozat- és tömeggyártás esetén a folyamatos gyártósor a legalkalmasabb termelési forma, melyet más néven *flow shop* rendszerként is jelöl az irodalom (Spearman – Hopp, 2008; Alické, 2005; Schuh – Eversheim, 2010; Gundry – Bonney, 1976; Sahni – Gonzales, 1978; Gupta, 1971; Potts – Osman, 1989; Martorell et al., 2010). A kutatómunka ezzel a termelési környezettel foglalkozott.

A flow shop jellemzése

A flow shop termelési környezet feladatai közül a szakirodalomban az ütemezési probléma az egyik legelterjedtebb. A flow shop ütemezési probléma esetén n feladatot, munkát $(1; \dots; n)$ kell elvégezni m gépen $(1; \dots; m)$. Az egyes gépeken elvégzendő feladatok műveleti idejét jelölje T_{kj} , ahol $k = (1; \dots; m)$ és $j = (1; \dots; n)$, ezek az időértékek rögzítettek, előre ismertek és nem negatívak. Ennek a problémakörnek az általánosan elfogadott feltételezései a következők (Shagafian – Hejazi, 2005; Maroto – Ruiz et al., 2005; Ionnu et al., 2009):

- Minden egyes feladatot egyidejűleg kizárólag csak egy gépen lehet végrehajtani.
- Minden egyes gép egyidejűleg csak egy feladaton dolgozhat.
- A végrehajtás megszakítása nem engedélyezett.

- Minden feladat független egymástól, és rendelkezésre állnak a végrehajtásra a szükséges időpillanatban.
- A feladatok beállítási ideje a gépeken elhanyagolható, így figyelmen kívül hagyható.
- A gépek folyamatosan rendelkezésre állnak.
- A folyamat közbeni tárolás engedélyezett. Ha a feladat által következőként igénybeveendő gép még nem áll rendelkezésre, akkor a feladat várakozhat, és a géphez tartozó várakozó sorhoz csatlakozik.

A problémakör célja, hogy találjunk egy olyan sorrendet a feladatok számára a gépeken, amely az adott kritériumok szerint optimalizált. Az irodalomban a leggyakoribb kritérium a teljes átfutási idő ($C_{\max}$) minimalizálása.

Bár a flow shop ütemezési probléma, optimumig megoldható polinom időben $m = 2$ esetén. Általában $(n!)^m$ ütemezési lehetőséget kell figyelembe venni (Maroto – Ruiz, 2005). A szakirodalomban a probléma továbbkorlátozott. A feladatok nem előzhetik meg egymást, azaz a munkák végrehajtási sorrendje azonos az összes gépen. Ezt a feladatkört permutációs flow shop problémaként ismerik, és $F/permu/C_{\max}$ -ként jelölik, továbbiakban PFSP. Ebben az esetben „csak” $n!$ ütemezési lehetőséget kell vizsgálni.

A digitális gyár fogalma

A digitális gyár koncepciókat, digitális eszközöket bocsát rendelkezésre a tervezéshez, modellezéshez és szimulációhoz. A digitális gyár egyik legfontosabb központi eleme egy közös adatbázis az összes alkalmazás, továbbá a valós üzemmellel történő integráció számára. A digitális gyár e két komponens révén jóval több, mint pusztán az egyes tervezési eszközök összessége.

A „digitális gyár” fogalmát a 4499. számú VDI-irányelv az alábbiak szerint definiálja: „A digitális gyár egy felső szintű fogalom, amely a digitális modellek, eljárások és eszközök – többek között a szimuláció és a 3D-vizualizáció – átfogó hálózata, melyeket egy átvihető adatmenedzsment integrál. Célja a valós gyárban a termékkel kapcsolatos összes jelentős struktúra, folyamat és erőforrás teljes mértékű tervezése, értékelése és folyamatos javítása.”

A digitális gyár technológiája lehetővé teszi, hogy a virtuálisan létrehozott gyárban a termékeket, folyamatokat és berendezéseket modellekkel leképezzük, és a tervezett termelést a számítógépen virtuálisan úgy javítsuk, hogy a valós gyár számára egy megérett, messzemenőig hibamentes termelési folyamat álljon rendelkezésre.

A digitális gyár eljárásai és eszközei a termékfejlesztés és termelés-tervezés megkezdésénél korábban kezdődnek, és a konstrukciótól a technológiai szimuláción át egészen a virtuális felfutásig és üzemeltetésig egy teljesen integrált adatmenedzsment segítségével. A folyamatok korai párhuzamosításával a fejlesztési és üzembe helyezési idők jelentősen csökkenthetők. A digitális gyár fókuszja manapság a termelés-tervezésre és a folyamatok integrációjára esik, amik a termék és a termelés létrejöttéhez, működéséhez szükségesek (Kühn, 2006; Schmidt, 2002; Pfeiffer, 2007; VDA, 2008; VW KAK, 2009; Mátyási – Szilvási-Nagy, 2003; graphIT Kft., 2010; Siemens PLM, 2010).

A szimuláció fogalma és folyamata

A szimuláció a digitális gyár egyik központi technológiája. A gyártási rendszerek és termelési folyamatok szimulációja hatékony segít-

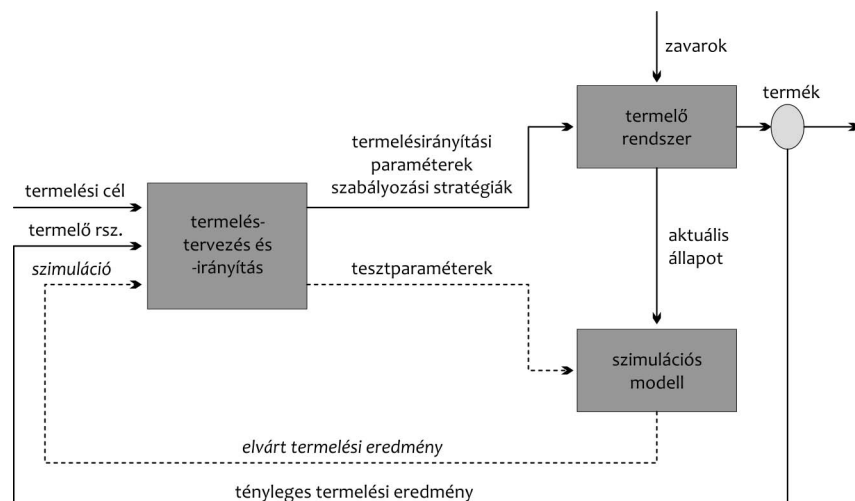
séget nyújt a termelő rendszerek felmérésében, elemzésében, tervezésében és programozásában. A szimuláció fogalmát a 3633-as VDI-irányelv az alábbiak szerint definiálja: „A szimuláció egy rendszer dinamikus folyamatának leképezése egy kísérletezésre alkalmas modell segítségével, melynek alkalmazásával a valóságba átvihető következtetések vonhatóak le. Tágabb értelmezésben a szimuláció fogalma alatt egy szimulációs modellel végrehajtott célzott kísérlet előkészítését, végrehajtását és kiértékelését értjük.”

A rövid termelési átfutási idő elvárás a termelést érintő mindennemű anyagáramlás esetében, és rendkívül gondos tervezést és irányítást igényel. A mindenkori termelési feladatnak egyrészt késlekedés nélkül, pontosan kell rendelkezésre állnia a megmunkálás helyén, másrészt a termelésben a készleteknek lehetőség szerint alacsony szintűnek kell maradniuk, a kis tőkelekötés melletti gyors reakcióképesség és rövid átfutási idők érdekében. Biztosítani kell továbbá, hogy részegységek zavara nagyobb területeket, vagy akár az egész termelést ne érinthesse.

A modern, rugalmas termelőüzemek – a nagyszámú és eltérő célmeghatározással és a különböző területek közötti számos összefüggéssel – komplexitása miatt nem elegendő a kvázi statikus termelési folyamattervezés. Az algoritmizálható eljárásokat csak viszonylag korlátozott feladatok esetében lehet a gyakorlatban alkalmazni. A diszkrét, eseményorientált szimuláció (dinamikus szimuláció) modern, nagyteljesítményű eszközei hatékonyan képesek a termelési és anyagáramlási folyamatok tervezését és üzemeltetését támogatni.

A dinamikus szimuláció alkalmazásának céljai közé tartozhatnak az alábbi feladatok:

- Gyári *layout* dinamikus vizsgálata és optimalizációja,



1. ábra • Szimuláció a termelés-tervezésben (Kühn, 2006)

- Meglévő vagy jövőbeni termelési rendszerek teljesítményének optimalizálása,
- Termelési koncepció korai dinamikus vizsgálata,
- Szűk keresztmetszetek meghatározása a termelésben és anyagáramlásban,
- Tárolási és átfutási idők csökkentése,
- Gyártósor és az időtervezés javítása,
- Gyártási változatok elemzése, validálása és optimalizálása,
- Termelő erőforrások kihasználtságának maximalizálása,
- Puffer kiterheltség dinamikus vizsgálata.

Széles körű analízisekkel és statisztikákkal tesztelhetők az elemzendő termelési és anyagáramlási feladatok, hogy még a termelés-tervezés korai szakaszában gyors, megbízható döntések születessenek (Banks, 1998; Kühn, 2006; Pfeiffer, 2007; Siemens PLM, 2010; Sivakumar – Chong, 2003; Suhl – Günther, 2005; Ruohola et al., 2003).

A kiválasztott optimalizálási módszerek implementálására és a kísérleti futtatások végrehajtására, a termelési folyamatok modelle-

zésére és időben dinamikus szimulációjára a Plant Simulation programcsomag szolgált. A szimulációs modellépítés és a dinamikus szimuláció, viselkedéselemzés a legkorszerűbb tervezési eljárás a termelés-tervezés területén. A szimuláció alkalmazását a termelés-tervezésben az 1. ábra ismerteti. Ebben az eseményvezérelt és teljesen objektumorientált környezetben építettem fel az elméleti és ipari termelési struktúra modelljét, majd elvégeztem az optimalizálási eljárások programozási implementációját. A szimulációs futtatások során rögzített eredmények kiértékelése minősítette a kutatás során elemzett megoldási eljárásokat.

Gyártási sorrendtervezés a tömeggyártásban

A korábban ismertetett gyártósori környezetben a felrakási sorrend tervezése egyike a gyakran vizsgált és elemzett célfüggvényeknek. A feladatot egyazon infrastruktúrán kötött sorrendben végighaladó számos különböző műveleti idővel rendelkező termék egymást követő sorrendjének meghatározása jelenti.

A leggyakrabban vizsgált célérték a teljes átfutási idő, angolul *makespan*. A számos eltérő szerelési és/vagy megmunkálási lépést igénylő termék esetében a termelési struktúrán torlódások és üresjáratok lépnek fel, amelyek negatívan hatnak a teljes átfutási időre. A probléma összetettségét és a szükséges megoldási eljárások komplexitását az okozza, hogy az érintett termékek műveleti idejeinek eltérésein túl az adott vizsgált felrakási program termékösszetétele is meghatározó a megoldás során, mivel a gyakorlatban rendszeresen előfordul, hogy nem a teljes termékpaletta szerepel egy adott termelési programban, hanem annak a vevői igények alapján meghatározott, tetszőlegesnek tekinthető szűkebb kombinációja. Ebből ered a termelés-tervezés számára az ismétlődő feladat, hogy az igények alapján összeállított termékmixre vonatkozóan a megfelelő sorrendet meghatározza. A vizsgált problémakör $n!$ megoldási lehetőséget jelent, amelynek leszámolással történő megoldása a gyakorlatban előforduló feladatméretek mellett a mai fejlett informatikai technológia mellett sem lehetséges elfogadható időtartamon belül. A probléma megoldási eljárásainak elemzéséhez feladatkészletek szükségese-

Tesztkészletek a sorrendtervezési problémára

A PFSP-feladat vizsgálatához szükségesek olyan feladatkészletek, amelyek az ismertett problémakörnek megfelelő tulajdonsággal bírnak. A megoldási eljárások teljesítőképességének elemzése érdekében több, eltérő nehézségű és méretű feladat-specifikációra van szükség. A kutatás során a fejlesztett és elemzett megoldási módszerek elméleti tesztkészleteken és valós ipari probléma alapján létrehozott problémakörön kerültek elemzésre.

Elméleti tesztkészlet • Az irodalomkutatás alapján számos szerző a Taillard-féle (Taillard,

1993) tesztkészletet alkalmazza az eljárások vizsgálatára. A széles körben hivatkozott és alkalmazott feladatkészlet több nagyságrendű problémát ölel fel, amely az ötgépes rendszertől a húszgépes rendszerig terjed. A gépeken minimálisan húsz, maximálisan ötszáz egymástól különböző feladatot lehet végrehajtani. Az előre definiált készletben minden gépszám-feladatméret kombinációhoz tíz különböző műveleti időmátrix tartozik. A vizsgálataim során minden egyes gép-feladat kombináció esetén kiértékelésre kerültek a hozzá tartozó műveleti időmátrixok által definiált problémák. Az elméleti feladatkészlet kiértékeléséhez a specifikáció által tartalmazott eddig elért legjobb eredmények szolgáltak összehasonlítási alapul. A fejlesztett és elemzett eljárások által elért átfutási idő eredmények és a készlet által tartalmazott eddigi legjobb érték alapján kerül meghatározásra a relatív százalékos eltérés minősítő jellemző (RPD), melyet az (1) egyenlet ismeret. Az eljárások kiértékelése során, az általuk igénybe vett szükséges futtatási idő is figyelembe vételre került.

$$RPD = \frac{\text{futtatási eredmény} - \text{készlet min}}{\text{készlet min}} \times 100 \quad (1)$$

Ipari tesztkészlet • A kutatás során az elméleti feladatkészlet mellett valós ipari termelési környezet alapján definiált feladaton is elemzésre kerültek a vizsgált megoldási eljárások. Az ipari környezet alapján létrehozott termelőrendszer ötvenhét gépet tartalmaz, melyeken negyven, illetve kétszázhuszonhét különálló elemet tartalmazó felrakási programot kell végrehajtani.

A feladat specifikációja valós műveleti időkre támaszkodik. Az elemzések eredményeinek összehasonlítását alapját a kiinduló felrakási program által nyújtott átfutási idő

képezi, a relatív százalékos eltérés minősítő jellemző erre a bázisértékre alapozottan került meghatározásra, számítási módját a (2) egyenlet ismerteti. Az elméleti és az ipari feladatkészletek jellemzését az 1. táblázat tartalmazza.

$$RPD = \frac{\text{futtatási eredmény} - \text{kiinduló ért.}}{\text{kiinduló érték}} \times 100 \quad (2)$$

Az elemzések végrehajtására szolgáló dinamikus szimulációs modellek

A PFSP-probléma elemzésére a Plant Simulation szimulációs szoftver szolgált. A program diszkrét, eseményvezérelt és objektum-orientált környezete lehetővé teszi rendkívül bonyolult termelési rendszerek modellezését és időbeni dinamikus viselkedésének elemzését. A szimulációs környezet előnye, hogy hatékonyan építhető fel tetszőleges termelési struktúra, elemezhetőek eltérő üzemállapotok, a valós rendszer akadályozása nélkül tesztelhetőek a tervezett változtatások.

A modellezés során az ismertetett tesztfeladatok alapján létrehozásra kerültek az elméleti és ipari feladatok végrehajtására alkalmas termelési szimulációs modellek. Az irodalomkutatás alapján kiválasztott megoldási eljárások implementációját követően került sor a termelési modellek dinamikus szimulációs

	string 1	time 2
string	MU type	time
1	a1	54.0010
2	a2	1:23.0000
3	a3	15.0000
4	a4	1:11.0000
5	a5	1:17.0000
6	a6	36.0000
7	a7	53.0000
8	a8	38.0000
9	a9	27.0000
10	a10	1:27.0000
11	a11	1:16.0000
12	a12	1:31.0000
13	a13	14.0000
14	a14	29.0000
15	a15	12.0000
16	a16	1:17.0000
17	a17	32.0000
18	a18	1:27.0000
19	a19	1:08.0000
20	a20	1:34.0000

2. ábra • Példa a műveleti időkre egy munkahely esetén

	elméleti készlet	ipari feladat
gépek száma (M)	5, 10, 20	57
munkák száma (J)	20, 50, 100, 200, 500	40, 227
műveleti idők (τ_{kj})	10 készlet minden gép-munkaszám kombinációhoz	valós megmunkálási idők
viszonyítási alap	eddig elért minimum (szakirodalom)	kiinduló program átfutási ideje
minősítő jellemzők	RPD, gépi futási idő	

1. táblázat • Elméleti és ipari tesztfeladatkészletek paraméterei

futtatására, amelyekkel a vizsgált célfüggvényértékek meghatározásra kerültek.

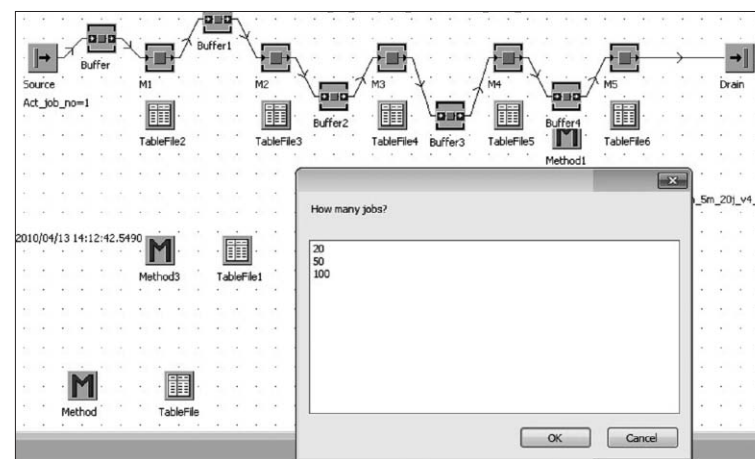
A szimulációs futtatások gépi ideje a termelési struktúra összetettségétől és az optimalizáláshoz alkalmazott eljárás lépésszámától jelentős mértékben függ.

Elméleti feladatkészlet szimulációs modellje

Az elméleti feladatkészlet modellezése során három, gépszám tekintetében eltérő modellváltozat készült. A modellek a gépszámnak megfelelő leképezett munkahellyel rendelkeznek. A munkahelyek konfigurálási lehetősége biztosítja, hogy a meghatározott elvégzendő feladatszámhoz tartozó műveleti idők termékfüggően beállíthatóak legyenek (2. ábra). A különböző termékekhez tartozó műveleti idő-konfiguráció közvetlenül a szimulációs futtatás indulása előtt kerül beállításra a felhasználói vagy az automata programozott konfiguráció választása alapján. A modell felépítése és a beállítási mód létrehozásakor figyelembevételre került, hogy a feladatok különböző mérettűek lehetnek. A felhasználói feladat és adatkészlet választást a 3. és a 4. ábra ismerteti. Az elméleti feladatkész-

let ismertetése során említett gép-feladatszám kombináció kiválasztása, továbbá az adott konfigurációhoz tartozó tesztadatállomány megadása történik ezekben a lépésekben.

Az automatikus programozott konfiguráció-választás az optimalizáló eljárások futtatása során kapott szerepet. Ez a megoldás tette lehetővé a megoldási algoritmusok köteget futtatását a teljes tesztfeladatkészleten. A futtatási eljárás során egy adott tesztfeladathoz tartozó összes adatkészlet kiértékelése történik felhasználói beavatkozás nélkül. A program indítása előtti konfiguráció során a konkrét feladattípust, az adott gépszám esetében lehetséges munkaszámot szükséges megadni. A szimulációs modell a kiválasztott algoritmusnak megfelelő lépéseket hajtja végre futtatás közben, majd egy adatkészlet kiértékelésével végezve, újrakonfigurálja a gyártósor modelljét az új adatkészletnek megfelelően, és újakezdi az optimalizációs lépéssort. A folyamat addig ismétlődik, míg a rendelkezésre álló adatkészletek kiértékelése megtörténik. A szimulációs modellben a futtatások során létrejövő eredmények tárolásra kerülnek, így biztosítva az utólagos kiértékelést.



3. ábra • Kezelői felület az elméleti feladatkészlethez

Ipari feladat szimulációs modellje

Az ipari termelési rendszer esetében egy modellstruktúra épült fel, amely tartalmazza a termelési probléma ötvenhét munkaállomását. A munkaállomások konfigurációja ebben az esetben is biztosítja a változó összetételű és mennyiségű termelési program, valamint a hozzá tartozó műveleti idők kezelését. A modell képes az ipari feladatokra jellemző köteget termelési program feldolgozására, továbbá a programsoronként egy db/termék termelési feladat kezelésére is. A felrakási probléma megoldására implementált eljárások fejlesztése az ipari modell jellemzőinek figyelembe vételével került végrehajtásra.

Megoldási módszerek

a gyártási sorrendtervezésben

A szakirodalomban ismertetett megoldási módszerek közül a legpontosabb, rekonstruálható és implementálható, továbbá a gyakorlatban kivitelezhető eljárások kerültek kiválasztásra további elemzés és fejlesztés céljából. A kutatómunka során az alábbi megoldási algoritmusok vizsgálatára került sor:

- **Genetikus algoritmus:** egyike a legismertebb evolúciós eljárásoknak, rekombinációs operátorainak beállítási lehetősége feladatorientált hangolást tesz lehetővé.
- **NEH-heurisztika:** „réginek” mondható eljárás, de bizonyítottan és összehasonlíthatóan nagyon pontos eredményt ad.
- **IGA-módszer:** a NEH-eljáráshoz hasonlóan konstruktív heurisztika; konstruktív és destruktív fázisai mellett lokális keresési műveleti szakaszt is tartalmaz, iteratíván közelítve az optimális megoldáshoz.

A megoldási módszerekkel elért eredmények

A létrehozott szimulációs optimalizáló eszközökkel végrehajtásra került a kiválasztott tesztkészletek elemzése. A vizsgálat az eljárások optimalizációs teljesítőképességét, illetve a futási időigényüket analízálta. A PFSP-tesztkészleteken végrehajtott analízis a TGA-eszközt úgy tekintette, mint a jelenleg elérhető technológiai *state of the art*-ot, a további módszerek teljesítményét ennek optimalizált referenciaeredményeihez hasonlította.

A TGA-eljárás beálláshoz szükséges számítási időigénye képezte az időbeli teljesít-

mény referenciaértékét, illetve az általa elért optimalizált átfutási idő eredményt szolgált az eszközök pontossági tulajdonságainak összehasonlításai alapjául.

A tesztkészleteken végrehajtott futtatások eredményeként meghatározásra kerültek az adott gép-munkaszám kombinációhoz tartozó átfutási idő teljesítmények. A készletek minden egyes kombinációhoz tíz különböző műveleti időállománnyal rendelkeznek, az egy műveleti időállomány alapján meghatározott átfutási idő teljesítményt jelölje: $RPD_{Heur}(M;J)$, ahol M a gépek száma, J a munkák számát, míg a $Heur$ az aktuális optimalizáló eszközt jelöli. Ezen eredmények alapján meghatározható az egy $(M;J)$ párhoz tartozó átlagos átfutási idő teljesítmény, jelölje: $\overline{RPD}_{Heur}(M;J)$.

A meghatározott $\overline{RPD}_{Heur}(M;J)$ értékek segítségével kerültek meghatározásra az egyes szimulációs optimalizáló eszközöket összehasonlító indikátorértékek, melynek számítási módja:

$$Ind_{Heur}(M;J) = \frac{\overline{RPD}_{Heur}(M;J)}{\overline{RPD}_{TGA}(M;J)}$$

Az indikátorértékek alapján az egy optimalizációs eszközre vonatkozóan átlagos indikátorérték állapítható meg: Ind_{Heur} . Az eljárásokkal végzett analízisek eredményei alapján az ismertetett számítási módon meghatározásra kerültek a megoldási módszereket jellemző indikátorértékek. A kutatás során rendelkezésre álló informatikai eszközök a rendkívül nagyméretű feladatok esetében nem tették lehetővé a teljeskörű elemzés végrehajtását.

A kidolgozott szempontrendszer megadja, hogy adott célokkal rendelkező feladat megoldására melyik algoritmust célszerű választani.

pontosság (ind)		futási időigény	
IGA	27,3%	NEH	6,7%
újPNEH	68,7%	újPNEH	20,5%
NEH	69,4%	TGA	100%
TGA	100%	IGA	1197%

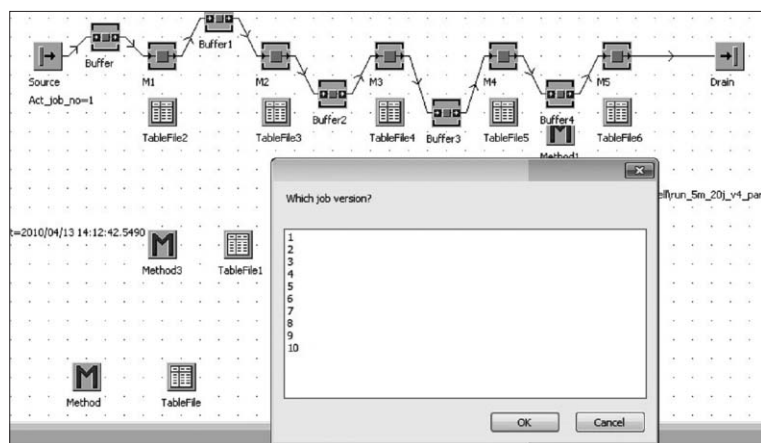
2. táblázat • A szimulációs optimalizáló eszközöket jellemző indikátorok

A kis és közepes méretű minták futtatási eredményeit összegzi a 2. táblázat. Az eredmények alapján megállapítható, hogy:

- a pontosság elsőrendűsége esetén az IGA-eljárás alkalmazása a célszerű;
- a számítási időigény tekintetében a NEH-eljárás ajánlott;
- mindkét szempont tekintetében az újonnan fejlesztett PNEH-eljárás kiegyensúlyozott teljesítményt nyújt.

A futási idő alapján történő választás az ipari gyakorlatban előforduló rövid – sok esetben tíz perces – időtartam alatti döntéshozatal esetében kap kizárólagos szerepet. A nagyobb időigényű eljárások pontosabb eredményt nyújtanak, létjogosultságuk a hosszabb távú heti termelési programok összeállításában van. A számítógépes hardvereszközök fokozatos teljesítménynövekedése lehetővé teszi a jelenleg hosszabb időigényű megoldási eljárások napi szintű alkalmazását.

Kisméretű feladatok esetében a tesztkészlet alapján megállapított eredményeket a 3. táblázat ismerteti. A feladatok méretére jellemző, hogy öt, tíz, húsz gépből álló rendszerek mintegy húsz különböző terméket gyártanak a vizsgált időintervallumban. A táblázat eredményei a pontossági indikátorok és a számítási időigény indikátorok mérőszám-összegeinek átlagértékét mutatják. Az elemzés alapján megállapítható, hogy a specifikus



4. ábra • Kezelői felület a műveleti idő készlethez

optimalizációs eszköz	pontosság és futási időigény
új PNEH	68%
NEH	71%
TGA	100%
IGA	167%

3. táblázat • Optimalizáló eljárások rangsora a kisméretű tesztkészlet eredményei alapján

feladatok esetében a két szempont együttes figyelembe vételével az újonnan fejlesztett PNEH-eljárás biztosítja a legjobb eredményt.

Összefoglalás

A termelő rendszerek összetettségük tekintetében rendkívül bonyolultak, a működtetésüket meghatározó célparamétereik változatosak és sok esetben ellentmondóak is lehetnek. Teljesítőkéességük a velük szemben támasztott elvárások alapján kerül meghatározásra. A termelésben az erőforrások kiegyenlített és folyamatos terhelése, az alapanyagok, félkész és késztermékek készleteinek alacsony szinten tartása fontos szempontok, amelyek meghatározóak egy vállalat által elérhető profit érdekében. A termékellátási folyamat célrendszere gyakran egymásnak ellentmondó paramétereket is tartalmaz, amelyek fontossági sorrendje a vállalati célok, illetve a gazdasági helyzet átalakulása következtében gyorsan változhat. A termelésstervezés és -irányítás feladata, hogy az elvárásoknak és célparamétereknek a lehető legjobban megfelelő termelőrendszer-működést biztosítson. A tervezési folyamatnak a gyártandó termékek mennyiségi és sorrendiségi kérdésein túl az erőforrások, az eszközök, a kapacitások, az anyaggyártáskodás feltételeit is figyelembe kell vennie.

A termelésstervezés jellemzően kis időközökben vagy akár folyamatosan ismétlődő tevékenység, komplex célrendszere a termelőrendszer céldimenzióiban bekövetkező változások függvényében módosul. A tervezési folyamatnak képesnek kell lennie a célrendszerben bekövetkező változások gyors és hatékony megválaszolására, ehhez szükséges eljárásokkal és tervezési eszközökkel kell rendelkeznie.

Ipari rendszerek dinamikus vizsgálatában a termelészsimuláció kiemelt fontosságú. Az optimalizáló eszközök ipari környezetben történő alkalmazása az elméleti tesztkészlet és az ipari feladatok eredményeit, a futtatási időket figyelembe véve szimulációs eszközön belül és azon kívül végrehajtott optimalizációval is megvalósítható. A kutatási munkám a szimulációval támogatott PFSP-termelésoptimalizáció megoldására szolgáló eljárások fejlesztésén túl feladat- és célorientált eszközválasztást támogató eredményt is létrehozott.

A kutatás eredményei alapján végrehajtott optimalizálással elérhető kihozatalnövekedés az ipari gyakorlat visszajelzése szerint 2–10% között mozog.

A kutatómunka számára további fejlesztési terület az összetett célfüggvényű termelési rendszerek szimulációval támogatott optimalizációja, valamint az elvégzett vizsgálatok alapján a termékfajtánkénti mennyiségek, eljárások teljesítőkéességét befolyásoló hatások vizsgálata lehet.

A szimuláción kívül végrehajtott optimalizáció az elérhető eredményjavulás, és jóval gyorsabb lefutáson túl lehetőséget nyit a többprocesszoros informatikai eszközök kihasználására.

Kulcsszavak: *flow shop*, *szimuláció*, *ütemezés*

IRODALOM

- Ackermann, Jörg (2007): *Modellierung, Planung und Gestaltung der Logistikstrukturen kompetenzellen-basierter Netze, Wissenschaftliche Schriftenreihe Heft 59*. September. Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest
- Potts, C. – Osman, I. (1989): Simulated Annealing for Permutation Flow Shop Scheduling. *OMEGA*. 17, 551–557.
- Ruohola, T. – Mattila, I. – Lehtonen, J. M. – Appelqvist, P. (2003): Simulation Based Finite Scheduling at Albany International. *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*.
- Sahni, S. – Gonzales, T. (1978): Flowshop and Jobshop Schedules: Complexity and Approximation. *Operation Research*. 20, 36–52.
- Schmidt, K. (2002): *Methodik zur integrierten Grobplanung von Abläufen und Strukturen mit digitalen Fabrikmodellen*. PhD Thesis. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Aachen
- Schuh, G. (2003): *Produktionsplanung und -steuerung, Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. Springer Verlag
- Schuh, G. – Eversheim, W. (2010): *Produktion und Management*. Betriebsstätte, Springer Verlag.
- Shagafian, S. – Hejazi, S. R. (2005): Flowshop-scheduling Problems with Makespan Criterion: A Review. *International Journal of Production Research*. 43, 2895–2929.
- Siemens PLM (2010): Product Lifecycle Management Conference.
- Sivakumar, A. I. – Chong, Ch. S. (2003): Simulation-based Scheduling Using Two-pass Approach. *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*.
- Spearman, Mark L. – Hopp, W. J. (2008): *Factory Physics*. McGraw Hill.
- Suhl, L. – Günther, H.-O. – Mattfeld, D. C. (2005): *Supply Chain Management und Logistik, Optimierung, Simulation, Decision Support*. Physica Verlag
- Taillard, E. (1993): Benchmarks for Basic Scheduling Problems. *European Journal of Operational Research*. 64, 278–285.
- Tempelmeier, H. – Günther, H.-O. (2005): *Produktion und Logistik*. Springer Verlag
- VDA – Verband der Automobilindustrie, *Ausführungsanweisung Ablaufsimulation in der Automobil- und Automobilzulieferindustrie*. (2008) VDA UAG Ablaufsimulation
- VW KAK – VW Konzern-Arbeitskreis Digitale Fabrik. (2009) Digitale Fabrik, Firmenintern.
- Ackermann, Jörg (2010): *Werkstätten- und Produktionssystemprojektierung*. Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, TU Chemnitz
- Alicke, Knut (2005): *Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken*. Springer Verlag
- Banks, Jerry (ed.) (1998): *Simulation Handbook*. John Wiley and Sons Inc.
- Erdélyi Ferenc (2009): A globális válság néhány technológiai vonatkozása. *Gépgyártás*. 3, 13–21.
- graphIT Kft. (2010): *Digitális gyártás*. Budapest
- Gundry, S. – Bonney, M. (1976): Solutions to the Constrained Flow Shop Sequencing Problem. *Operational Research Quarterly*. 27, 869–883.
- Gupta, J. N. (1971): A Functional Heuristic Algorithm for the Flow Shop Scheduling Problem. *Operational Research Quarterly*. 22, 39–47.
- Ioannou, G. – Zobel, G. I. – Tarantilis, C.D. (2009): Minimizing Makespan in Permutation Flow Shop Scheduling Problems Using a Hybrid Metaheuristic Algorithm. *Computers Operations Research*. 36, 1249–1267.
- Kühn, W. (2006): *Digitale Fabrik, Fabriksimulation für Produktionsplaner*. Carl Hanser Verlag
- Maroto, C. – Ruiz, R. (2005): A Comprehensive Review and Evaluation of Permutation Flowshop Heuristics. *EJOR*. 165, 479–494.
- Martorell, X.T. – Ribas, I. – Companys, R. (2010): Comparing Three-step Heuristics for the Permutation Flow Shop Problem. *Computers Operations Research*. 37, 2062–2070.
- Mátyási Gy. – Szilvási-Nagy M. (2003): Analysis of stl Files. *Mathematical and Computer Modelling*. 38, 945–960.
- Näser, P. (2007): Methode zur Entwicklung und kontinuierlichen Verbesserung des Anlaufmanagements komplexer Montagesysteme, *Wissenschaftliche Schriftenreihe Heft 56*. Juni. Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme
- Pfeiffer András (2007): *Új módszerek a termelésstervezési és -irányítási döntések támogatására*. PhD-értekezés,

A JÁRMŰ- ÉS AUTÓIPAR HATÁSA A KELET-KÖZÉP-EURÓPAI TÉRSÉG VERSENYKÉPESSÉGÉRE

Rechnitzer János

DSc, egyetemi tanár
Széchenyi István Egyetem
rechnj@sze.hu

Smahó Melinda

PhD, egyetemi adjunktus
Széchenyi István Egyetem
smahom@sze.hu

*A jármű- és autóipar nemzetközi összefüggései,
a térség pozicionálása*

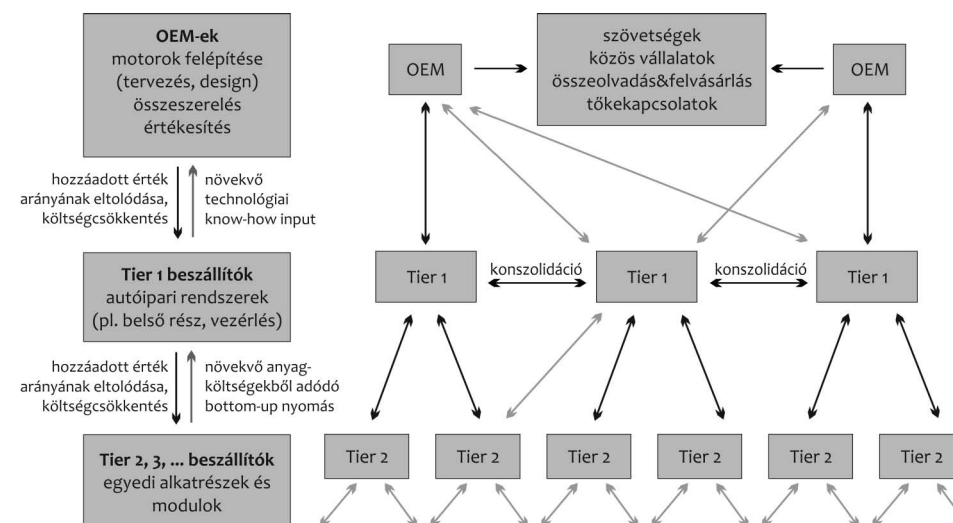
Kelet-Közép-Európa¹ meghatározó jármű- és autóipari hagyományokkal rendelkezik. Így 1989 előtt már saját technológián és fejlesztésen alapuló, valamint a második világháború előtti gyártási tradíciókkal rendelkező országok (Csehország, Kelet-Németország, részben Magyarország) egyaránt voltak, de találhattunk nyugat-európai licencek alapján gyártókat (Lengyelország, Jugoszlávia és Románia) és alkatrészgyártást végzőket is (Magyarország, Bulgária). Mindezek ellenére, Kelet-Közép-Európában a rendszerváltozásig nem alakultak ki jelentős jármű- és autóipari központok s azokra épülő körzetek. Minden országban egy-egy vagy néhány nagy ipari centrumban ugyan domináns volt a jármű- és autóipar, vagy annak valamilyen szegmense, de ezek nem váltak olyan ipari

¹ Az általunk Kelet-Közép-Európaként definiált kutatási térség az alábbi országokat foglalja magába: Németország, Ausztria, Lengyelország, Csehország, Szlovákia, Szlovénia, Magyarország, Románia. A többváltozós statisztikai elemzésekbe kizárólag ezen országok adatai kerültek bevonásra, a további vizsgálatoknál ugyanakkor az említetteken kívül más országok is felbukkanhatnak.

bázissá, amelyek tartósan szolgálhatták volna az ágazat fejlesztését, annak megújítását. Annyiban viszont számottevő volt a szerepük, hogy a rendszerváltozás után a nagyobb központok versenyelőnnyel indultak a barna- és/vagy zöldmezős beruházást kezdeményező, a nyugati-országokból érkező jármű- és autóipari cégek megnyerésében (Hardi, 2012).

Kelet-Közép-Európában a járműipar az elmúlt húsz esztendőben dinamikusan fejlődött. Ezen belül az autóipar nettó importálóból nettó exportálóvá vált, hiszen míg 2006-ban 300 ezer járművet gyártottak, addig 2012-re már 1,1 milliót terveznek. Az autóipari beruházások közvetlen külföldi befektetések révén valósultak meg. Ezt ösztönözte az olcsó és képzett munkaerő, valamint az új piacokon való megjelenés, de nem feledkeztünk meg a nyugat-európai piacok földrajzi közelségéről sem. A térség autóipari beruházásai többségükben zöldmezős fejlesztések. Az autógyárak (OEM²-ek) létesítését követően az egyes országokban megindult az első körös beszállítók megtelepedése, s ezzel a járműipari értéklánc (piramis) kialakulása (1. ábra). A második- és harmadik körös beszállítók, –

² Original Equipment Manufacturer



1. ábra • Az autógyártók és a beszállítók közötti kapcsolatrendszer
(Unicredit Group, 2007, 9. alapján Smahó, 2012)

melyek között egyre nagyobb hányadot képviselnek az egyes telephelyi országok vállalkozásai – csak fokozatosan, időben elcsúszva, döntően az ezredforduló után kezdtek kiépülni, illetve napjainkban létesülnek (Barta, 2012; Losoncz, 2012).

A 2008-ban indult gazdasági válság visszaesést eredményezett a vizsgált országokban, de 2010-re a kelet-közép-európai térség elérte a korábbi szintet. Eredménynek tekinthető, hogy nem zártak be autógyárat, ami a gyártók rugalmasságára vezethető vissza, valamint az elmúlt tíz-tizenöt éves munka- és szervezési tapasztalatokra, de a dolgozók alkalmazkodása sem elhanyagolható. A térség országaiban az egyes kormányok is intézkedéseket hoztak a dinamikus ágazat megvédésére, ezek a piacélnkítést segítő vásárlásösztönzésben jelentek meg. A nyugat-európai országok intenzívebb vásárlásösztönzései (roncsautó-programok) a kisebb fogyasztási, környezetterhelésben jobb paramétereket

felmutató járművekre irányultak, mivel ezen típusok gyártása meghatározó a kelet-közép-európai térségben, így a termelés iránti kereslet ezen gyártóknál (Hyundai–Kia, Fiat) nem csökkent. A térség kormányzatai mindezeket túl – hasonlóan a nyugat-európai országokhoz – nagy szerepet tulajdonítanak a jármű- és autóiparnak. A támogatások nyújtásakor egyértelműen felhívták a figyelmet arra, hogy elvárják a foglalkoztatottság fenntartását, a munka- és telephelyek megőrzését, a termelési tervek újragondolását. Az európai alkalmazkodási stratégia sikeresebb volt az észak-amerikainál (Barta, 2012; Losoncz, 2012).

A kelet-közép-európai térség autóiparának termelése az új évezred első évtizedében ugyan közel 30%-kal nőtt, de így is kissé lemaradt a globális termelési dinamikától (33,4%). A németországi vállalatok dominanciája meghatározó, ám a németországi és a kelet-közép-európai térség más országai közötti munka- megosztás aránya az elmúlt tíz esztendőben

változott, a német részesedés 72:23-ról, 64:36%-ra csökkent, ami a vizsgált térség termelési potenciáljának növekedését jelzi (1. táblázat) (Barta, 2012).

A jármű- és autóipar globális áttrendeződése az elmúlt két évtizedben Európában is kimutatható volt, hiszen míg a négy legfontosabb autógyártó ország 1950-ben hetven gyárat és márkát működtetett, addig 2008-ra csupán hat maradt. Országoként eltérő módon, de a világgazdaság trendjei alapján történtek az átstrukturálódások, ennek eredménye többek között a beolvasztások megtörténte, a stratégiai szövetségek kialakulása, és a beszállítói piacok konszolidációja. Térségünket ezen átalakulások közül a komplex autógyárak relokációja érintette, hiszen megindult

a magas költségű térségekből a gyártás kitelepítése, új piacok jelentek meg, a verseny egyre erőteljesebbé vált, a kutatás-fejlesztés révén számos új funkció épült be a gépjárművekbe, miközben a fogyasztói igények is megnöttek a termékekkel szemben (Barta, 2012).

A kutatás során felmerült a kérdés, hogy a kelet-közép-európai térség megjelenése az autó- és járműiparban milyen hatással lehet a nyugat-európai iparra, kielemezhető-e a feszültségek a térségek és egyben az országok között, amelynek politikai és gazdasági következményei lehetnek. Igazolható, hogy a verseny nem Németország és Kelet-Közép-Európa országai között mutatható ki, hanem a dél-európai periférius országok és az általunk vizsgált térség között. Ezt bizonyítja,

országok	a gyártott járművek száma (1000 db)		az országok részesedése a KKE és a világ járműgyártásában		
	2000	2010	KKE = 100%		világ = 100%
			2000	2010	2010
Németország	5527	5906	77,2	63,8	7,6
Ausztria	141	105	1,9	1,1	0,1
Csehország	456	1076	6,4	11,6	1,4
Lengyelország	505	869	7,1	9,4	1,1
Szlovákia	182	557	2,5	6,0	0,8
Románia	78	351	1,1	3,8	0,5
Szlovénia	123	211	1,7	2,3	0,3
Magyarország	137	168	1,9	1,8	0,2
Szerbia	13	18	0,2	0,2	0,0
összesen	7162	9261	100,0	100,0	12,0
Oroszország	1206	1403			1,8
Törökország	431	1094			1,4
világ összesen	58 374	77 585			100,0

1. táblázat • Kelet-Közép-Európa (KKE)* megerősödése a világ autógyártásában (Forrás: Barta, 2012)

hogy a német autóipari import összességében nem nőtt ugyan, de átstrukturálódott, hiszen a kelet-közép-európai térség országai együttesen radikálisan növelték beszállításaikat Németországba Spanyolországgal és Portugáliával szemben (1995 és 2005 között 9%-ról 37%-ra). Megerősíti mindezt, hogy a külföldi működőtőke-beáramlás a jármű- és autóiparba 2006-ig 17 milliárd eurót tett ki, amiből Magyarország (28,8%), Lengyelország (30,3%) és Csehország (28,9%) részesedése a meghatározó. Az összeszerelő üzemek mellett megjelentek a legnagyobb beszállítók is, s ezzel a szektor fejlődése jelentős dinamikát mutat, hiszen a térség ipari hozzáadott értékéből az ágazat részesedése 2000 és 2005 között 5,8%-ról 7,3%-ra növekedett (Barta, 2012). Mindemellett már megfigyelhető, és a jövőben várhatóan tovább erősödik a BRIC-országok³ előretörése a járműiparban, ami veszélyeztetheti Kelet-Közép-Európa bérköltségen alapuló versenyelőnyeit (Smahó, 2012).

A kelet-közép-európai térség egyes országai között tehát kialakult a verseny a jármű- és autóipari beruházások fogadására. Bár az állami támogatások közel azonos rendszert és szerkezetet mutatnak a térségben, az adórendszerekben még lényeges eltérések vannak, sőt, az ágazat gazdaságpolitikai ösztönzésének különbségei is megfigyelhetők. Összességében azonban jelentős differenciákat nem találtunk az országok között; a telephelyválasztásban és a fejlesztésben döntő lehet az adott ország politikai klímája, a gazdaságpolitika kiegyensúlyozottsága, a rendelkezésre álló munkaerő képzettsége és a képzési, oktatási rendszer, valamint az adminisztrációs környezet s a telephelyi kínálat komplexitása.

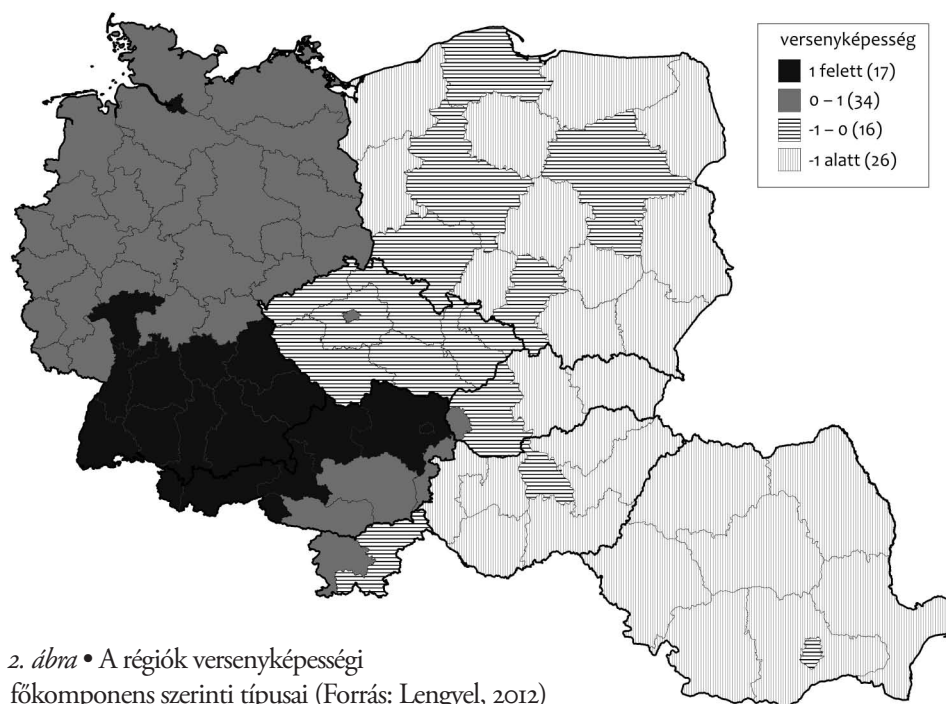
³ Brazília, Oroszország, India, Kína (Brazil, Russia, India, China).

Régiók és termelési központok versenyképessége

A kutatások másik nagy blokkjának célja, hogy Kelet-Közép-Európa térségén belül meghatározzuk a jármű- és autóipar fogadása szempontjából releváns paramétereket, majd ezek alapján tipizáljuk a vizsgált térség régióit (NUTS 2). Itt értelemszerűen a magyar régiók és központok pozicionálására törekedünk. A cél tehát megadni, egyrészt, azokat a tényezőket, gazdasági, társadalmi és más faktorokat, amelyek erősen determinálják a vizsgált területi egységek helyzetét, helyezését, másrészt, a magyar régiók és központok pozicionálásával ajánlásokat tudunk tenni a helyzetük javítására, s egyben a versenyképességük erősítésére.

A versenyképesség elméleti modelljeinek értékeléséhez, valamint az ezekkel kapcsolatos kutatásokhoz annyiban járultak hozzá elemzéseink, hogy sikerült a meglévő piramismodellebe új elemeket is beépíteni (Lengyel, 2012). A klasszikus munkatermelékenység és foglalkoztatás alapkategóriái finomításra kerültek, s ennek következtében a kutatás-fejlesztési, a humántőkét megjelenítő, a működőtőkét megragadó alaptényezők mellett beépültek a modellbe a társadalmi tőke elemei, valamint a *traded* szektorra (exportra termelő ágazatok) vonatkozó paraméterek is. A kutatás során nyolc ország 93 régiójának NUTS 2 egységeit (régióit) hasonlítottuk össze, ahol 91 jármű- és autóipari gazdasági szervezet működik. Az elemzésekhez 25 változót vettünk alapul, amelyeket különféle matematikai-statisztikai módszerekkel értékeltünk.

A versenyképesség alkotó tényezőit, így a munkatermelékenységet és a foglalkoztatást elemezve megállapítható, hogy a térség erősen differenciált, abban jól elhatárolható törésvonal rajzolódik ki. Az elkülönülés általában



2. ábra • A régiók versenyképességi főkomponens szerinti típusai (Forrás: Lengyel, 2012)

azzal jellemezhető, hogy a fejlett nyugat-európai piacgazdaságok⁴ és a felzárkózó kelet-közép-európai térség régiói markánsan elválnak egymástól. Míg Nyugat-Európában a magas foglalkoztatás magas termelékenységgel párosul, addig Kelet-Közép-Európában ennek pontosan a fordítottja érvényesül, vagyis az alacsony foglalkoztatás alacsonyabb termelékenységgel jár együtt. Szűkebb kutatási területünk, a Nyugat- és Közép-Dunántúl ebben a régióhalmazban a volt szocialista országok régióihoz képest – mindkét vonatkozást tekintve – kedvező helyzetben van, nincs távol cseh régióktól (2. ábra). A többi magyar régió ugyanakkor – a fővárost kivéve, mert az viszont közelít a nyugat-európai típushoz – erősen leszakadva, a nagytérség periferiájához sorolódott. Kimutatható volt, hogy

⁴ Jelen elemzésben Németország és Ausztria.

a jármű- és autóipari vállalatok jelenléte a komplex versenyképességben nem jelent differenciáló tényezőt, nem lehet tetten érni ezen szektorok egyértelmű befolyását sem a foglalkoztatásra, sem a munkatermelékenységre (Lengyel, 2012).

A mélyebb vizsgálatok – a versenyképességre ható tényezők elemzései – ugyanakkor megállapították, hogy két faktor határozza meg a régiók helyzetét a versenyképességben. Az egyiket nevezzük *humán tőkének* (ez a tényező a munkaerő fejlettségét, a munkaerővonzás képességét és a szabadalmak meglétét foglalja magában), amely erősen megosztja a térséget, árnyaltabb képet nyújtva annak differenciálásában. Vizsgált régióink (Nyugat- és Közép-Dunántúl) ismét közelebb állnak a cseh és lengyel régiók nyugat-keleti határmezsgyéhez közelítő értékeihez. A többi magyar régió viszont erősen leszakadt, a periférikus

román régiókkal megegyező értékek jellemzik azokat. A másik a *kutatás és fejlesztés* faktor – kutatás-fejlesztési kiadások, *high-tech* szektorban foglalkoztatottak aránya, állótőke-képződés, nyertes keretprogramok –, ami a tudás-alapú gazdaság és az innovatív szektorok jelenlétét szimbolizálja, így jobban szétteríti Kelet-Közép-Európa térségét (Lengyel, 2012).

A járműipari kutatás-fejlesztésnek három sajátosságát sikerült feltárni. Az első, hogy az értéklánc átalakulása következtében egyre nagyobb szerepük lesz a beszállítóknak a fejlesztésben, a második, hogy mélyreható technológiai változás jellemzi a szektort, aminek következménye a moduláris rendszerek terjedése, s ezzel a termékválaszték jelentős szélesítése. S végül a harmadik irány, hogy – a fogyasztói igények nyomására – egyre több újítás, fejlesztés jelenik meg az alacsony kategóriájú, nagyon olcsó autókban, s később ezek új megoldásai kerülnek át a felsőbb kategóriájú járművekbe. Igazolást nyert továbbá, hogy ebben a felfokozott fejlesztési lendületben a beszállítók az autógyárakhoz, az összeszerelő üzemekhez közelebb települnek, hogy a közvetlen kapcsolatot kiépíthessék, ugyanakkor

magánál a beszállítói hálózatonál is erőteljes koncentráció zajlik le, ami növeli az innovációs potenciált. Ehhez a körhöz egyre intenzívebben kapcsolódnak – a telephelyek választásában is – a kimondottan fejlesztésre szakosodott vállalkozások is, melyek részt vesznek a beszállítóknak, de magának a gyártóüzemnek a komplex fejlesztésében is (Smahó, 2012).

A kutatás-fejlesztési tevékenységek, mint a tudástermelés és közvetítés legmagasabb szintjének térségi elemzése során megállapítható, hogy Kelet-Közép-Európa térségében a járműipari egységek megjelenését követően fokozatosan épülnek ki az intézmények. A jelentősebb termelési hagyományokkal rendelkező Csehország a kutató-fejlesztő intézményeivel (fejlesztő helyek, egyetemi oktatás, kutatási bázisok) kiemelkedik a térségben, ugyanakkor mindegyik kelet-közép-európai országban megfigyelhető, hogy megjelennek a járműipar funkcionális megújítását szolgáló rendszerek. Az országok közötti különbségek e vonatkozásban is érzékelhetők: vannak feltörekvők (Szlovákia, Lengyelország) és jó adottságokkal rendelkezők, de lassabban felzárkózók (Magyarország) is (2. táblázat).

kategória	Szlovénia	Szlovákia	Magyarország	Románia
tudományos és technológiai park		1		
egyetemi központ	6	1	3	2
kiválósági központ		7		1
technológiafejlesztő központ	63	9	13	6
kutatóközpont / kutatóintézet	4	8		3
mérnöki szolgáltatásokat nyújtó központ	8	6	3	4
tesztközpont	1	2		
innovációs központ	3	2	1	
összesen	85	36	20	16

2. táblázat • Autóipari kutatás-fejlesztési kapacitások Közép-Kelet-Európa néhány országában (2010) (Forrás: Smahó, 2012)

A jármű- és autópár fejlesztésében meghatározó lehet a termelésben részt vevő szereplők új típusú együttműködése, ami a területi koncentráció következménye is. A kutatás során feltárásra kerültek a kelet-közép-európai térség országában létrejött jármű- és autópári klaszterek (Dominek, 2012; Grosz, 2012). A jármű- és autópár a termelés szerkezetével és szervezeti rendszerével kiváló keretet nyújt a vállalati együttműködésre, hiszen egyrészt a beszállítói kapcsolatok egyértelművé teszik a járművek gyártói és az alkatrészgyártók folyamatos együttműködését, másrészt állandó megújítási kényszer jellemzi a szektort, aminek következtében mindegyik szereplőnek érdeke az innovációs potenciál erősítése. A kelet-közép-európai térség országában erősen változik a jármű- és autópári klaszterek megjelenése, illetve azok működése. Németországban és Ausztriában figyelhetjük meg a legsokoldalúbb klasztereket, amelyek kialakulását tudatos ipar(klaszter)politika ösztönzi, de maguk a vállalkozások is határozottan igénylik a folyamatos kommunikációt, információs és innovációs környezetet, annak szervezett közvetítését. A kelet-közép-európai térség volt szocialista országában, ahol a jármű- és autópár már a kilencvenes években megjelent, létrejöttek a szektorhoz kapcsolódó klaszterek, követve a hálózatépítés rendszerét, annak tagsági szerkezetét (termelő vállalatok, felsőoktatás, kutatás-fejlesztés, tervező szervezetek, érdekképviselők, innovációs ügynökségek, finanszírozó szervezetek).

Az alulról jövő kezdeményezések mellett egyértelműen kimutathatóak a felülről érkező, kormányzati szintű ösztönzések és – változó intenzitással és eszközökkel – támogatások. Az eredményességet nem könnyű még regisztrálni, ennek oka a vállalkozói kultúrában éppen úgy keresendő, mint a gyártók és

beszállítók országon kívüli függőségében vagy az ösztönzők és támogatások időszakos jellegében. Magyarországon huszonkét jármű- és autópárhoz erősen kapcsolódó klasztert regisztrált a kutatás. Mindez egy szétaprózott szervezeti rendszert jelenít meg, melyet a támogatási források éppen úgy megosztanak, mint a szellemi, menedzsment erőforrások. Az alapító szervezetek tarkasága és többszörös megjelenése nem képes hatékony, a szektor fejlődését erősíteni képes hálózati rendszert létrehozni, s ezzel a hazai ipari, fejlesztési és oktatási bázis folyamatos megújítására hatni.

A jármű- és autópár, valamint a regionális fejlesztési stratégiák összefüggéseit vizsgáló elemzés arra hívja fel a figyelmet, hogy az ágazatcsoport közvetlenül nem épült be a kelet-közép-európai térség negyvenhat NUTS 2 régiójának fejlesztési koncepciójába (Tóth, 2012). A régiók fejlettsége nagyon különböző a nagytérségben, így a fejlesztési súlypontok roppant differenciáltak.

A fővárosok, valamint a számottevő gazdasági potenciállal rendelkező régiók esetében a szektor szempontjából kiemelendő a tudásorientált fejlesztések támogatása, ami a felsőoktatás és a kutatás-fejlesztési potenciálok erőteljes javítását célozza meg. Ez a jövőben kedvezhet az egyes országok jármű- és autópárának, azonban más kutatásokból ismert, hogy nagyon lassan épülhetnek be ezen potenciálok a fejlesztésekbe, döntően a képzett munkaerő jelenthet fokozott vonzást, illetve erőforrás-kínálatot. A kevésbé fejlett régiókban inkább az infrastruktúra-fejlesztést hangsúlyozzák, ezen belül a telepítési tényezők kedvezőbb alakítását célozzák meg, ami lehetőséget kínálhat a kapacitások bővítéséhez, illetve a beszállítói hálózat újabb tagjainak letelepedéséhez. Az elmaradott régiók fejlesztésében a kutatás mérsékelten talált

utalásokat a jármű- és autópárra, hiszen ezen térségek elérhetőségének kialakítása a cél, illetve a foglalkoztatás minimális biztosítása. A kelet-közép-európai térség régióinak fejlesztési kevésbé számolnak a jármű- és autópárral, annak kapacitási bővítésével, azonban a nagytérség erősen megosztott, a régiók között egyre mélyülő különbségek vannak, így a fővárosok és térségeik, valamint a növekedési potenciált felmutató központok lehetnek esélyesek a jármű- és autópár, vagy az ahhoz kapcsolódó tevékenységek fogadására.

A jármű- és autópár fejlesztésénél szereplőként kell számba venni a helyi kormányzatok által indukált akciókat (Lados – Kollár, 2012). A kutatás felvázolta ennek a lokális tényezőnek a sajátosságait, eszköz- és intézményrendszereit, s egy magyarországi sikeres centrum, Győr példáján keresztül mutatta be azokat a tényezőket, amelyekkel a város élni tudott a dinamikus ágazat fejlesztése érdekében. Ezt lényegében egy évszázados hagyomány alapozta meg, amely az ipar, majd a különféle szolgáltatások fejlesztésére irányult, s megalapozta az intézményi kereteket, de a mentalitást, a tevékenységek fogadására alkalmas vezetési kultúrát is. A rendszerváltozástól kezdődően tudatosan történt meg az új ipari bázisok megteremtése, miközben radikálisan átrendeződött a város gazdasági szerkezete. Nagy autógyár (Audi) települt a korábban létesített ipari infrastruktúrára, aminek telepítésében szerepet játszottak a jármű- és autópári hagyományok, a város kedvező közlekedési helyzete, munkaerő-ellátottsága, felsőoktatási bázisa és szakképzési rendszere. A nemzetközi nagyvállalat által generált gazdasági környezet mellett további ipari és szolgáltató vállalkozások is megjelentek, melyek letelepedésében a kedvező termelői infrastruktúra nagy segítséget

jelentett. A városi kormányzat a 2010-es évekre már növekedési pólusban gondolkodott, aminek alapjait az ipari potenciál és az azt fogadó termelői infrastruktúra mellett a dinamikusan fejlődő egyetemi tudásbázis is erősítette, miközben a városi szolgáltatások és a település miliője szintén radikálisan megújult. A sikeres győri modell bizonyítja, hogy a helyi gazdaságfejlesztés távlati stratégiája akkor működőképes, amikor a település és annak gazdasága folyamatosan együttműködik, s ehhez adottak a kommunikációt segítő vagy gerjesztő intézmények (felsőoktatás, szakképzés, érdekképviselő) és szervezetek.

Ajánlott fejlesztési irányok

A kutatások bizonyították, hogy a jármű- és autópár a *kelet-közép-európai térség gyorsan fejlődő, dinamikus ágazatcsoportja*, amelynek fejlesztési kezdeményezéseiért közel azonos telepítési adottságokkal rendelkező országok és telepítési tényezőkben már jobban differenciált régiók és központok állnak versenyben. Ebben az egyre élénkülő versenytérben kell a magyar régióknak a helyzetüket megerősíteniük és oly módon fejleszteniük, hogy egyrészt a meglévő jármű- és autópári bázisok megújításait képesek legyenek segíteni, másrészt (részben ezekhez is kapcsolódni kívánó) új kapacitások kiépülését szorgalmazzák. A két iránynak vannak közös elemei, így ajánlásainkban azok kiemelésére törekszünk.

Egyértelművé vált a kutatásból, hogy azok a térségek és központjaik lehetnek a *nyertesei* az elkövetkező öt-nyolc év jármű- és autópári fejlesztéseinek, amelyek *tudatosan alakítják a telephelyi tényezőket*, olyan környezetet teremtenek, amelyben a szektor működése és fejlesztése zavartalan, s mindeközben – a beszállítói rendszerek célirányos fejlesztésével – a piaci kapcsolatokat is élénkítik.

A kutatás szerint a *munkaerő képzettsége*, annak rendelkezésre álló mennyisége a jövő fejlesztéseinek legfontosabb záloga. A szakmunkásképzés gyors megújítása, a duális képzés bevezetése, a munkaerőpiaci belépésre való felkészítés, a munkakultúra kedvező elemeinek megtartása és újabbak kiépítése (kiemelten az idegen nyelvek ismerete) a legfontosabb feltétele a jármű- és autóipar fejlesztésének. A középszintű képzésnél célszerű térségi dimenzióban gondolkodni, ami egyrészt az oktatási kapacitások összehangolását, másrészt az azok közötti munkamegosztások – egyben erőforrások – ésszerűbb formálását jelentheti.

A képzésfejlesztésnél nemcsak a középszint megújítása kívánatos, hanem még nagyobb figyelmet kell fordítani a *felsőoktatásra*, ahol az új ismeretek gyors átadása, az idegen nyelvi képzések erősítése, az innovációs aktivitás kibontása mellett a kutatás-fejlesztés bázisainak sokoldalú kiépítése és megújítása alapvető versenykövetelmény. Célszerű a jármű- és autóiparhoz kapcsolódó felsőoktatási intézmények hálózatát létrehozni, köztük élénk szakmai, oktatási és kutatási kapcsolatokat teremteni és ösztönözni, növelni a specializációkat, s a szakmai elmélyülést nemzetközi kapcsolatokkal ösztönözni.

A felsőoktatás, s az arra épülő *kutatás-fejlesztés* mellett a két régióban létrejöttek azok az innovációt támogató szervezetek, amelyek nagy tapasztalattal rendelkeznek a KKV-szektorban a műszaki, a termék- és tevékenység-fejlesztések ösztönzésében, azok folyamatának támogatásában. Tapasztalható, hogy szinte mindegyik jármű- és autóipari vállalatot fogadó központban megtalálhatók ezen innovációs központok, s azok szervezetei. Célszerű lenne, ha tevékenységükben a szektor nagyobb szerepet kaphatna, kiemelten

kezelnék azon vállalkozásokat, amelyek a járműgyártáshoz kötődnek, vagy annak irányában kívánnak fejleszteni. Természetesen ehhez olyan decentralizált eszközökre is szükség lenne, melyek területi szinten állnának rendelkezésre, és a decentrumok igényei szerint oszthatók el.

Az ipari infrastruktúra a két régióban magas szintű, biztosítottak azok a telephelyi feltételek, amelyek fogadni tudják a jármű- és autóipar egységeit. Az ipari parkok hálózata azonban nem nyújt összehangolt kínálatot, nincsenek specializált telephelyi rendszerek, a központok inkább versenyeznek, mint együttműködnek. Nem jelenik meg az együttes kínálat és fellépés. A beszállítók ésszerűbb terítésével – munkaerő, szállítási költségek, specializációs ismeretek, képzési helyek – jelentős költségcsökkentés érhető el, ami további gazdasági hatásokat is eredményezhet (újabb vállalkozások telepítése, közlekedési kapcsolatok javítása, települési környezet megújítása, kistérségi hatások élénkítése).

Tapasztalható, hogy a kelet-közép-európai térségben az egyes járműipari központok körül *beszállítói tömörülések* rajzolódnak ki. Ez természetes és racionális iránya az ipari fejlődésnek. A területi politika feladata, hogy akár országos, akár térségi és települési szinten ösztönözze ezen koncentrációk létrejöttét, majd folyamatos működését. A fentebb jelzett telephelyi kínálat, az innovációs folyamatok segítése, a szakember-ellátottság támogatása mellett a hálózati rendszerek kiépülésének erősítése sem elhanyagolható. A jármű- és autóiparhoz kapcsolódó *klaszterek* száma hazánkban ugyan magas, s ebben a két régió vállalkozásai is érintettek, azonban ezek a csoportosulások nem tudnak karakteres jelleget ölteni, nem váltak még a szektor megújításának gerjesztőjévé. A megalakulás (szerve-

zet létrehozása, kiépülése) szintjét kell meghaladni a klaszterek vonatkozásában, amihez az egyértelmű támogatások, a stabil szervezeti rendszerek és világos – teljesíthető – célok szükségesek.

Végezetül, de nem utolsósorban, ki kell emelni, hogy a két régióban fokozatosan kibontakozik egy – jelenleg spontán – *jármű- és autóipari körzet*, amelynek célirányos alakítása a szereplők (állam, vállalkozások, önkormányzatok, hídszervezetek, felsőoktatás és oktatási intézmények, kutató-fejlesztő szervezetek stb.) széles körének együttműködését kívánja meg. Nem lehet már az egyes lokális szintű telepítési tényezőket elszigetelten fejleszteni, nem vezet eredményre a munkaerőbázisok csak helyi megújítása vagy a közlekedési rendszerek alakítása, de a különféle közszolgáltatások (egészségügy, oktatás, közintézmények) egyedi fejlesztése sem. A kibontakozó jármű- és autóipari régióban ezeket összehangoltan – tervek alapján – kell fejleszteni, megtartva az egyediségeket, a centrumok, térségek adottságait, de össze kell hangolni, egymásba kell kapcsolni az erőforrásokat, intézményeket, lokális, ágazati fejlesztési törekvéseket. Csak egy tudatos, jövőorientált

jármű- és autóipari körzet szakszerű kialakításával lehet versenyelőnyhöz jutni a kelet-közép-európai térségben az elkövetkező öt-nyolc évben.

Jelen tanulmány a *Mobilitás és környezet: Járműipari, energetikai és környezeti kutatások a Közép- és Nyugat-dunántúli régióban* a TÁMOP-4.2.1./B-09/1/KONV-2010-2013 keretében az SZE 1.03.1. altéma *Versenyképesség, Kelet-Közép-Európa* című K+F projektjének keretében született tanulmányokra épül. A kéziratként megjelölt tanulmányok a fenti projekt jóvoltából 2012-ben önálló kötetben kerülnek megjelentetésre.

„TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KONV-2010-0003: *Mobilitás és környezet: Járműipari, energetikai és környezeti kutatások a Közép- és Nyugat-Dunántúli Régióban*. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.”

Kulcsszavak: *jármű- és autóipar, Közép- és Nyugat-dunántúli régió, kelet-közép-európai versenytér, beszállító hálózat*

IRODALOM

- Barta Gy. (2012): *A kelet-közép-európai járműgyártás európai összefüggései*. Kézirat.
Dominek Á. (2012): *Járműipari klaszterek a kelet-közép európai térségben*. Kézirat
Grosz A. (2012): *Az autóipar klaszteresedése Magyarországon*. Kézirat
Hardi T. (2012): *A közúti járműgyártás szerepe a kelet-közép- és délkelet-európai ipari térségek kialakulásában*. Kézirat
Lados M. – Kollár K. (2012): *A helyi gazdaságfejlesztés és a járműipar Győr példáján*. Kézirat

- Lengyel Imre (2012): *A kelet-közép-európai országok régióinak versenyképessége*. Kézirat
Losonczi Miklós (2012): *A kelet-közép-európai járműipar piaci környezete*. Kézirat
Smahó Melinda (2012): *A tudás transzferek rendszerei és a járműipar*. Kézirat
Tóth Péter (2012): *Regionális fejlesztési stratégiák és a járműgyártás kapcsolata Kelet-Közép-Európában*. Kézirat
Unicredit Group (2007): *The Automotive Sector in CEE: What's next? Analysis by the Unicredit Group New Europe Research Network*. 2007. december. • <http://www.docstoc.com/docs/88989545/The-Automotive-sector-in-CEE---Whats-next> letöltve: 2012. január 6.

AZ ÚT KÉPÉNEK HATÁSA A SEBESSÉGVÁLASZTÁSRA KÜLTERÜLETI UTAKON

Iván Gabriella Koren Csaba

tanszéki mérnök, PhD-hallgató,
Széchenyi István Egyetem Közlekedés-
ivang@sze.hu

egyetemi tanár, tanszékvezető,
Építészeti és Településmérnöki Tanszék, Győr
koren@sze.hu

Bevezetés

A helytelen sebességválasztás komoly biztonsági problémát jelent. Adott útkialakítás esetén szoros kapcsolati rendszer van a sebesség és a baleseti kockázat, valamint a sebesség és a balesetek súlyossága között (Treat et al., 1977; Weller et al., 2006).

Az önmagát magyarázó út olyan módon megtervezett és kialakított út, mely a megfelelő viselkedésre ösztönzi a járművezetőket, és így elkerülhetőek a vezetési hibák. Egy tökéletesen megtervezett, önmagát magyarázó úton nincs szükség a megengedett legnagyobb sebességre vagy veszélyre figyelmeztető táblákra (Lippold, 2009). A biztonságos útervezés az út funkciójának, kialakításának és használatának egyensúlyára épül. Helyes geometriai kialakítás esetén a használat módja (például a tényleges sebesség) megfelel az elvártnak.

Egy hatékony felmérési módszer

Az úthasználók által választott sebesség meghatározása hagyományosan sebességméréssel történik. Az utóbbi időben viszont több

külföldi tanulmány alkalmazta azt a módszert, hogy egy-egy útkialakítást (road scene) bemutató fényképek alapján kérdezik meg a vizsgált személyeket a sebességválasztásról. A következőkben három ilyen tanulmányt ismertetünk röviden.

Hollandiában a sebességhatárok hitelességével kapcsolatos kérdéseket a 80 km/h megengedett sebességű külterületi utak vizsgálatával próbálták megválaszolni (Goldenbeld – van Schagen, 2007). Kérdőíves felmérést végeztek a holland lakosság körében, amelynek során eltérő pálya- és környezeti adottságokkal rendelkező, de egyazon útszállítóba tartozó útszakaszok fényképei alapján kellett döntést hozniuk. A résztvevőknek egyrészt arra kellett válaszolniuk, hogy milyen haladási sebességet választanának, és milyen érzékeléssel bíznának az adott útszakaszon való közlekedéshez úgy, hogy eközben az ott megengedett sebesség értékét nem ismerik.

Nagy különbségek adódtak az egyes képek esetében a választott sebességnek és a biztonságosként megítélt sebességnek a 80 km/h-s megengedett legnagyobb sebességtől való eltérései tekintetében. Kor szerint csoporto-

sítva az adatokat az eredmények azt mutatták, hogy a különböző csoportok esetében általában ugyanazon út- és útmenti környezeti jellemzők vannak hatással a döntésekre. Valamennyi csoportot befolyásoló körülményként jelent meg a helyszínrajzi ív jelenléte, a helyzet egyértelműsége, a látótávolság, valamint a legtöbb csoport esetében a jobbra való láthatóság és a pálya szélessége is kiemelkedő jelentőséggel bírt a sebesség megválasztásánál.

Egy ausztrál kutatásba összesen 4100 résztvevőt vontak be (Lahaussé et al., 2010). Négy különböző útkategória megengedett sebességének elfogadottságát vizsgálták. Négy különböző úttípusról készült felvétel alapján kellett válaszolniuk a következő kérdésekre:

- milyen haladási sebességet választana ezen az úton kis forgalom esetén?
- mennyi ezen az úttípuson a megengedett sebesség?
- mit gondol, a jelenlegi sebességhatár megfelelő ezen az úttípuson?
- mit gondol, előnyösebb lenne csökkenteni a sebességhatárt ezen az úttípuson?

A résztvevők többsége helyesen meg tudta adni a sebességhatár értékét a belterületi lakóutca és gyűjtőút esetében, viszont sokan nincsenek tisztában a külterületi utakon érvényes sebességhatárokkal, és mindössze 8%-uk volt képes mind a négy úttípus esetében helyesen megadni a megengedett legnagyobb sebességet. A válaszadók többsége támogatta a 100 km/h megengedett legnagyobb sebességű külterületi, osztatlan pályás utakon és a külterületi burkolatlan utakon a sebességhatárok csökkentését, de mindössze egyharmaduk nem ellenezte ezt az intézkedést a belterületi utak esetében.

A résztvevőket különböző jellemzőik és a kérdésekre adott válaszaik alapján négy klaszterbe rendezték, és így elemezték őket. A se-

bességhatár-csökkentést kisebb-nagyobb mértékben támogatók, illetve ellenzők klaszterei között lényeges különbségek voltak a demográfiai jellemzők, a közlekedési szokások és a társadalmi-gazdasági helyzet tekintetében.

2011 februárjában felmérést végeztek a Connecticuti Egyetemen (Garrick, 2011). A hallgatókat két csoportra osztották. A résztvevőknek tizenkét-tizenkét, különböző helyszínen készült fényképet mutattak, amelyek különböző útkeresztmetszeteket ábrázoltak, a hallgatóknak pedig meg kellett adniuk azt a haladási sebességértéket, amit az adott körülmények megfelelőnek és biztonságosnak éreztek. Az egyik csoport képein közép-ső terelővonal választotta el a forgalmi irányokat, a másik csoport ugyanezeket a fényképeket kapta, annyi különbséggel, hogy ezekről képszerkesztő program segítségével eltávolították a terelővonalakat.

A kapott válaszok átlagát számítva a páronként összetartozó fényképeket elemezték, a többi útparamétert is figyelembe véve. Az eredmények többsége azt mutatta, hogy a terelővonal jelenléte sokkal inkább külterületi jelleget ad az útnak, amit a nagyobb haladási sebességek mutattak. A terelővonal hiánya lassabb sebességre ösztönözte a válaszadókat.

Saját vizsgálatok

A felmérésben azt kívántuk megtudni, mennyire ismerik fel a közlekedők a különböző külterületi úttípusokat, különös tekintettel az emelt sebességű utakra. Más szóval: arra voltunk kíváncsiak, önmagukat magyarázó-e külterületi útjaink. Továbbá arra is irányult a vizsgálat, hogy vajon van-e különbség a megengedett legnagyobb sebesség és a választott sebességek között, és hogy mekkora ez a különbség.

A kutatási mintát 170 egyetemi hallgató képezte, egy részük nappali, másik részük levelező oktatásban vesz részt a Széchenyi István Egyetemen. Átlagéletkoruk huszonöt év. Csak a gépkocsivezetői jogosítvánnyal rendelkezők szerepeltek a mintában, a jogosítvány birtoklásának átlagos ideje hét év, a résztvevők 80%-a férfi, 20%-a nő. Ez a minta nem reprezentatív a magyar járművezetői társadalom egészét nézve sem életkor, sem nem tekintetében, de az úttípusok közötti különbségek megállapításához alapul szolgálhat.

A résztvevők online töltötték ki a kérdőívet, amely két részből állt. Az első rész harmincöt közúti keresztmetszetben készült fényképet tartalmazott, amelyek valódi közúti helyzeteket ábrázoltak magyar utakon. A válaszadók a képeket véletlenszerű sorrendben kapták meg, annak érdekében, hogy kizárható legyen a sorrend hatása. A résztvevőknek mind a harmincöt képnél arra a kérdésre kellett választ adniuk, hogy milyen haladási sebességet választanának az adott helyzetben.

A kérdőív második része személyes jellemzőkre kérdezett rá, úgymint nem, életkor és jogosítványbirtoklás.

A vizsgálatot a külterületi utakra korlátoztuk. A fényképek különböző úttípusokon készültek: autópályán, autópályán, emelt sebességű főúton és elsőrendű főúton. A vizsgálathoz használt képek a következő helyszíneken készültek:

- Győr-Moson-Sopron megye: M19 autópályán Győr és Győrszentiván közötti szakasza (9,7 km)
- Komárom-Esztergom megye: 13. sz. főút
- Fejér megye: 81. sz. főút; 7., 8. sz. főutak Székesfehérvárt elkerülő szakasza (8,5 km); M7 autópályán
- Veszprém megye: 710. sz. főút Balatonakaratya és Balatonfüzfő közötti szakasza

(17,3 km); 8. sz. főút Veszprém és Márkó közötti szakasza (2,7 km); 8. sz. főút Székesfehérvár és Várpalota közötti szakasza (8,5 km).

A kérdőívet kitöltőket nem tájékoztattuk az útszakaszokhoz tartozó megengedett legnagyobb sebesség értékéről. A felvételek azonos időjárási viszonyok között (nappal, derült ég, száraz úttest) készültek. A képeken a közelben alig láthatók járművek, így tulajdonképpen a szabad sebességre kérdeztünk rá.

A fényképeken ábrázolt úttípusok között tehát van „hagyományos” kategóriába tartozó úttípus, amely már jól ismert az úthasználók előtt, és vannak kevésbé ismertek is. Az ismert típusok között vizsgáltunk autópályát, autópályát és hagyományos külterületi főutat. Kevésbé ismert kategória az emelt sebességű főút, amely olyan főútszakasz, amelyet ugyan hagyományos főútnak terveztek, de a kiépítése után megemelték rajta a sebességhatárt 90 km/h-ról 100, illetve 110 km/h-ra. Egyes utakon az irányokat fizikai elválasztással máshol csak burkolati jelekkel választották el.

Az úttípusokat hét kategóriába rendeztük az elválasztás módja, a sávok száma és a megengedett legnagyobb sebesség alapján. Ezt foglalja össze az 1. táblázat.

Eredmények és elemzés

Minden kép esetében meghatároztuk a választott sebességek átlagát, valamint annak eltérést a megengedett legnagyobb sebességtől. Ezt az eltérést pozitívnak vettük az olyan esetekben, ahol az átlag túllépte a megengedett sebességet, és negatívnak azokban a helyzetekben, ahol lefelé tért el a megengedettől. Továbbá meghatároztuk minden egyes útkeresztmetszet esetében a szórás és a relatív szórás értékét is, amely jellemzi az egyes válaszok és az átlag közötti eltérés mértékét.

	útosztály	legnagyobb megengedett sebesség	forgalmi sávok száma	irányok fizikai elválasztása	helyszínek száma
1	autópályán	130	2 × 2	igen	5
2	emelt sebességű főút	110	2 × 2	igen	5
3	emelt sebességű főút	100	2 × 2	igen	5
4	emelt sebességű főút	100	2 × 2	nem	5
5	autópályán	110	2 × 1	nem	5
6	emelt sebességű főút	110	2 × 1	nem	5
7	elsőrendű főút	90	2 × 1	nem	5

1. táblázat • A vizsgált úttípusok fő jellemzői

Az adatok elemzése a minta szűrésével folytatódott. Számítottuk a válaszadók által megadott sebességértékek átlagát és az egész minta átlagát. A mintából kiemeltük azokat, akiknél adott válaszaik átlaga legalább a szórással kétszeresével tért el a minta egészére vett átlagtól.

A táblázatok legelső sorába a v_{85} sebesség értéke került, amelyet a gépjárművezetőknek csak 15 százaléka lép túl. Ezek után csoportba rendeztük az egy kategóriába tartozó képeket, és kategóriánként megadtuk valamennyi számított érték átlagát is.

A hét típus eredményeit összevetve elemezzük. A kategóriánkénti eredményeket a 2. táblázat foglalja össze.

Az eredmények összegezve azt mutatják, hogy a hagyományos úttípusokat, amelyeket jól megszoktak már a gépjárművezetők, könnyen fel tudják ismerni. Ez jellemző a vizsgált autópályán és külterületi főutak esetében, amit igazol is az alacsony (10% körüli) relatív szórás, és az, hogy a v_{85} csak néhány km/órával haladja meg a megengedett legnagyobb sebességet (2. táblázat 1. és 7. oszlopa).

Érdekes eredmények adódtak a 2 × 1 sávú autópályán és a 2 × 1 sávú emelt sebességű főút esetében. A válaszadók hagyományos külterületi útként érzékelték ezeket az utakat annak ellenére, hogy bizonyos fényképek különbszintű csomópontokat is ábrázoltak, ami nem szokványos a hagyományos külterületi utak-

kategória	1	2	3	4	5	6	7
megengedett legnagyobb seb. (km/h)	130	110	100	100	100	110	90
átlag (km/h)	122,8	107,0	111,4	101,5	98,7	96,2	85,3
eltérés (km/h)	-7,2	-3,0	+11,4	+1,5	-11,3	-13,8	-4,7
szórás (km/h)	13,2	13,9	14,5	11,1	10,7	10,5	8,6
relatív szórás (%)	11	13	13	11	11	11	10
számított v_{85} (km/h)	136,5	121,4	126,4	113,0	109,8	107,1	94,3

2. táblázat • A hét úttípus összesített eredményei

nál. Az átlagsebesség több mint 10 km/h-val alacsonyabbra adódott a megengedett sebességnél és a v_{85} elmarad a megengedett legnagyobb sebességtől (2. táblázat 5. és 6. oszlopa).

A 2×2 sávós osztott pályás 100, illetve 110 km/h emelt sebességű főutakon a nagy relatív szórásból arra lehet következtetni, hogy a válaszadók bizonytalanok ennek az úttípusnak a felismerésében, ezért a válaszok skálája szélesebb (2. táblázat 2. és 3. oszlopa).

Aggodalomra ad okot az, hogy a 2×2 sávós emelt sebességű főutakon akár van fizikai elválasztás, akár nincs, a v_{85} értéke több mint 10, esetenként több mint 20 km/h-val meghaladja a megengedett legnagyobb sebességet, vagyis a megkérdezettek nagy része a sebességhatár értékét túl alacsonynak tartja és annál nagyobb haladási sebességet is biztonságosnak érez (2. táblázat 2. 3. és 4. oszlop). Hasonló eredményekre jutott járműkövetéses sebességmérésekkel Vörös Attila is (Vörös, 2009). Az út kialakítása itt nagyobb haladási sebességet sugall a járművezetőknek, ebből biztonsági problémák adódhatnak.

A kérdőíves felmérés eredményeit összevetettük a valóságos helyzettel, a mért sebességekkel. A hét úttípus közül öt esetben tudunk összehasonlítható adatokat kapni a Magyar Közút NZrt. és az Állami Autópálya-kezelő Zrt. jóvoltából.

Az adatok összehasonlítása alapján megállapítottuk, hogy a mért és a kérdőíven kapott sebességek átlaga általában csak 2–4%-kal tér el egymástól. Hasonlóan jó az egyezés a v_{85} tekintetében is. Úgy is mondhatjuk, hogy csupán 2–4 km/h-s átlagsebesség-eltérés adódott a képek alapján történő sebességválasztás és a valós élethelyzetben tanúsított gépjárművezetői magatartás között.

A szórás értékei viszont a valós élethelyzetben mindenütt érzékelhetően nagyobbak,

mint a felmérésben kapott. Ez az eltérés azzal magyarázható, hogy a kérdőíves mintában egy szűkebb vezetői réteg volt, a valóságos járművezetők közötti eltérések nagyobbak, mint az egyetemi hallgatók között.

Eredmények úthasználói csoportonként

Az egyes vezetői csoportok közötti különbségek elemzéséhez a kérdőívet kitöltőket több szempontból csoportokra osztottuk:

- gépjárművezető több mint öt év vezetési tapasztalattal
- gépjárművezető kevesebb mint öt év vezetési tapasztalattal
- nő több mint öt év vezetési tapasztalattal
- nő kevesebb mint öt év vezetési tapasztalattal
- férfi több mint öt év vezetési tapasztalattal
- férfi kevesebb mint öt év vezetési tapasztalattal

A Welch-próba, vagy más néven d-próba a statisztikai hipotézisvizsgálatok közül a paraméteres próbák közé tartozik. A próba azt vizsgálja, hogy két külön mintában egy-egy valószínűségi változó átlagai egymástól szignifikánsan különböznek-e.

A próba nullhipotézise

Nullhipotézis: a két mintában a két átlag statisztikai szempontból megegyezik.

Alternatív hipotézis: a két mintában a két átlag statisztikai szempontból nem egyezik meg. A statisztikai szempontból kifejezés arra utal, hogy az eltérés a két átlag között olyan minimális, hogy pusztán a véletlen ingadozásnak tulajdonítható (ekkor a két átlag statisztikai szempontból azonosnak tekinthető), vagy jelentősen nagyobb, mint ami a véletlen magyarázható (ekkor a két átlag statisztikai szempontból nem tekinthető azonosnak). Csoportonként számítottuk az adott válaszok

kategória	1	2	3	4	5	6	7
legnagyobb megengedett seb. (km/h)	130	110	100	100	110	110	90
nő > 5 év – nő < 5 év	1,32	0,29	0,97	0,61	-0,41	-0,38	-0,34
férfi > 5 év – férfi < 5 év	5,15	1,11	-0,85	2,81	0,87	0,42	2,74
nő > 5 év – férfi > 5 év	-1,71	-0,70	0,36	-0,75	-0,81	0,21	-2,28
nő < 5 év – férfi < 5 év	0,11	-0,43	-1,52	0,15	0,11	1,00	-0,50
mind > 5 év – mind < 5 év	4,49	1,31	0,88	2,61	0,04	-0,58	1,51

3. táblázat • a t-eloszlás értékei a Welch-tesztből

átlagát, és elvégeztük a Welch-próbát. Ezeket az értékeket a Student-eloszlás táblázatával összevetve meghatározhatóak azok a csoportok, amelyek között szignifikáns eltérés van az adott válaszaik alapján.

A 3. táblázatban azon t-próbastatisztika-értékek, amelyek 95%-os szignifikanciaszint mellett szignifikáns eltéréseket adnak, **félkövérrel** vannak kiemelve. Az eredmények szerint az a feltevés, hogy a tapasztaltabb gépjárművezetők gyorsabban vezetnek, csak a két hagyományos úttípusra (autópálya és 2×1 sávós főút), ill. a 2×2 sávós osztatlan pályás utakra érvényes. A többi, emelt sebességű út esetében nem adódtak szignifikáns különbségek a vezetői tapasztalat függvényében.

Hasonló különbségeket véltünk felfedezni a nagyobb vezetési tapasztalattal rendelkező férfi és női vezetői csoportok között, csak a két hagyományos úttípus esetén adódtak szignifikáns eltérések a két csoport között.

Klaszteranalízis

A vizsgálatunk során elvégzett elemzés célja olyan vezetői csoportok azonosítása, amelyekbe tartozók a különböző vizsgált úttípusokon hasonló sebességeket választanak. A feladat megoldása során a klaszteranalízis módszerét használtuk. A számítások elvégzéséhez a PASW 18. programot használtuk.

A klaszteranalízis tehát a rendelkezésre álló adatok hierarchikus osztályozására szolgál, a közöttük levő távolság alapján. Az osztályozás a mérési adatok olyan csoportosítási folyamatát jelenti, melynek során a csoportok tagjai tulajdonságait tekintve hasonlítani fognak egymásra. Az elemzés során az egyes válaszadók által választott sebességértékeket a vezetőtípusok csoportosítására használtuk, a hasonlóság mértéke az egyes adatok koordináta-különbségeinek összege (négyzetes euklidészi távolság) volt.

Az egyes adatsorok elemei közötti távolságot különböző eljárások alapján lehet számolni. A vizsgálatban a K-közép módszert választottuk, mely a csoportokon belüli eltérés-négyzetösszeg minimálásával alakítja a csoportokat. Az összevonás az eredeti m pontból indulva lépésenként történik, egészen a minimális két klaszterig.

Az adatokat klaszteranalízisnek vetettük alá, 2–3–4–5–6 klasztert képezve. A klaszterek optimális számát az elemszámok alapján határoztuk meg. Kettőtől négy klaszterig haladva az elemek még arányosan osztódtak el, viszont öt, illetve hat klaszter esetében már adódtak egyelemű klaszterek. Ez alapján, valamint a klaszterközéppontok távolsága alapján a négyet éreztük optimális klaszterdarabszámmal.

Az eredményektől leginkább azt vártuk, hogy a gyors és lassú, illetve a kockázatos és óvatos gépjárművezetői típusok különülnek majd el egymástól. Ennél komplexebb eredményeket kaptunk (4. táblázat).

Az 1. klaszter a leginkább kockázatos, legnagyobb sebességértékeket választó gépjárművezetőket foglalja magában. Tapasztalt, átlagosan 8,1 év vezetési tapasztalattal rendelkező 94%-ban férfiakat tartalmazó klasztert jelent.

A 2. klaszterben szintén magas az átlagos vezetési tapasztalat (8,2 év), de a nemek aránya jobban megközelíti az összes kérdőívet kitöltő arányát. Osztottpályás utakon a választott haladási sebességeik ugyanolyan magasak, mint az 1. klaszter esetében; osztatlan pályás utakon 6–10 km/órával lassabban haladnak, mint az 1. klaszterbe tartozó válaszadók.

A 3. klaszter vezetési gyakorlata megegyezik az egész minta vezetési gyakorlatának átlagával. A nők aránya valamivel nagyobb az egész minta arányával összehasonlítva. Valamennyi útkategória esetében lényegesen kisebb haladási sebességek jellemzik, mint a 2. klasztert.

A 4. klaszter tartalmazza a legkevésbé tapasztalt gépjárművezetőket (négy év vezetési tapasztalat), és ebben a klaszterben a legmagasabb a nők aránya. Az autópályát és a külterületi 2×1 sávós főutat leszámítva elmondható, hogy nem sok különbséget észleltek az egyes útkategóriák között. 94–98 km/h sebességeket választottak valamennyi emelt sebességű út esetében. Meglepően, valamennyi 2×1 sávós út esetében magasabb sebességeket választottak, mint a 3. klaszterbe tartozó gépjárművezetők.

Összefoglalás

A kutatás azt vizsgálta meg, hogy a járművezetők képesek-e felismerni a különböző úttípusokat és az ahhoz megfelelő haladási sebességet választani. Kérdőíves felmérésünk eredményei azt mutatták, hogy a megszokott úttípusok (autópálya, külterületi 2 × 1 sávós út) jól felismerhetők, önmagukat magyarázó. A nem megszokott úttípusok viszont kevésbé felismerhetők és nehezebben felfoghatók, jóval nagyobb bizonytalanságot okoznak az úthasználók számára a sebességválasztásban.

	1. klaszter	2. klaszter	3. klaszter	4. klaszter
személyek száma	33	75	37	25
vezetési gyakorlat átlaga (év)	8,1	8,2	6,8	4,0
férfi/nő arány	94/6	83/17	73/27	68/32
átlagsebesség az 1. kategóriában	130,5	125,7	116,3	113,8
átlagsebesség a 2. kategóriában	115,1	111,0	98,4	96,6
átlagsebesség a 3. kategóriában	118,1	116,0	104,6	98,4
átlagsebesség a 4. kategóriában	110,2	103,8	94,2	93,9
átlagsebesség az 5. kategóriában	108,1	98,4	91,4	98,1
átlagsebesség a 6. kategóriában	105,6	94,5	89,9	98,2
átlagsebesség a 7. kategóriában	89,2	86,0	81,9	83,0

4. táblázat • Klaszterjellemezők számszerűsítve

Az irányonként két forgalmi sávós utakon az emelt sebességhatárok túllépése jelentős. A felmérés eredményeinek a műszeres sebességmérésekkel való összevetése azt mutatta, hogy a fényképes kérdőíves módszer alkalmas a

járművezetők sebességválasztásának íróasztal melletti szimulálására.

Kulcsszavak: *sebességhatár, úttípusok, biztonság, önmagát magyarázó út*

IRODALOM

- Garrick, N. W. (2011): *Speeds and Street Design Results UConn and UCD*. Highway design class, University lecture, University of Connecticut
- Goldenbeld, Ch. – van Schagen, I. (2007): *The Credibility of Speed Limits on 80 km/h Rural Roads: The Effects of Road and Person(Ality) Characteristics. Accident Analysis and Prevention*. 39, 1121–1130.
- Lahausse, J. A. – van Nes, N. – Fildes, B. N. – Keall, M. D. (2010): *Attitudes Towards Current and Lowered Speed Limits in Australia. Accident Analysis and Prevention*. 42, 2108–2116.
- Lippold, Ch. (2009): *Egységes és felismerhető úttípusok – Új tervezési elvek Németországban*. 15 éves a Magyar Útügyi Társaság Konferencia, Budapest

- Treat, J. R. – Tumbas, N. S. – McDonald, S. T. – Shinar, D. – Hume, R. D. – Mayer, R. E. et al. (1977): *Tri-level Study of the Causes of Traffic Accidents, Volume I: Casual Factor Tabulations and Assessment*. Final report (No. DOT-HS-034-3-534), National Highway Traffic Safety Administration, Washington
- Vörös A. (2009): A sebességválasztási szokások vizsgálata néhány emelt sebességű, vegyesforgalmú, közösségi útszakaszon. *Közlekedéstudományi Szemle*. LIX, 1, 37–48.
- Weller, G. – Schlag, B. – Gatti, G. – Jorna, R. – van de Leur, M. (2006): *Human Factors in Road Design. State of the Art and Empirical Evidence. Road Infrastructure Safety Protection – Core-Research and Development for Road Safety in Europe; Sixth Framework Programme*

AGYAGÁSVÁNY NANOKOMPLEXEK ELŐÁLLÍTÁSA ÉS SZERKEZETI JELLEMZÉSE

Horváth Erzsébet

az MTA doktora, egyetemi tanár,
Pannon Egyetem Környezetmérnöki Intézet
elizabeth@almos.uni-pannon.hu

Kurdi Róbert

PhD, egyetemi adjunktus,
Pannon Egyetem Környezetmérnöki Intézet
kurdi.robert@almos.uni-pannon.hu

Kristóf János

az MTA doktora, egyetemi tanár,
Pannon Egyetem Környezetmérnöki Intézet
kristof@almos.uni-pannon.hu

Makó Éva

PhD, egyetemi docens,
Pannon Egyetem Mérnöki Kar Veszprém
Pannon Egyetem Anyagmérnöki Intézet, Veszprém
makoe@almos.vein.hu

Bevezetés

Az agyagásványok szerves anyagokkal alkotott komplexei a természetben mindenütt előfordulnak, s nagyon sok elmélet az élet keletkezését is ilyen típusú reakciókra, illetve kölcsönhatásokra vezeti vissza. A réteges szerkezetű ásványok közül a kaolinit típusú ásványokat (kristálytani képletük: $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ vagy $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) széles körben alkalmazzák nyersanyagként a kerámiaiparban, adalékanyagként a gyógyszer-, polimer- és gumiiparban, reológiai tulajdonságokat javító segédanyagként festékekben és kozmetikumokban, s az elektronikai ipar speciális területein (például kondenzátorokban). A kaolinit mint ipari ásvány alkalmazása felületi reaktivitásának függvénye. A külső (szemcse) felület reaktivitása különféle sav-bázis tulajdonságú molekulák adszorbeálásával jellemezhető. A belső felület reaktivitása interkalációval vizsgálható. Az interkaláció nem-kovalens kötést kialakító reagens molekulák

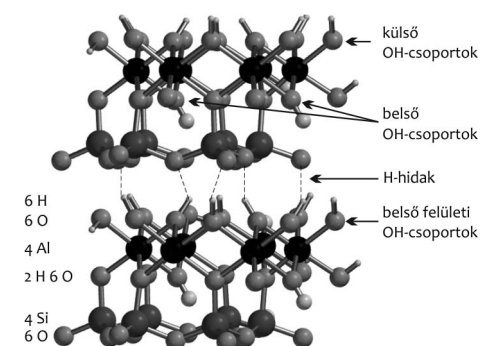
bevitelét jelenti réteges szerkezetekbe. A két-dimenziós, tetraédes és oktaédes síkhálóból felépülő kaolinit kettősrétegek kis molekulájú szerves reagensekkel interkalálható. A reakció során a rétegeket összetartó hidrogénkötések felszakadnak, s az expandált szerkezetben a monomolekuláris rétegben beépülő reagensek új típusú hidrogénkötéseket hoznak létre. Az így kialakult nanokomplex szerkezete, a reagens molekulák kötődésének módja, orientációja elsősorban molekulaspektroszkópiai módszerekkel (FTIR, MS, Raman) vizsgálható. A módosított felületű kaolinit ásványok tervezhető felületi tulajdonságokkal rendelkező, olcsó, környezetbarát adszorbensek/biofilmhordozók előállítására, katalizátorhordozóként vagy polimer (például polipropilén, polietilén, polikaprolakton stb.) mátrixban adalékanyagként alkalmazhatók. A nanométer méretű (delaminált) ásványi adalék már 2–5% mennyiségben is jelentős mértékben javítja a polimer fizikai, mechanikai tulajdonságait (például húzó- és

szakítószilárdság, hő- és karcállóság, gáztömörség). A kaolinit szerkezeti felépítése az 1. ábrán látható. A c-tengely irányában 7,15 Å bázislap távolságra egymás felett elhelyezkedő rétegek komplexumok úgy épülnek fel, hogy a kitöltetlen hatos gyűrűk egymás fölé illeszkednek. Mivel a kettősrétegek egyik oldalát oxigén, a másikat OH-csoportok határolják, a rétegek poláros természetűek, s a c-tengely irányában azonos orientációval helyezkednek el. A szerkezetben háromféle kémiai környezetű OH-csoport különböztethető meg. A *külső* OH-csoportok a mikrokristályok felületén találhatók. A *belső felületi* OH-csoportok az oktaédes rétegekhez kapcsolódnak, s a szomszédos kettősréteg oxigénsíkjával hidrogénkötést létesítve a szerkezetet stabilizálják. A *belső* OH-csoportok az oktaédes és tetraédes rétegek közös síkjában helyezkednek el, s dipólusuk egy üres oktaédes pozíció felé mutat. Mivel a tetraédes és oktaédes gyűrűk mérete nem pontosan azonos, a rétegek kapcsolódása során deformáció léphet fel. A gyenge erővel egymáshoz kapcsolódó semleges rétegek komplexumok magas saját szimmetriájuk következtében különféle translációs és rotációs elmozdulások révén is kapcsolódhatnak a szomszédos rétegekhez. Ily módon különféle politípusok jöhetnek létre. A kaolinit ásványok rendezettsége két tényezőtől fakad: az egyes rétegek belső rendezettségéből és a rétegek halmozódásának szabálytalanságából. A rendezettség mértéke mesterségesen (például őrléssel, interkalációval és deinterkalációval) is megváltoztatható.

A halloysit a kaolinnal megegyező szerkezetű ásvány, amely a kaolinitól csak a hidratáltság fokában különbözik. Hevítés hatására a 10,1 Å bázislap távolságú halloysit dehidratálódik, s bázislap távolsága a kaolinitével

megegyezik. A hidratált és a dehidratált forma közötti bázislap távolság különbség kb. 3 Å, ami egy vízmolekula méretével azonos. Ezért feltételezhető, hogy két kaolinit kettősréteg között egy vízmolekula-réteg helyezkedik el. A halloysit belül üres, csőszerű szerkezete az $\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}$ és a gibbsitréteg közötti méterkülönbséggel magyarázható. Míg a kaolinitréteg két oldala közötti hosszúságkülönbség az SiO_4^{4-} tetraéderek alkalmas elfordulásával kiegyenlíthető, a halloysitben részben a rendezetlenség, részben a vízmolekula-réteg árnyékoló hatása miatt a kettősrétegek meggörbülnek. A halloysit ipari adalékként való alkalmazása erősen csöves morfológiája miatt jelentős potenciállal bír. Tekintettel arra, hogy tiszta formában ritkán fordul elő (*általában kaolinnal keveredik*), kísérleteket végeztünk arra vonatkozóan, hogy kaolinitből – a kettősrétegek interkalációval való elválasztása, majd delaminációja után – csöves szerkezetű halloysit állítsunk elő.

A szintetikus úton előállított halloysit nanocsövek (HNT-k) előtt ígéretes, új alkalmazások állnak. Alkalmasként például a nanocsövek belsejéből gyógyszerhatóanyagok, bioaktív molekulák kontrollált körülmények között történő adagolására élő szervezetekben,



1. ábra • A kaolinit elemi cellája

ugyanezen mechanizmus szerint kozmetikumokban, háztartási termékekben, gomba- és rovarölő készítményekben (Du et al., 2010). A nanocsövek belseje biomineralizációs reaktorként is alkalmazható, melyben enzimkatalizálta szintézisek végezhetőek el (Schukin et al., 2005). Különböző anionos/kationos metalloporfirinek enkapzulációjával olyan új típusú immobilizált katalizátorok nyerhetők, amelyek szelektív oxidációs folyamatokban alkalmazhatók. A halloysit szelektív nano-adsorbensként való alkalmazása a környezetvédelemben jelentős (Lu et al., 2006). A fenti lehetőségek mellett a halloysit polimeradalékként való alkalmazása világszerte az érdeklődés középpontjába került. Felületkezelés nélkül a HNT viszonylag egyenletesen diszpergálható olyan termoplasztikus polimerekben, mint a poliamid 6, a polipropilén vagy a polibutilén tereftalát (Du et al., 2008a). A poliolefin és az ásványos adalékok polaritása közötti jelentős különbség komoly nehézséget okoz a polimer nanokompozitok előállításánál. A nanocső felületi organofilizációjával (a felületi OH-csoportokon vagy oxigénatomokon keresztül szerves reagensek felülethez kapcsolásával) ez a nehézség megszüntethető, s a nanokompozit mechanikai tulajdonságaiban jelentős javulás érhető el. A nanocső és a szerves ligandum közötti kapcsolat hidrogénkötéssel, vagy töltéstranszfer-mechanizmusok alapján is kialakítható (Du et al., 2006).

Az agyagásvány/gumi nanokompozitok esetében az adalék megfelelő diszpergálása és a határfelületen fellépő kölcsönhatások minősége és mértéke alapvető fontosságú. Tekintettel arra, hogy a HNT felületén viszonylag kevés OH-csoport áll rendelkezésre, egy erős határfelületi kötés kialakítása nehézséget okoz. Sztírol-butadién gumi és HNT közvetlen

összekeverésével kialakított nanokompozitok esetében például metakrilsav adalék segítségével jelentős minőségjavulást értek el, ami a karboxil-csoport és a nanocsövek fala között fellépő hidrogénkötésnek tulajdonítható (Du et al., 2008b). A mechanikai tulajdonságok (Young modulus, keménység) javulása mellett a termikus stabilitás és a lángállóság is jelentősen növelhető kis mennyiségű HNT adagolásával. Az üreges ásvány gátolja a hő- és anyagtranszport-folyamatokat, s az égés során a felületen hőszigetelő réteget képez (Marney et al., 2008). Ezen kívül a nanoadalék nukleációt segítő ágensként is funkcionál, s jelentős mértékben segíti például a polipropilén kristályosodását (Du et al., 2010).

A szintetikus HNT-k kaolinit organokomplex prekursorokból többlépcsős interkalációval preparálhatók. A szintézisben az egyes lépések során alkalmazott reagenseknek és a sorrendiségnek meghatározó szerepe van. Mivel nagyon keveset tudunk az interkalációs komplexek szerkezetéről, a komplexet stabilizáló paraméterekről és a csereinterkalációs folyamatokról, jelenleg a szintetikus HNT-k preparálási folyamatait inkább a tapasztalatokra alapuló véletlenszerűség, mint a fizikai-kémiai alapokon nyugvó tervezhetőség jellemzi. Ebben a munkában a leggyakoribb prekursorokként használt kaolinit organokomplexek szerkezetét és a stabilitást befolyásoló legfontosabb paramétereket, továbbá kaolinit-karbamid és kaolinit-kálium-acetát prekursorokból kiindulva cső- és chips-szerű nanostruktúrák preparálását mutatjuk be.

Alkalmazott eszközök és módszerek

Interkalációs komplexek előállítása • A kaolinit interkalációs komplexek előállítása 1 g kaolinit és 100 cm³ reagens oldat felhasználásával, zárt edényben, szobahőmérsékleten, mágneses

keverővel 80 órán át való kevertetéssel történt. A reagensek (8 M kálium-acetát, 9% víztartalmú dimetil-szulfoxid, 10 M karbamid) analitikai tisztaságúak voltak. Az interkalációs folyamatot követően az oldat-fázis centrifugálással való elválasztása után a nedves interkalátum szárítását szobahőmérsékleten végeztük. A mechanokémiai úton (száraz őrléssel) történő interkaláció céljára egy Fritsch 5/2 típusú laboratóriumi bolygómalmot alkalmaztunk, melyben 7 g kaolinhoz 3 g karbamidot adagoltunk.

A szintetikus HNT-k preparálása során a karbamidot trietanolammal (TEA) cseréltük le, majd metil-jodiddal a rétegek közötti térben trietil-metil-jodidot szintetizáltunk. A szintézist két ciklusban megismételtük. Poliakrilonitril segítségével, egy kationcserélő folyamatban tetraalkil-ammónium-poliakrilátot állítottunk elő a rétegek közötti térben. A poli-ionok nagysága lehetővé tette a tetraéder/oktaéder rétegek teljes delaminációját.

Műszeres analitikai vizsgálatok • A röntgendiffraktogramok felvétele egy Philips PW 3710/25 típusú berendezésben történt (*CuK α -sugárzás, 50 kV, 40 mA*). A termoanalitikai vizsgálatokat egy Netzsch TG 209 és egy Balzers MSC 200 típusú tömegspektrométer összekapcsolásával kialakított rendszerben végeztük. Az infravörös spektrumok felvételére egy Bruker Equinox 55 típusú spektrométert alkalmaztunk (*1024 spektrum átlagolásával, 2 cm⁻¹ felbontás mellett*). A Raman-spektrumok felvétele egy Renishaw 2000 típusú, Olympos BHSM mikroszkóppal, He-Ne lézerrel (*633 nm*) és CCD detektorral felszerelt berendezésben történt.

Molekulamechanikai számítások • Az első sorban rezgési spektroszkópiai adatok alapján felállított szerkezeti modellek helytállóságának igazolására molekulamechanikai számí-

tásokat végeztünk a Spartan'10 (Wavefunction Inc. USA) program Windows változatának használatával. A rendszer geometriai optimalizációjára előzetes tesztelést követően az MMFF94 (Merck Pharmaceuticals) paraméterkészletet használtuk. A bázislaptávolságokat (*d*[001] értékek) minden esetben röntgendiffrakciós spektrometriai adatokból határoztuk meg, és a számítás során konstans értéként kezeltük. A program elvi korlátait, valamint a szükséges gépidőt figyelembe véve korlátozó feltételek mellett végeztük el a számításokat.

- (1) A kaolinit kettősrétegek (tetraéder-oktaéder vagy TO-rétegek) geometriai optimalizációját külön is elvégeztük 492 atomból álló rendszerre.
- (2) Feltételeztük, hogy az interkalálószer monomolekuláris rétegben van jelen a rétegek közötti térben és a TO-rétegekkel csak hidrogénhidas kölcsönhatásokat alakít ki. Elhanyagoltuk továbbá a reagens molekulák közötti kölcsönhatásokat.

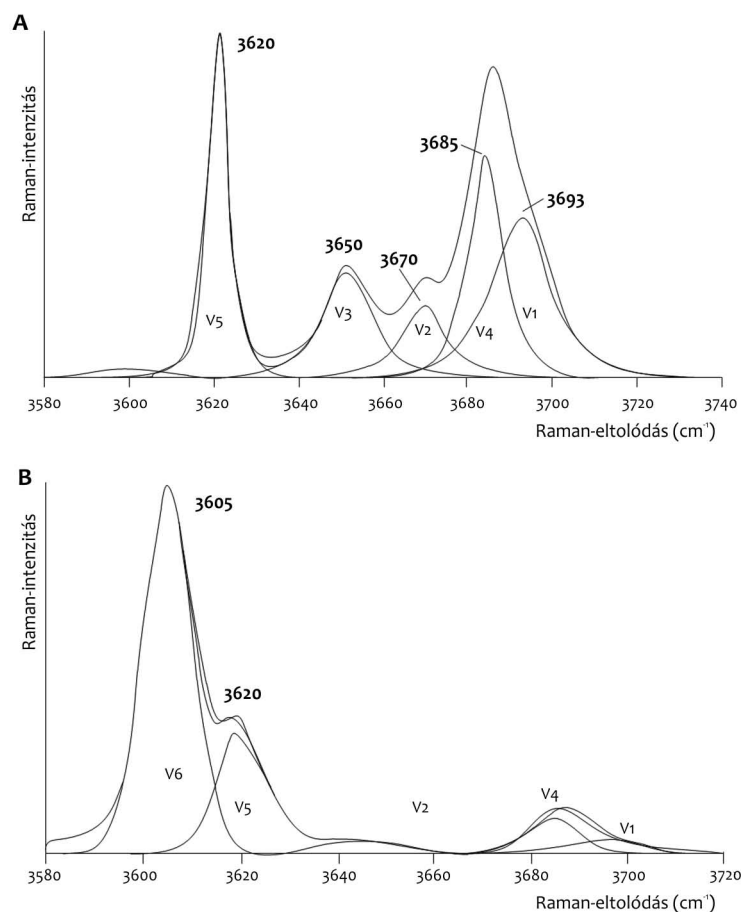
Eredmények és értékelésük

Az interkalációs komplexek szerkezete • Kálium-acetáttal a kaolin mintegy 95%-ban expandálható. A Raman-spektrumok (*2. ábra*) alapján látható, hogy a 3693, 3685, 3670 és 3650 cm⁻¹-nél lévő belső felületi OH-csoportok a komplexben egyetlen sáv formájában jelennek meg 3605 cm⁻¹-nél, ami azt igazolja, hogy a komplexben csak egyfajta OH-környezet van jelen. Tekintettel arra, hogy a metilcsoport szimmetrikus deformációs rezgése jelentős intenzitás-csökkenés mellett két sávra hasad fel, s a karboxilcsoport szimmetrikus vegyértékrezgési sávja az alacsonyabb frekvenciák irányába tolódik, arra következtettünk, hogy az acetátnak két ponton, a metil- és a karboxilcsoportokon keresztül is kölcsönhatásban

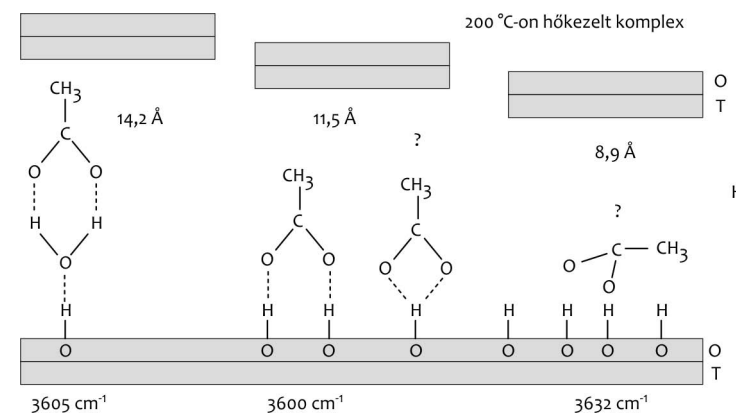
vannak az expandált rétegekkel. Ha a komplexet 200 °C-ra hevítjük, a 14,1 Å-nek megfelelő reflexió eltűnik, s két új bázislaptávolság jelenik meg 11,5 és 8,9 Å értékeknél. Szobahőmérsékleten az új reflexiók mintegy fél óra alatt fokozatosan eltűnnek, s a komplex visszaexpandál az eredeti 14,1 Å-nek megfelelő d-értékre. Ez a folyamat reverzibilis, s azt igazolja, hogy az interkalációs komplex kialakulásában a víznek meghatározó szerepe van. A feltételezett szerkezet a 3. ábrán látható. A 14,1 Å-nek megfelelő reflexió az acetátionok

víz molekulán keresztül történő kapcsolódásával valósul meg, az ab-síkra merőleges helyzetben. A 11,5 Å-nek megfelelő bázislaptávolság a vízmolekulák távollétében jelentkezik, míg a 8,9 Å-nek megfelelő d-érték az acetátionok rétegekkel párhuzamos orientációját jelenti.

Dimetil-szulfoxid interkaláló ágens segítségével gyakorlatilag 100%-os expanszió érhető el (minden szemcse minden rétege expandál). Hevítésre a 11,5 Å-nek megfelelő d-értékre expandált szerkezetből a DMSO-molekulák két lépésben (117 és 173 °C-on) távoznak,



2. ábra • Kálium-acetáttal interkalált királyhegyi kaolin Raman-spektuma (A – kezeletlen minta; B – komplex)

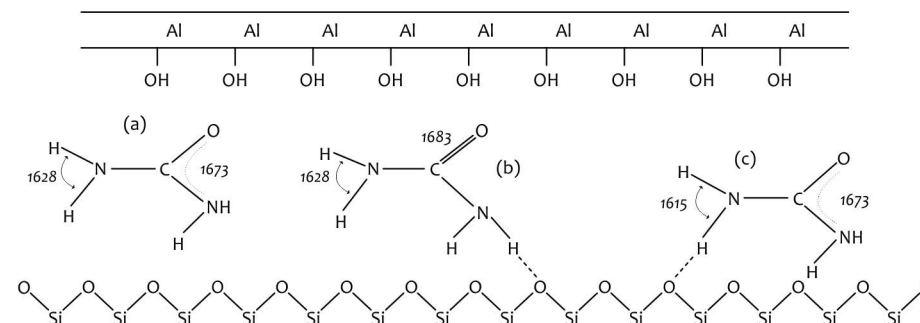


3. ábra • Kálium-acetáttal interkalált kaolin szerkezeti modellje

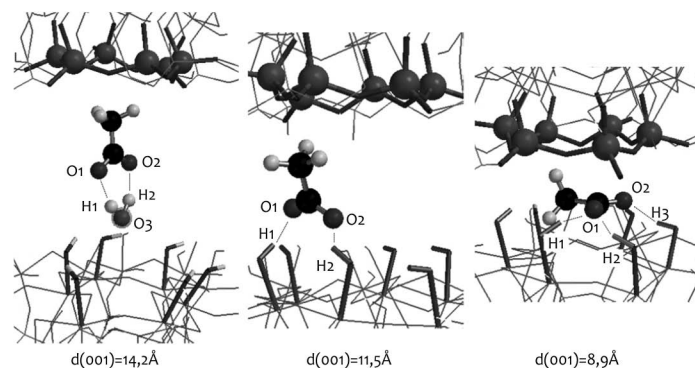
s minden belső felületi OH-csoportra 0,88 DMSO-molekula jut. Ez azt mutatja, hogy legalább kétféle módon kötődő DMSO-molekula van a rendszerben, illetve hogy a teljes expanszió ellenére nem minden belső felületi OH-csoport van hidrogénkötésben. A Raman-spektrumban szobahőmérsékleten a szimmetrikus CH vegyértékrezgési sáv két, az aszimmetrikus négy sávra hasad fel. Folyékony nitrogén hőmérsékletén ugyanezek a sávok négy, ill. hat összetevőre hasadnak fel. Ez azt igazolja, hogy rendkívül merev struktúra alakul ki, s mind a hat hidrogénatom különbözőképpen kapcsolódik a szemközi kettősréteg oxigénsíkjához. Bár a DMSO-

molekulák térszerkezetére vonatkozóan máig nagyszámú publikáció lát napvilágot, a pontos szerkezet még nem ismert. Elmondható azonban, hogy a víznek ebben a rendszerben is kitüntetett szerepe van, mivel víz nélkül a komplex nem alakul ki (vízmentes DMSO használata esetén a rendszer a levegőből vesz fel mintegy 9%-nyi mennyiségű vizet).

A kaolinit karbamiddal vizes oldatban mintegy 80%-ban, mechanokémiai úton gyakorlatilag 100%-ban expandálható. Az infravörös spektroszkópai vizsgálatok alapján a karbamid mindkét NH₂-csoportja részt vesz egy hidrogénhid típusú szerkezet kialakításában. A –C=O és az –NH-csoport közötti



4. ábra • A karbamid feltételezett elhelyezkedése a rétegek közi térben

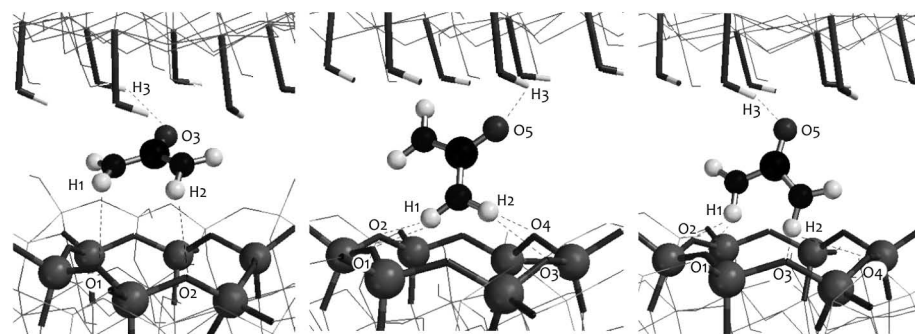


5. ábra • A kálium-acetát elhelyezkedése a rétegek közötti térben MM-modell alapján

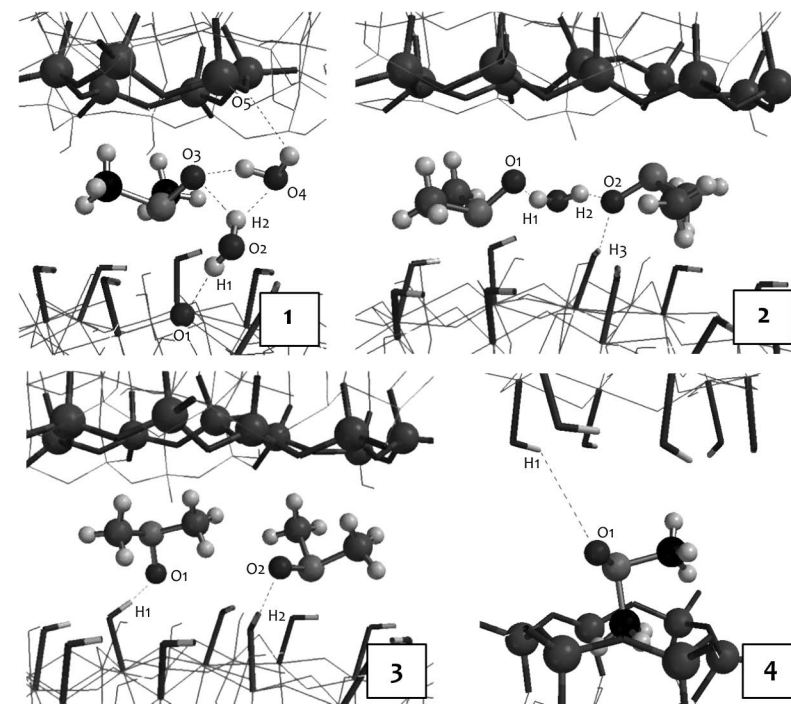
konjugáció (az ún. amid I kötés) megszűnik, s új hidrogénhidak alakulnak ki az -NH- csoportok és a sziloxán-réteg oxigénatomjai között. A dekonjugáció révén szabaddá váló -C=O csoport az oktaéderez réteg belső felületi OH-csoportjaival létesít kapcsolatot. A karbamid feltételezett szerkezete a rétegek közötti térben a 4. ábrán látható.

A feltételezett szerkezetek megerősítése molekulamechanikai modellezéssel • A molekulamechanikai módszerrel egyrészt igazolni lehet a kísérleti adatok alapján felállított modellek helytállóságát, másrészt a kötőerők, illetve a rendszerenergia vonatkozásában egy relatív sorrendet lehet felállítani. A kaolinit interkalációs komplexek mérete/atomszáma túl nagy

ahhoz, hogy a teljes rendszer geometriai optimalizálását a kvantumkémia eszközeivel kíséreljük meg. A nagy atomszámú rendszerek modellezésére a Monte Carlo-szimulációt és a molekulamechanika- (MM) modellt egyaránt használjuk. Az MM-számítások során a röntgenadatokra támaszkodva egy 2×500 atomból álló réteggel komplexum geometriai optimalizálását végeztük el. A rétegek és a reagensek között csak hidrogénhid típusú kölcsönhatásokat feltételeztünk, s a komplexek rendszerenergiáinak összehasonlítása érdekében az MM-el meghatározott geometriákra *ab initio* módszerrel tájékoztató energiaszámításokat végeztünk. A komplex, illetve a reagenst nem tartalmazó rendszer között-



6. ábra • A karbamid elhelyezkedése a rétegek közötti térben MM-modell alapján

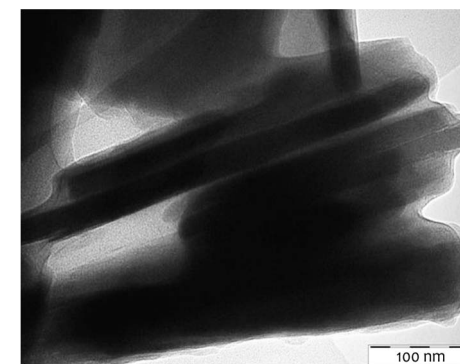


7. ábra • A DMSO elhelyezkedése a rétegek közötti térben MM-modell alapján

ti energiakülönbség alapján a kötéserősség, illetve a komplex stabilitás vonatkozásában egy relatív sorrendet állítottunk fel. Megállapítottuk, hogy a víz jelenléte a rendszer stabilitását minden esetben növeli. A legstabilabb komplex kristályvizet kálium-acetáttal alakítható ki, ezt követi a karbamiddal alkotott szerkezet, majd a kaolinit-DMSO-komplex. Ennek alapján – ha a kaolinit teljes delaminációja a cél – célszerű a többlépcsős interkalációt karbamiddal, vagy DMSO-val kezdeni. A molekulamechanikai módszerrel előállított szerkezeti modellek az 5–7. ábrákon láthatók.

Halloysit-szerű nanocsövek előállítás kaolinit többlépcsős interkalációjával • A rétegek közötti térben preparált polielektrolit segítségével a 8. ábra tanúsága szerint kaolinitből kiindulva halloysit-szerű nanocsövecskék állíthatók elő.

A csövecskék hossza 100 nm nagyságrendű, míg az átmérő 25–30 nm. Feltételezhető, hogy a szálhosszúságot a preparáció során az ab síkban bekövetkező töredezés (például őrlés, erős keverés) jelentősen befolyásolja.



8. ábra

Kulcsszavak: *cser interkaláció, kaolinit nanohibridek, halloysit-szerű nanocsövek*

IRODALOM

- Du, M. L. – Gou, B. C. – Liu, M. X. – Jia, D. (2006): Preparation and Characterization of Polypropylene Grafted Halloysites and Their Compatibility Effect to Polypropylene/Halloysite Composite. *Polymer Journal*. 38, 1198.
- Du, M. L. – Guo, B. C. – Cai, X. J. – Jia, Z. X. – Liu, M. X. – Jia, D. M. (2008a): Morphology and Properties of Halloysite Nanotubes Reinforced Polypropylene Composites. *e-Polymers*. 130, 1.
- Du, M. L. – Guo, B. C. – Lei, Y. D. – Liu, M. X. – Jia, D. M. (2008b): Carboxylated Butadiene-styrene Rubber/halloysite Nanotube Nanocomposites: Interfacial Interaction and Performance. *Polymer*. 49, 4871.
- Du, M. – Guo, B. – Jia, D. (2010): Newly Emerging Applications of Halloysite Nanotubes: A Review. *Polymer International*. 59, 574.
- Du, M. L. – Guo, B. C. – Wan, J. J. – Zou, Q. L. – Jia, D. M. (2010): Effect of Halloysite Nanotubes on Kinetics and Activation Energy of Non-Isothermal Crystallization of Polypropylene. *Journal of Polymer Research*. 17, 109.
- Lu, X. C. – Chuan, X. Y. – Wang, A. P. – Kang, F. Y. (2006): Microstructure and Photocatalytic Decomposition of Methylene Blue by TiO₂-mounted Halloysite. A Natural Tubular Mineral. *Acta Geologica Sinica – English Edition*. 80, 278.
- Marney, D. C. O. – Russel, L. J. – Wu, D. Y. – Nguyen, T. – Cramm, D. – Rigopoulos, N. (2008): The Suitability of Halloysite Nanotubes as a Fire Retardant for Nylon 6. *Polymer Degradation and Stability*. 93, 1971.
- Shchukin, D. G. – Sukhorukov, G. B. – Price, R. R. – Lvov, Y. M. (2005): Halloysite Nanotubes as Biomimetic Nanoreactors. *Small*. 1, 510.

BELSŐÉGÉSŰ MOTOROK HENGERFELÜLETÉNEK MIKROGEOMETRIAI VIZSGÁLATA

Solecki Levente

dr. univ., főiskolai docens,
Széchenyi István Egyetem, Járműgyártási Tanszék, Győr
solecki@sze.hu

Bevezetés

Belsőégésű motorok hajtják jelenleg a közúti járművek túlnyomó részét, bár az alternatív hajtások egyre nagyobb mértékben, de egyelőre inkább csak jelzésértékű teret nyernek. A belsőégésű motorokban az üzemanyag energiájának mozgási energiává alakítása a hengerben történik. A henger határolja le az égésteret, és vezeti meg a dugattyúgyűrűkön keresztül a dugattyút. A hengerfal és a dugattyú/dugattyúgyűrű kapcsolata meghatározó fontosságú a belsőégésű motor működése szempontjából. A jelenleg elterjedt hengerfal-kialakítások hosszú fejlődés eredményeként alakultak ki, és ez a fejlődés jelenleg is folytatódik. A cél, hogy minél kisebb kopás és súrlódás mellett jó tömítést lehessen elérni és hosszú élettartamot. Ez a dolgozat azokat a vizsgálatokat mutatja be, amelyekkel hengerfelületek üzemi kopását lehet meghatározni.

A henger kialakítását meghatározó tényezők

A hengerfelület mikrogeometriai struktúráját – mintázatát – a rendelkezésre álló gyártástechnológiai lehetőségek figyelembe vételével úgy kell kialakítani, hogy két egymásnak ellent-

mondó követelménynek egyszerre tegyen eleget: a kis ellenállás és kopás érdekében minél kisebb legyen a felületi egyenetlensége (érdessége), de a mintázata olyan legyen, hogy a kenőanyag meg tudjon tapadni rajta, és helyet biztosítson az esetleges szennyeződéseknek (szilárd égéstermék-részecskék, kopadékok).

A hengerfelületek méretét és makrogeometriai alakját a finomfúrás és a hónolás biztosítja, a mikrogeometriai mintázat kialakítására többféle eljárást használnak. A hagyományos hengermintázatot a hengerfelület többfokozatú, úgynevezett *platóhónolásával* hozzák létre.

A hónolási mintázat olyan lézertáskák beégetésével csökkenthető, amelyek biztosítják a kenőolaj megtapadását. Ezen kívül arra is lehetőség van, hogy lézerkezeléssel feltárják a felületközeli karbonzárványokat, hogy azok üregei biztosítsák a szükséges felületi egyenetlenséget. A felület lézerkezelése két okból is javítja a viselkedését: egyrészt simább (kisebb egyenetlenségű) felületet lehet létrehozni, ami kisebb ellenállást és kopást eredményez, másrészt a lézerezés keményebbé, ezáltal kopásállóbbá teszi a henger futófelületi rétegét.

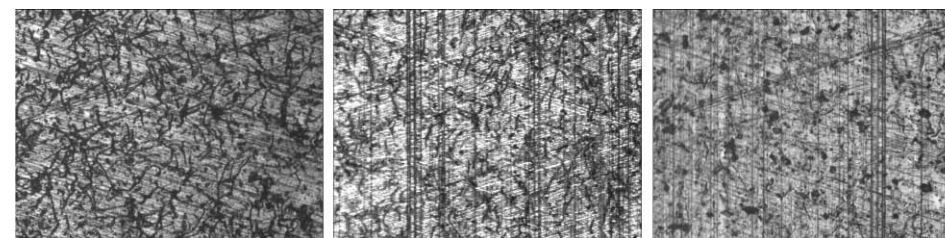
Hengerfelületek mikrogeometriai mérési módszerei

A hengerfelületek közvetlenül nehezen mérhetők, mert belső felületeknek rossz a hozzáférhetőségük (Grabon et al., 2010). A mérendő felületeknek a mikrogeometriai vizsgálatokhoz nagy a kiterjedésük – egy átlagos személygépkocsiba épített belsőégésű motor hengerfuratának 80 mm körüli az átmérője és 100 mm körüli a hossza. Az érdességmérés hagyományos tűs letapogatása csak hosszirányban és legfeljebb néhány metszetben, és nem teljes hosszban használható. Többféle optikai eljárás (hagyományos mikroszkóp, fehér fény interferométer, szórt fény érzékelés...) is alkalmazható hengerfelületek vizsgálatára, de ezeket egyedi kialakítással kell ehhez alkalmassá tenni. A felületek mikrogeometriáját mérő általános rendeltetésű berendezésekkel úgy lehet hengerfelületek részeit mérni, hogy roncsolással a méréshez metszeteket készítünk a hengerfelületből. Ennek viszont az a következménye, hogy a felület mikrogeometriai mérése után már nem tudjuk üzemeltetni a motort.

Ha a hengerfelületről szilikonlenyomatot készítünk (1. ábra) (Gara et al., 2010), akkor ez a lenyomat az 1 µm-nél nagyobb felületi

egyenetlenségeket viszonylag kis veszteséggel átviszi, és elég sokat átvisz az 1 µm-nél kisebb egyenetlenségekből is. A teljes hengerfelületről bonyolult lenne lenyomatot venni, de mivel a szívó és a kipufogóoldalon nagyobb a hengerfal igénybevétele a dugattyú mozgásától, ezért ezeknek a sávoknak a vizsgálata különösen érdekes a felület kopását illetően. A lenyomattechnika előnye, hogy archiválja a felület kiindulási állapotát, így van az üzemeltetés után lehetőség ugyanazon felületrész kiindulási és a későbbi állapotának összehasonlítására. A lenyomatok rugalmas anyagúak, ezért tapintós – tűs – érzékelővel nem, csak optikai úton mérhetők.

Ahhoz, hogy ugyanazokat a felületrészeket meg lehessen találni a felületről korábbi és későbbi állapotában készített lenyomaton, találni kell legalább három, nem egy egyenesbe eső olyan bázispontot mindkét lenyomaton, amelyek egymásnak megfelelői, és minden olyan mérőberendezéssel egyértelműen megtalálhatók, amit a mérések során alkalmazni fogunk. Mivel a dugattyúgyűrűk, illetve a dugattyú nem érintkeznek a hengerfelülettel a teljes hosszban, hanem felül és alul marad egy-egy nem érintkező sáv, ezekben lehet ilyen egymásnak megfelelő pontokat találni. A hengerfelület mintázata



2. ábra • Az 500 órát járatott motor kiindulási hengerfelületéről készített lenyomat; a kopott hengerfelület, és a kopott hengerfelületről készített lenyomat

egyedi, tehát mint a 2. ábrán látható, az egymásnak megfelelő pontok egyértelműen azonosíthatók. Meg kell ezután határozni mind a bázispontok, mind a vizsgálandó pontok térbeli koordinátáit. Amilyen pontosan megfeleltethetők, fedésbe hozhatók egymással a bázispontok, olyan pontossággal feltelelezhető, hogy a keresett pontok megközelítik egymást. A bázispontok egymásra illesztéséhez szükséges koordinátatranszformáció Helmert-transzformációval (Luhmann, 2003) határozható meg; vagy egyszerűsítve, síkban kezelve a problémát, két lépcsőben kapjuk meg: először a bázispontok súlypontjának egymásra tolásával (transzláció), majd a pontoknak a bázispontok súlypontja körüli elforgatásával, amíg a koordináták eltéréseinek négyzetösszege minimális lesz (rotáció).

A mérések egy optikai koordináta mérőgépen (MAHR PMC800) kezdődnek a kopott felület vagy az arról készített lenyomat vizsgálatával. Ki kell választani mind a bázispontokat, mind azokat a pontokat, amelyeket a továbbiakban vizsgálni fogunk. Ezekről a pontokról képfelvételeket kell készíteni, és meg kell mérni ezeknek a pontoknak a koordinátáit. Ezután meg kell mérni az ennek a felületnek a kiindulási állapotáról készített lenyomaton a bázispontok koordinátáit, és ki kell számolni a két koordináta-rendszer egymásra illesztéséhez szükséges eltolást és elfor-

gatást. A vizsgálandó pontok ismeretlen koordinátáit úgy kapjuk meg, hogy a kopott felület vizsgálandó pontjainak koordinátaival elvégezzük a bázispontokon meghatározott koordináta-transzformációt. Ugyanígy, a bázispontokból kiindulva lehet az érdességmérő berendezésen (Taylor Hobson TALYSURF CLI2000) ugyanazokat a pontokat megtalálni, mint amelyeket a koordináta mérőgépen bemértünk.

A módszert úgy ellenőriztük, hogy összehasonlítottuk, mennyire feleltethetők meg egymásnak ugyanazon felületrész közvetlen érzékeléssel készített képi és 3D-s letapogatással készített felvételei a lenyomat megfelelő pontjának képi és 3D-s letapogatással érzékelhető felvételeivel. Azon kívül, hogy a lenyomat a térbeli struktúra tükörképe, el is vesz információkat, és az érzékeléseknek is van egy bizonyos bizonytalanságuk, a lenyomatokon érzékelhető pontok az eredeti felület pontjaival mind képileg, mind a térbeli struktúrát illetően jó egyezést mutatnak. A lenyomat-technikát összehasonlítottuk a felület közvetlen érzékelésével fehérfény-interferométerrel, és ezzel is megfelelő egyezést kaptunk.

Kopásvizsgálatok a hengerfelületeken

Két vizsgálati sorozatot végeztünk. Az egyikben három, ugyanolyannak tekinthető (típus, gyártás) lézerkezelt hengerfelületű motornak



1. ábra • Szilikonlenyomat készítése a hengerfelületről

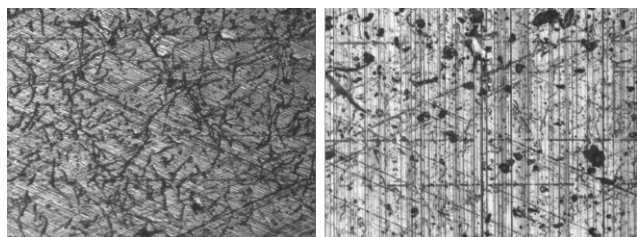
használtuk össze a gyártás utáni hengerfelületét az 500, illetve 1000 órás kevert programú és 1500 órás teljes terhelésű próbapadi járatás utánival. A vizuális vizsgálatot a négyhengeres motorok minden hengerének szívó- és kipufogóoldalának teljes lökethosszára és még a dugattyúgyűrűk alsó holtpontja alatti területre is elvégeztük. A vizsgálatból megállapítottuk, hogy egy motoron belül az egyes hengerek kiindulási állapotában és kopásában feltűnő eltérés nem mutatkozott, és a szívó- és a kipufogóoldal között sem lehetett nagy különbséget tapasztalni. Mindegyik hengerfelületről készített lenyomatról meg lehetett állapítani mindhárom dugattyúgyűrű (két kompressziógyűrű és az olajlehúzógyűrű) alsó és felső holtpontját. A holtpontnál egyrészt kifényesedik a felület, másrészt itt több hosszirányú karc is kezdődik vagy végződik. A holtpontok helyzetét kimérve és összehasonlítva meg lehetett állapítani, hogy egy motoron belül a négy hengernél összesítve a forgattyústengely egyes hajtókacsapjainak távolsága a forgástengelytől, a hajtókarhosszak és a dugattyú csapszegfurat tengelytávolsága a gyűrűhoronytól mennyire voltak különbözőek.

A holtponthoz sáv szélességéből a hajtókar-csap/hajtókarfurat, hajtókar/dugattyúcsapszeg/dugattyú és a gyűrűhorony/gyűrű illesztésére lehet következtetni. Egy henger szívó- és kipufogóoldalánál a holtponthoz távolságok

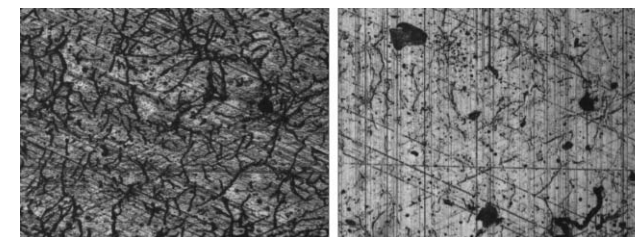
különbségéből a holtpontokban a dugattyú helyzetének ferdeségére (billlegésére) lehet következtetni. A kopás a hengerfelületen olyan formában jelentkezik, hogy a felület gyártási mintázatának magassága csökken, a finom mintázat el is tűnhet, másrészt a felületen olyan hosszirányú karcok keletkeznek, melyek gyártáskor egyáltalán nem voltak. A kopásnyomokból arra lehetett következtetni, hogy az elvárásoknak megfelelően a legnagyobb kopás a löket mentén, a löket felső harmadában van, ahol egyrészt az égésből a legnagyobb nyomások hatnak a dugattyúra, és ahol már mind a három gyűrű érintkezik a hengerfelülettel. A legkevesebbet – 500 órát – járatott motor (2. ábra) hengerfelületén voltak olyan területek, ahol nem volt kopásnyom, és abból, hogy a felület az égéstermékektől kokszosodott, arra következtettünk, hogy ilyen terhelés mellett nem is érintkezett azon a részen a gyűrű a hengerfelülettel. Mivel a gyűrűk alsó holtpontja alatt is voltak hosszirányú karcok; ez arra utalt, hogy itt a dugattyú palástfelülete érintkezett a hengerfelülettel.

Az 1000 órát járatott motornál (3. ábra) sokkal több kopásnyom keletkezett, mint az 500 órát járatottnál, és a teljes lökethosszon jelentkeztek a kopások, de még maradt mintázat az eredeti felületből is.

Az 1500 órás teljes terheléssel járatott motor (4. ábra) hengerfelületén a kopás hatására keletkezett hosszirányú karcok szinte tel-



3. ábra • Az 1000 órát járatott motor kiindulási és kopott hengerfelületéről készített lenyomat



4. ábra • Az 1500 órát teljes terheléssel járatott motor kiindulási és kopott hengerfelületéről készített lenyomat

jesen eltűntették az eredeti mintázatot, a mintázat szempontjából ez a hengerfelület megközelíti ezzel az élettartamának végét.

A másik vizsgálati sorozatot egy spirálhónolt (5. ábra) és egy lézerkezelte hengerfelületű (6. ábra), de egyébként ugyanolyan felépítésű négyhengeres Otto-motoron végeztük. A motorok hengerfelületeinek szívó- és kipufogóoldalairól vettünk a kiindulási állapotban szilikon lenyomatokat. Ezután a motorokat 40 órát járatottuk fékpádon könnyű terheléssel. A járatás után a motorokat szétszereltük, és a kopott hengerfelületekről lenyomatot vettünk. Ezután a motorokat (ugyanúgy, mint legelőször) összeszereltük, és megint 100 órát járatottuk könnyű terheléssel. A járatás után megint szétszerelés és a hengerfelületekről lenyomatvétel következett. Így össze lehet hasonlítani, hogy ugyanannak a motornak a hengerfelülete a bejáratás első 40, majd az azt követő 100 órája alatt, ami a további működés szempontjából nagyon fontos, hogyan

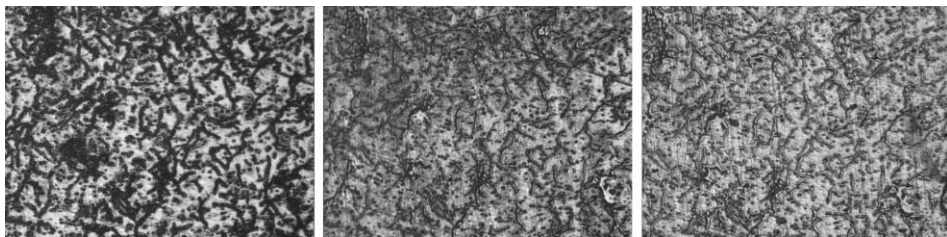
változik. A vizsgálat alapján megállapítottuk, hogy az első 40 órás járatás mindkét hengerfelületen nem jelentős kopásnyomokat hagy. A különbség a következő 100 órás járatásnál jelentkezik: míg a spirálhónolt hengerfelületű motornál további kopásnyomok keletkeznek, addig a lézerkezelte hengerfelületű motornál nem keletkezik további észrevehető kopásnyom ez alatt a 100 óra futás alatt. Tehát a lézerkezelte hengerfelület viselkedése kedvezőbb, mint a spirálhónolté, mivel a rövid bejáratás után a kopás lecsökken. A mérési módszer alkalmasnak mutatkozik ilyen többlépcsős – a motor ismételt szét- és összeszerelésével járó – kopásvizsgálatok elvégzésére.

Összefoglaló

A hengerfelületek közvetett vizsgálata szilikonlenyomatokkal alkalmas a felület mikrogeometriájának ellenőrzésére, abból a szempontból is, hogy a kiindulási állapot megfelel-e a követelményeknek, valamint a kiindu-



5. ábra • A spirálhónolt hengerfelület kiindulási, 40 és 140 órás kopott állapotáról készített lenyomat képe



6. ábra • A lézerkezelt hengerfelület kiindulási, 40 és 140 órás kopott állapotáról készített lenyomat képe

lasi állapotot össze lehet hasonlítani a hengerfelület későbbi kopott állapotával. A kopás vizsgálatából következtetéseket lehet levonni mind a hengerfelület üzemi tulajdonságaira, mind az üzemeltetésre.

A kutatás a *Mobilitás és környezet, Járműipari, energetikai és környezeti kutatások a Közép- és*

Nyugat-Dunántúli Régióban projekt keretében a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Kulcsszavak: *belsőégésű motorok hengerfelülete, spirálhónólás, lézerkezelés, kopásvizsgálat, lenyomattechnika*

IRODALOM

Gara, L. – Zou, Q. – Sangeorzan, B. P. – Barber, G. C. – McCormick, H. E. – Mekari, M. H. (2010): Wear Measurement of the Cylinder Liner of a Single Cylinder Diesel Engine Using a Replication Method. *Wear*. 268, 558–564.

Grabon, W. – Pawlus, P. – Sep, J. (2010): Tribological Characteristics of One-process and Two-process Cylinder Liner Honed Surfaces under Reciprocating Sliding Conditions. *Tribology Int.* 43, 1882–1892.

Luhmann, T. (2003): *Nahbereichs-photogrammetrie*, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH. & Co. KG, Heidelberg, 35–45.

KOPÁSI FOLYAMATOK ONLINE MÉRÉSE RADIONUKLEÁCIÓS TECHNIKA (RNT) SEGÍTSÉGÉVEL

Mathias Roman Dreyer

PhD, Széchenyi István Egyetem

Gergye Tamás

MSc, Széchenyi István Egyetem

1. Bevezetés

A magyar nyelvben a *kopás* szót két jelenségre is használjuk. Egyrészt a terhelés hatására, az alkatrészekben lejátszódó kopási folyamatokat, másrészt annak eredményét nevezhetjük kopásnak. Így beszélhetünk gyors kopásról (ha a folyamatra gondolunk) és nagy kopásról (ha az alkatrész méretváltozására gondolunk) (Vámos).

A világban előforduló szerkezetek és gépalkatrészek élettartamát a kopás szabja meg. A kopás mértéke és annak változása jelentősen befolyásolja az alkatrészek méretét, fizikai és kémiai tulajdonságát, munkavégző képességét stb.. A kopás kiinduló forrása lehet repedésnek, törésnek, valamint alkatrészek berágódásának.

Az alkatrészek felületén egyszerre több kopástípus is előfordulhat. A kialakuló kopástípust különböző tényezők kölcsönhatása határozza meg: igénybevétel (pl.: terhelés, hő), súrlódó anyagok (pl.: mechanikai, fizikai és kémiai tulajdonságok), kenőanyag (folyadék, szilárd, gáz) stb.

A kopás mérésére különböző módszereket alkalmaznak. A hagyományos módszereknél (tömegmérés, olajminta-elemzés, hossz-mérés)

az alkatrészek kopását egy bizonyos működési idő eltelte után, szétszerelt állapotban határozzák meg, vagy mintavételezés (olajminta-elemzés) útján mérik. A mérések hátránya, hogy a kopás folyamatának alakulásáról nem adnak információt.

Vannak a hagyományos módszerekkel ellentétben olyan módszerek, amelyek segítségével a kopás folyamatosan (online) mérhető, azaz a folyamat alakulása nyomon követhető. Ennek köszönhetően a vizsgált alkatrészen vagy alkatrészekben fellépő, terhelésváltozás hatására létrejövő kopás folyamatosan mérhető.

A következő fejezetekben szeretnénk röviden a tribológiát mint különálló tudományágot, a különböző súrlódás- és kopásmechanizmusokat, a különböző kopásmérési módszereket és a motorfejlesztésben alkalmazott kopásmérési eljárást részletesen bemutatni.

2. Tribológia

A tribológia tudományának a története az emberiség történelmével egyidős. Gondoljunk csak az ősemberre, aki a kőszerszámok kialakításánál valamint a tűzcsiholásnál, tapasztalat útján használta a súrlódás és kopás jelenségét (1. ábra).

Az egyiptomiak a piramisépítésnél szintén tapasztalatokat gyűjtve javítottak a kővonszolás technikáján. Kezdetben a nehéz kőtömbök vonszolásakor (csúszási ellenállás) vizet használtak a két érintkező felület között, majd rájöttek, hogy az ellenállás jobban csökkenthető, ha farönkökön görgetve (gördülési ellenállás) húzzák a kőtömböket (2. ábra).



1. ábra • Tűzcsiholás

Az igazi fejlődést az 1500-as évek hozták, amikor az ember elkezdett élenként érdeklődni a természettudomány és a technika iránt. Számos fejlett műszaki rajz és műszaki ismereteket tartalmazó írás származik ezekből az időkől. Rengeteg fizikus, tudós és mérnök foglalkozott – Leonardo da Vinci (1452–1519), Pascal (1623–1662), Desargues (1591–1662), Amontons (1663–1705), Bernoulli (1700–1782), Segner (1704–1777, magyar orvos), Coulomb (1736–1806), Navier (1785–1836), Kármán (1881–1963, magyar fizikus), Sommerfeld (1868–1951), Bowden (1903–1968), Tabor (1913–2005) – az évek során a súrlódás, kopás és a kenés jelenségeinek a tanulmányozásával. Az 1960-as évek közepén (űrkutatás, bányászat) felmerült problémák már nem voltak magyarázhatók az eddig megfogalmazott empirikus képletekkel. 1964-ben Jost azzal a kéréssel fordult az oxfordi Hardy nyelvészprofesszorhoz, hogy tegyen javaslatot egy új tudományág elnevezésére, amely magába foglalja a súrlódás, kopás és kenés elméletét. A választás a tribológia szóra esett, ami görög

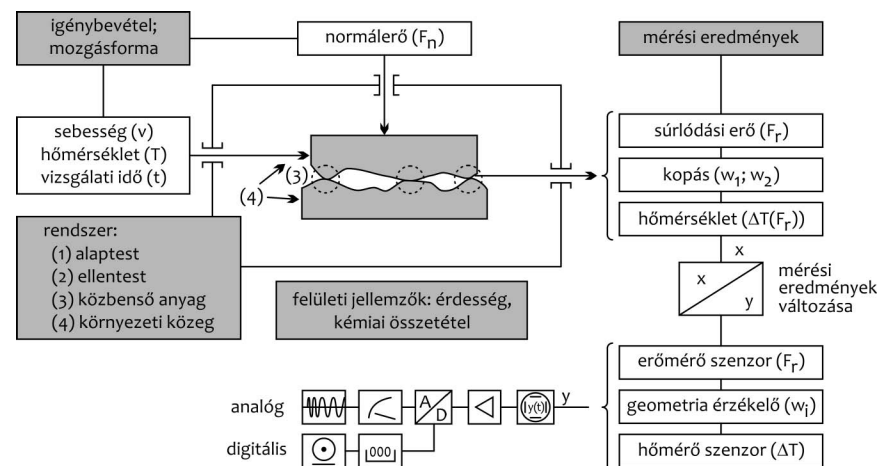
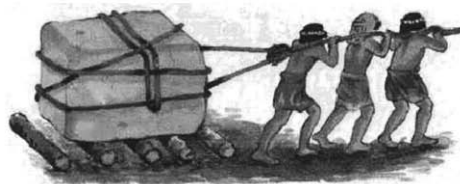


2. ábra • Tribológia a piramisépítés alatt

eredetű szavak összetétele (τριβειν = súrlódás és λογος = tudomány). A tribológia mint különálló tudományág csak 1966-tól létezik.

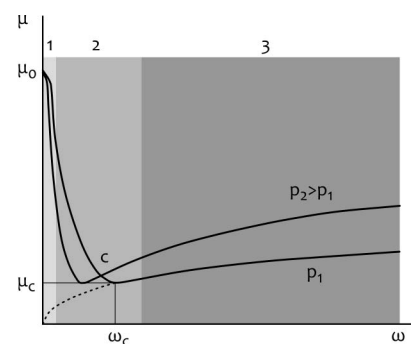
2.1 Tribológiai rendszer • A kopási és súrlódási folyamatban a következő elemek vesznek részt: alaptest (1), ellentest (2), közbenső anyag (3) és a környezeti közeg (4). A lejátszódó folyamatokat ezeknek az elemeknek a jellemző paraméterei nagymértékben befolyásolja. A 3. ábra egy elemi tribológiai rendszert mutat be. Fontos megjegyezni, hogy a különböző problémák megoldásához pontosan ismerni kell az adott tribológiai rendszert, valamint az érintett tudományterületeket (mechanika, anyagtudomány, fizika, kémia) (Czichos et al. 2010).

2.2 Súrlódás • A súrlódás magába foglalja azokat a jelenségeket, amelyek egymással érintkező testeknek az érintkezési felület mentén való viszonylagos elmozdulásával, ill. ennek akadályozásával kapcsolatosak.



3. ábra • Elemi tribológiai rendszer (triborendszert) (Czichos et al. 2010)

A 4. ábra a különböző súrlódási folyamatokat mutatja be. Megkülönböztetünk, száraz, határ-, vegyes, valamint folyadéksúrlódást. **Száraz súrlódás** (1) esetén a két érintkező felület között nincs kenőanyag. **Határsúrlódás**nál az érintkező felületeket vékony filmréteg választja el egymástól. **Folyadéksúrlódás**nál (3) az érintkező felületek között szabadon mozgó folyadék vagy gáz található. Ez a folyadékréteg veszi fel a szerkezetre ható terhelést, a súrlódási tényezőt a folyadék, ill. gáz belső súrlódása határozza meg. A **vegyes súrlódás**

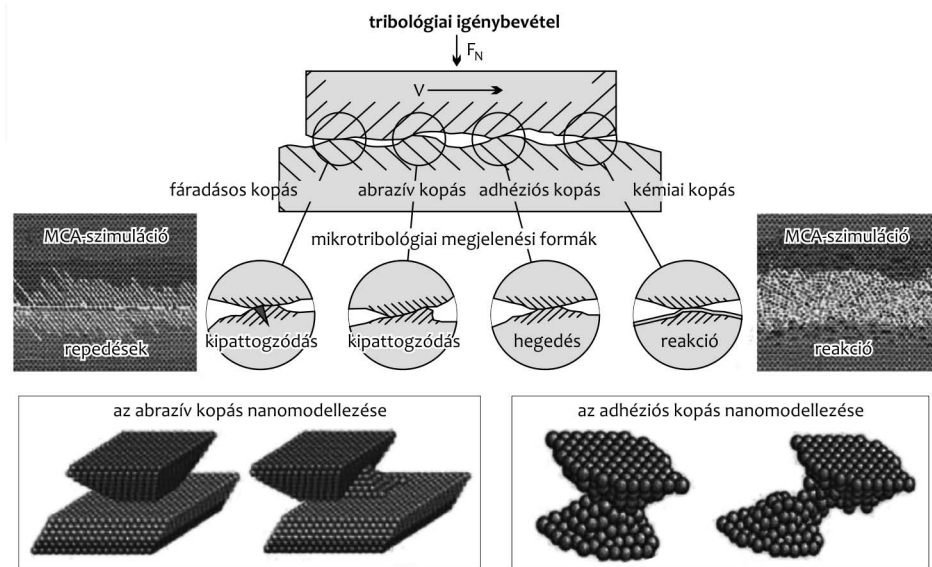


4. ábra • A súrlódás fajtái (www.wikipedia.hu)

ra (2) jellemző, hogy az érintkező felületek egyes részei között szabadon mozgó folyadék található (Vámos 1983, Valasek 2002).

2.3 Kopás • Mielőtt a kopásmechanizmusokat tárgyalnánk, fontos a kopás fogalmát bevezetni. A kopás a szilárd testek felületén bekövetkező anyagvesztés, amelyet szilárd, cseppfolyós vagy légnemű közeggel való érintkezés és relatív elmozdulás okoz. Használat során azonban az érintkező felületek oxidálódhatnak, így nemcsak anyagvesztés, de súlytöbblet is kialakulhat. Az 5. ábra a különböző kopásmechanizmusokat mutatja be.

Adhéziós (hegedéses) **kopás** elsősorban fémes anyagok között jön létre viszonylag kis sebességgel mozgó, nagy felületi nyomásnak kitett alkatrészek között, ahol a felületen nem alakul ki kenőfilmréteg. A nyomás meghaladja az anyag folyáshatárát, a felületek érdeségi csúcsai képlekeny alakváltozást szenvednek. Fémes kötés alakul ki az érintkezési pontokban. Elmozdulás hatására a keményebb fém részecskéket szakít le a kevésbé keményebb felületről. Az adhéziós kopás következtében a kiszakított részecskék helyén



5. ábra • Kopásmechanizmusok (Czichos et al. 2010)

feszültségkoncentráció következtében mikro-repedések jöhetnek létre. A hegedéses kopás az alkatrészek gyors elhasználódásához vezet (Vámos 1983, Valasek 2002).

Abrazív kopás során a keményebb felület érdes csúcsai karcokat, barázdákat hoznak létre a lágyabb anyagban. Ha az érintkező felületek közé egy kemény részecske kerül, akkor a részecske szintén karcolja a felületeket, valamint mikroforgácsokat hoz létre. Az abrázív részecske lehet levegőből bekerült por-szem, valamint a felület oxidrétegéből levált oxidok. A leggyakoribb kopásmechanizmus, mert a gépszerkezetek poros környezetben dolgoznak és a felületek közé szorult kopás-termék a súrlódás során felkeményedik és abrázív válik. (Vámos 1983, Valasek 2002)

Kémiai reakció okozta kopás során az érintkezési felületek kezdetben a környezettel reagálnak, a keletkezett reakciótermék lerakódik a felületre, majd abrázív kopás következtében a létrejött reakciótermék lehordásra

kerül, így a felület ismét ki van téve a környezet elemeinek (Vámos 1983, Valasek 2002).

Ha a létrejött kopást az idő függvényében ábrázoljuk, akkor a kopásdiagramhoz jutunk. A 6. ábra a lejátszódó kopásfolyamatokat mutatja be. A progresszív kopás során a kezdeti kopássebesség nagy. Az idő haladtával ez a sebesség nem csökken, hanem egyre növekszik. Ennek a kopásfolyamatnak az oka lehet hibás konstrukció, nem megfelelő kenés stb. A lineáris kopás kezdetben, a degresszív kopáshoz képest kisebb, viszont egy bizonyos időpillanat után (két görbe metszéspontja) nagyobb kopássebességgel rendelkezik. A kopássebesség a görbe differenciálásával meghatározható:

$$\dot{w} = \frac{dw}{dt}$$

A kopásgörbe három szakaszra osztható: az alkatrész bejáratódásának szakasza, a hasznos üzem szakasza, valamint az instabil szakasz. Bejáratáskor a kezdeti nagy kopássebesség egy

bizonyos idő elteltével csökken, és közel állandó értékre áll be. Ezt a szakaszt nevezzük a hasznos üzemi szakasznak, ahol az alkatrészek a különböző terhelésváltozásra kis mértékben reagálnak, a kopássebesség közel állandó. Egy bizonyos üzemóra elteltével (ez általában jóval nagyobb a tervezett üzemóránál) a kopássebesség ismét megnő és a rendszer instabillá válik, azaz az alkatrész tönkremeneteléhez vezet (Vámos 1983, Valasek 2002).

3. Kopásmérési technikák

A kopás mérésére számos módszer ismeretes. A következőkben röviden bemutatásra kerülnek különböző kopásmérési eljárások.

3.1 Tömegmérés • Ha az alkatrész tömegét a vizsgálatok előtt és után lemérjük, akkor a létrejött különbség megadja az alkatrész kopását. Fontos megjegyezni, hogy maga a módszer egyszerű, ám nem ad információt a kopás helyéről (Vámos 1983, Picken et al. 1981).

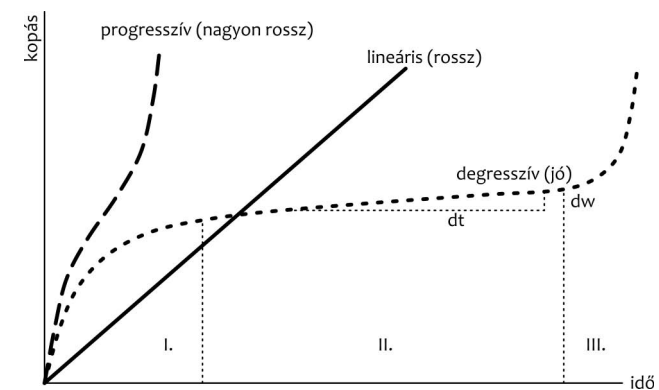
3.2 Mechanikus mérés • A tömegméréssel ellentétben a mechanikus mérés során képet kapunk arról, hogy a kopás az alkatrész mely területén jött létre. Az alkatrész geometriai méreteit (érdesség, hossz-mérés) megfelelő pontosságú mérőműszerek segítségével a vizs-

gálatok előtt és után mérik. Hátránya, hogy a mérés egy vonal mentén történik, így a nagyobb és bonyolult alkatrészeknél több mérési helyre van szükség. Ez rendkívüli módon megnöveli a vizsgálatok időtartamát. A kapott mérési eredményekből a kopás mértéke számítható (Vámos 1983, Picken et al. 1981).

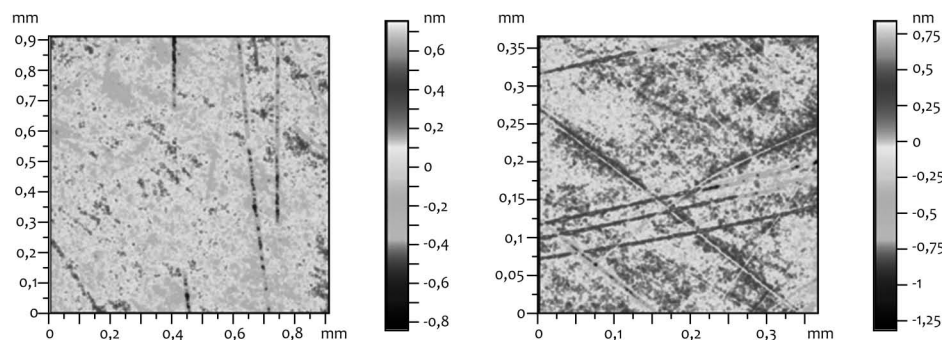
3.3 Optikai módszer • A mai fejlett világban lehetőség van felületek összehasonlítására (7. ábra). Ilyenkor az alkatrészek felületét a vizsgálatok előtt és után mérik, digitalizálják (3D), majd a vizsgálatok végén a két felületet összehasonlítják. A mérőrendszer felbontásának megfelelően lehet a méretbeli változásokat kiértékelni (Vámos 1983, Picken et al. 1981).

3.4 Kémiai elemzés • Kémiai elemzésnél, az érintkező felületekről levált részecskék az olajba kerülnek. A levált részecskék fémtartalmát időközönként vizsgálják, például kémiai elemzés útján. A mérésnél, ellentétben a többi eddig említett eljárással, nem kell az alkatrészeket szétbontani a vizsgálat elvégzéséhez (Vámos 1983, Picken et al. 1981).

3.5 Radioaktív kopásmérés • A kémiai elemzéshez hasonló eljárás a radioaktív izotópos kopásvizsgálat. Ilyenkor a vizsgálandó alkatrész felületét aktiválják. A kopás intenzitása



6. ábra • A kopás jellegének és nagyságának változása



7. ábra • Felületek összehasonlítása (Giusca et al. 2012)

az olajban található radioaktív részecskék nyomon követésével mérhető. A módszerrel a kopás sebessége folyamatosan mérhető, rendkívül érzékeny, viszonylag kis kopások is jól mérhetők vele. Ha az aktiválás kis felületre korlátozódik, akkor helyi kopások ki-mutathatóak. A mért kopásérték átlagérték. Ahhoz, hogy a helyi kopásokat megállapítsák, szokás a mérések előtt és után a vizsgálandó felületeket mind profilméterrel (2D) mind optikai módszerekkel (3D) mérni és összehasonlítani. Ezek a mérések lehetőséget adnak a nem aktivált felületek ellenőrzésére is. Előfordulhat ugyanis, hogy a kopás azokon a helyeken a legnagyobb, ahol nem volt radioaktív a felület (Vámos 1983, Picken et al. 1981, Conlon 1974). Ilyenkor új mérések szükségesek. Erről bővebben a következő fejezetben.

4. Online kopásmérés radioaktívan megjelölt motoralkatrészek

A következő szakaszban a belső égésű motorokon alkalmazott online kopásmérési eljárás kerül bemutatásra.

4.1 A mérés kialakulásának szakaszai • 1930-ban Lawrence a ciklotron (részecskegyorsító) kifejlesztésével új utakat nyitott a radioaktivitás gépészetben történő alkalmazásában. Úgy vélte, hogy a töltött részecskékkel besu-

gázt alkatrész felületéről leváló kopadék sugárzásának nagyságából következtetni lehet a kopás mértékére (Scherge 2003).

Kezdetben az alkatrészeket neutronnal sugározták be. Hátránya, hogy a munkadarab azon részei is radioaktívak lettek, amelyeket nem is akarták vizsgálni. Emiatt a nagy alkatrészek nagy aktivitással rendelkeztek és különleges védőintézkedések mellett csak laboratóriumi körülmények között tudták a méréseket elvégezni (Scherge 2003).

1958–70 között a karlsruhei egyetem Karl Kollmann vezetésével elhatározta, hogy lehetővé teszik az izotóptechnika belső égésű motorokban való alkalmazását. Mozgó alkatrészek vizsgálatával, olajfilmvastagság- és olajfogyasztás-méréssel, valamint kopásrészecskék méretének elemzésével foglalkoztak. A kutatások során két nehézségbe ütköztek. Egyrészt az akkori elektronika megbízhatatlan volt, másrészt nehezítette a munkát a neutronnal besugárzott alkatrészek igen nehéz kezelhetősége (Scherge 2003).

Az utóbbi probléma megoldására kifejlesztettek egy ún. vékonyréteg-aktiválási eljárást. Az aktiválás során töltéssel rendelkező részecskékkel bombázzák a felületet, aminek eredménye, hogy a részecskék az anyagba behatolva lefékeződnek, és így csak a felület

egy vékony rétege lesz radioaktív. Ez a töltéssel rendelkező részecske lehet proton, deuteron vagy α -részecske (Scherge 2003).

Andreas Gervé vezetésével a karlsruhei magkutató intézetben két kopásmérési eljárást fejlesztettek ki. Az ún. vékonyréteg-különbség eljárásnál az alkatrész aktivitásának a változásából, míg az úgynevezett koncentrációs eljárásnál az olajba kerülő, növekvő kopásmennyiségnek az aktivitásváltozásából következtethetnek a kopásra (Scherge 2003).

4.2 Aktiválási eljárások • Ahhoz, hogy a leváló részecskéket mérni tudjuk, szükség van a felület besugárzására. A cikk három eljárást mutat be, amiket a motoralkatrészek besugárzására használnak. Ezek közül a leggyakrabban használt aktiválási módszer a töltött részecskékkel történő besugárzás. A lejátszódó magreakció során az alapanyag egyik alkotóelemét besugározzák egy részecskével (kívánt mérőnuklid létrehozása céljából), majd a magátalakulás során keletkező új radioaktív elem marad vissza (Conlon 1974).

4.2.1 Neutronnal történő besugárzás • Az alkatrészek neutronnal történő besugárzása kor termikus neutron (lassú neutron) használnak. Az aktiválás hátránya, hogy nagyobb alkatrészeknél (pl.: forgattyús ház) olyan nagy aktivitás érhető el, hogy a mérés már különleges védőintézkedések nélkül nem végezhető el. A bemutatásra kerülő besugárzási módszerek közül ez a leggazdaságosabb (Scherge 2003, IAEA 1997, Racolta 1995).

4.2.2 Nehéz, töltött részecskékkel történő besugárzás • A töltött részecskékkel történő aktiválás részecskegyorsítóban (ciklotronokban) történik. Előnye, hogy csak azok a területek, ill. felületközei tartományok (kb. 10–500 μm) kerülnek besugárzásra, ahol a kopás keletkezik. Ezek a részecskék az anyagba behatolva hamar elvesztik mozgási ener-

giájukat, így az aktiválás mélységét a besugárzott részecske energiája, valamint az alkatrész alapanyaga befolyásolhatja (Scherge 2003, IAEA 1997, Racolta 1995).

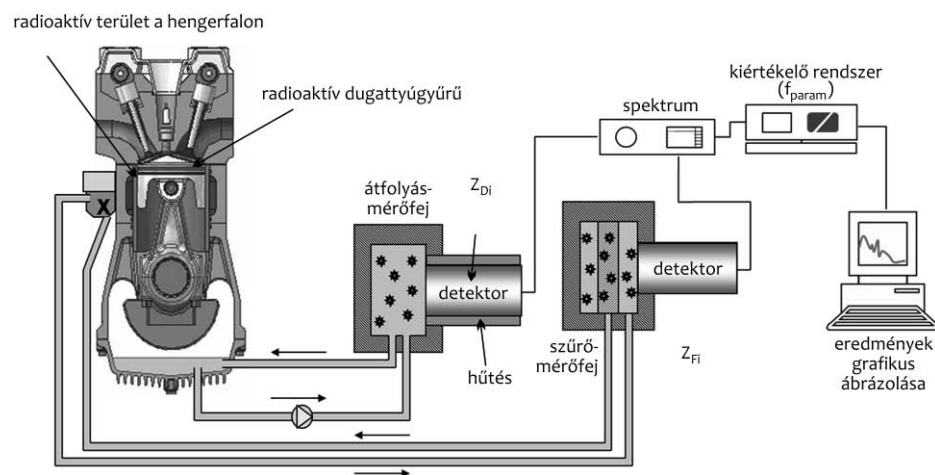
4.2.3 Ionbeültetési besugárzás • Ennél a módszernél a nemfémes anyag aktiválása lehetséges. Ennél az aktiválásnál egy bizonyos radioaktív anyagot juttatnak a felületbe. Ez a radioaktív anyag nem okoz anyagkárosodást. Itt szintén csak a felület vékony rétegei kerülnek aktiválásra. Az elérhető aktiválási mélység körülbelül 20 μm (Scherge 2003, IAEA 1997, Racolta 1995).

4.3 Mérési módszerek • A következő pontokban bemutatásra kerülnek a kifejlesztett eljárások. Természetesen mindegyik eljárást a mérés előtt kalibrálni kell. A kalibrálás folyamata nem kerül bemutatásra.

4.3.1 Szűrő-koncentrációs eljárás • Ennél az eljárásnál a besugárzott területől leváló kopásrészecske belekerül az olajba, majd mérik a részecskék aktivitását. Ennek a módszernek mindig szüksége van egy szállítóközegre, ami a leváló részecskéket a mérőfejhez szállítja. A szállító közeg egy úgynevezett átfolyás mérőfejen kerül átpumpálásra. A mérőfej egy mérőedényből és egy érzékeny NaJ-szintillációs érzékelőből áll. A mérőedény köré vastag ólomköpeny kerül, amely a háttérsugárzástól védi meg a kopásrészecskéket. [Scherge 2003]

A rendszer kiegészíthető egy úgynevezett szűrő mérőfejjel, amelynél a motor gyári szűrőjét eltávolítják. A kopásrészecskéket tartalmazó olaj így már mindkét mérőfejen átmegy (Scherge 2003).

A módszer lehetőséget nyújt nemcsak egy, hanem két alkatrész egyidejű besugárzására és mérésére. Ennek előnye, hogy a tribológiai rendszerben részt vevő két érintkezési felület egyidejűleg vizsgálható. A mérés elrendezését a 8. ábra mutatja be (Scherge 2003).



8. ábra • Szűrő-koncentrációs eljárás

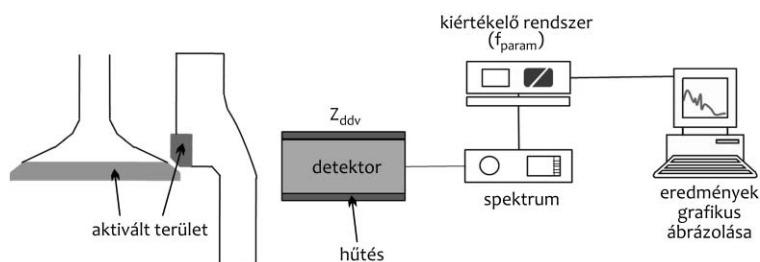
4.3.2 *Vékonyréteg-különbség eljárás* • Ezt az eljárást akkor alkalmazzák, ha a vizsgálandó alkatrészről lekopott részecskék nem kerülnek bele az olajba, így a részecskék mérőfejhez való szállítása nem lehetséges. Ilyen esetekben nem a leváló részecske aktivitását mérjük, hanem az alkatrészen visszamaradó aktivitást. A sugárzást itt is NaJ-szintillátor-érzékelővel mérjük. Az alapelv egyszerűsége ellenére a mérést számos tényező befolyásolhatja: geometriai korlátok, detektor elhelyezése, valamint azon alkatrészek árnyékoló hatása, ami a vizsgált alkatrész és az érzékelő között található. A mérés pontossága körülbelül egy-két nagyságrenddel kisebb a koncentrációs eljárás

ráshoz képest (Scherge 2003). Ilyen alkatrész lehet például a szeleptányér vagy a szeleptülék (9. ábra).

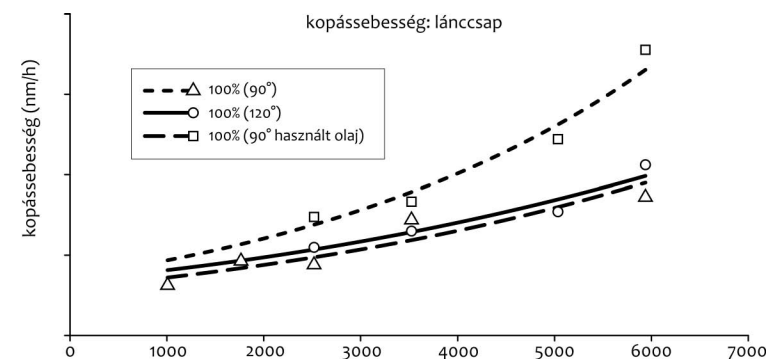
5. Kopásmérések belső égésű motorokon

Ebben a fejezetben szeretnénk rövid áttekintést adni arról, hogy a fent említett alkalmazás milyen segítséget tud nyújtani a mérnöknek. Az áttekintés mellett egy a Széchenyi István Egyetemen elvégzett kopásmérést is szeretnénk a teljes részletesség igénye nélkül, röviden bemutatni.

A belsőégésű motorokban rengeteg tribológiai rendszer található. E rendszerek vizsgálatának egyik módja az online kopásmérés.



9. ábra • Vékonyréteg-különbség eljárás



10. ábra • Lánccsap kopássebessége teljes terhelés mellett

Számos tanulmány született már ebben a témakörben, amelynek köszönhetően érdekes és fontos információkhoz jutott a mérnök-szakma.

Katzenmeier a siklócsapágys kopását mérte. Különböző anyagpárosításoknak, valamint a felületi érdességnek a hatását vizsgálta mind statikus, mind dinamikus terhelés alatt. Tanulmányainak köszönhetően képet kaptunk a kenőrés nagyságáról, amivel a megfelelő bejáratás mellett a csapágys biztonságos üzeme szavatolható (Katzenmeier, 1972).

Kaiser egy hathengeres dízelmotoron vizsgálta a dugattyúcsoporsúrlódási veszteségeit. Munkájában különböző formájú és anyagú dugattyúgyűrűket vizsgált különböző terhelések és olajhőmérséklet mellett (Kaiser 1972).

Volz a dízelmotorokhoz egy úgynevezett bejáratási programot optimalizált, amelynek segítségével, a bejáratás feltételeinek (teljesítmény, olajfogyasztás és fajlagos üzemanyag fogyasztás) a motor kopásviselkedésére gyakorolt hatását tárta fel (Volz 1977).

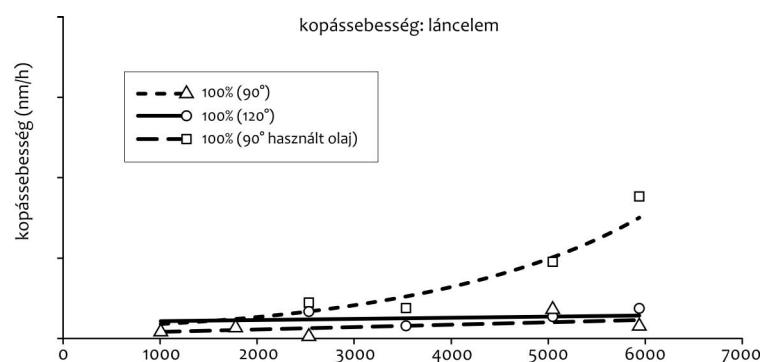
A Széchenyi István Egyetem belső égésű motor laborjában található berendezés segítségével egy négyhengeres benzinmotor vezérműlánckopását vizsgáltuk. A mérés során

a fogas lánccsap két lánccsapját, valamint a hozzájuk csatlakozó nyolc lánccsapot aktiváltuk. A mérések során különböző terhelés és fordulatszám mellett vizsgáltuk a kopás mértékét. Az olaj hőmérsékletét kondicionáltuk. Különböző hőmérsékleten és különböző olajminőséggel vizsgáltuk meghatározott munkapontokban a kopássebességet. Az eredmények azt mutatták, hogy az olaj hőmérsékletének változására a lánccsapok kevésbé érzékenyek, viszont a használt olajjal (a használt olaj egy, a forgalomban használt autóból került leeresztésre, megadott futott kilométer után) történt mérés során a kopássebesség jelentős mértékben megnövekedett, mind a lánccsapokon, mind a lánccsapokon.

A lánccsapot nem csak radioaktív kopásmérés segítségével lehet mérni, hanem a lánccsap megnyúlásából is lehet következtetni a kopás nagyságára, így az online mérés eredményeit a lánccsap megnyúlás eredményeivel validáltuk.

Összefoglalás

A fent leírtakból látható, hogy az online kopásmérés a mai világban elengedhetetlen. Segítséget nyújt a mérnöknek nemcsak a tervezési és kísérleti fázisban, de a motor életében később jelentkező problémákra is.



II. ábra • Láncelem kopássebessége teljes terhelés mellett

A motorjárató fékpad és a kopásmérő berendezés segítségével lehetőség nyílik a motort különböző viszonyok mellett (sivatag, nedves

környezet, változó olajhőmérséklet, úgynevezett start-stop üzem stb.) vizsgálni, ami pénz-, idő- és energiamegtakarítást jelent.

A kutatást a TÁMOP 4.2.1/B-9/1/KONV-2010-0003 számú pályázat támogatta.

Kulcsszavak: *aktiválás, kopásmechanizmus, kopásmérés, RNT*

IRODALOM

- Claudiu L. Giusca – Richard K. Leach – Franck Helary – Tadas Gutasas – Lakshmi Nimishakavi (2012): Calibration of the scales of areal surface topography-measuring instruments: part 1. Measurement noise and residual flatness, *Measurement Science and Technology*, 23.
- Conlon, T.W. (1974): Thin layer activation by accelerated ions-application to measurement of industrial wear. *Wear* 29, 69-80.
- Czichos, H. – Habig, K.H. (2010): *Tribologie-Handbuch*. Vieweg+Teubner, Berlin.
- Kaiser, W. (1972): Der Einfluß verschiedener Kolbenring- und Nutformen sowie der Nutwerkstoffe auf den Ring- und Nut-Verschleiß in einem 6-Zylinder-Dieselmotor (Experimentelle Untersuchungen mit Hilfe von Radioisotopen), *KfK-Bericht 1568*, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe, Germany, Feb. 1972.
- Katzenmeier, G. (1972): Das Verschleißverhalten und die Tragfähigkeit von Gleitlagern im Übergangsbereich von der Vollschröpfung zu partiellem Tragen (Untersuchungen mit Hilfe von Radioisotopen), *KfK-Bericht 1569*, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe, Germany, Februar 1972. • <http://hu.wikipedia.org/wiki/Sikl%C3%B3B3csap%C3%A1gy>
- International Atomic Energy Agency (1997): The thin layer activation method and its applications in industry. IAEA-TECDOC-924.
- J. Volz (1977): Erstellung optimierter Einlaufprogramme von Dieselmotoren (Ein System unter Anwendung von Radionuklid), *KfK-Bericht 2432*, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe, Germany, März 1977.
- Picken, D.J. – Hassaan, H. – Buttery, T.C. (1981): The use of surface metrology instrumentation to measure rates of wear of internal combustion engine components. *Wear* 185-192.
- Racolta, P.M. (1995): Nuclear methods for tribology. *Appl. Radiat. Isot.* 46 No 6/7, 663-672.
- Scherge, M. – Pöhlmann, K. – Gervé, A. (2003): Wear measurement using radionuclide-technique (RNT). *Wear* 254, 801-817.
- Valasek, I. (2002): *Tribológia 1 – A tribológia alapjai*. Tribotechnika Kft. Budapest.
- Vámos, E. (1983): *Tribológiai kézikönyv, Gépek és gép-elemek súrlódása, kopása, kenése*. Műszaki könyvkiadó. Budapest.

A JÁRMŰFORGALOMBÓL ÉS KŐOLAJ-FELDOLGOZÁSBÓL SZÁRMAZÓ KÁROS ANYAGOK EMISSZIÓJÁNAK HATÁSA AZ ÁLLATI EREDETŰ ÉLELMISZEREK NEHÉZFÉM-TARTALMÁRA

Kodrik László Wágner László

PhD-hallgató,
Pannon Egyetem Georgikon Kar, Keszthely
kodriklaszlo@gmail.com

egyetemi docens,
Pannon Egyetem Georgikon Kar, Keszthely

Husvéth Ferenc

egyetemi tanár
Pannon Egyetem Georgikon Kar, Keszthely

Nehézfémek és a környezetünk

A közlekedés intenzitásának növekedése, mezőgazdasági technológiák átalakulása, az ipari termelés fejlődése környezetünk szempontjából számos, nemegyszer ellentétes változást eredményezett. Ezek a hatások nyomon követhetők a talaj, a felszíni vizek, valamint a növény- és állatvilág kémiai összetételének módosulásában is.

Az életterünk szennyeződésének forrásai közül kiemelkedő jelentőségűek az emberi eredetűek (antropogének), amelyek pontszerű vagy nem pontszerű (diffúz) szennyeződést okozhatnak. Antropogén, pontszerű szennyeződés fordulhat elő a mezőgazdasági tevékenységek során, ha például nem megfelelően kezelik a hígtrágyát, istállótrágyát. Diffúz szennyeződés ott alakulhat ki, ahol a közlekedés, ipari emisszió következtében a levegő-

ben előforduló szennyező anyagok kiülepednek (Lippman, 2009).

Az ipari és közlekedési szektorok szennyezőanyag-kibocsátása jelentősen módosította a természetes ökológiai egyensúlyt. A legtöbb problémát a környezetbe került higany (Hg), ólom (Pb), kadmium (Cd), nikkel (Ni), réz (Cu), króm (Cr) és cink (Zn) okozzák. A mezőgazdasági művelés alatt álló területek közül vannak olyanok, melyek közvetlenül nagy járműforgalmú autópályák, illetve ipari létesítmények közelében helyezkednek el. Ezeken a területeken nagymértékű lehet egyrészt a talajba bejutott, másrészt a levegőből kiülepedett és a növényzetre lerakódott nehézfémek mennyisége is (Kádár, 1995). Ez a folyamat egyes toxikus nehézfémek feldúsulásához vezetett a talaj-növény-állat rendszerben (Szabó et al., 1987), s ennek következtében élelmiszereink is veszélynek vannak kitéve.

Kémiai értelemben azokat a fémeket nevezzük nehézfémeknek, amelyek sűrűsége 5 g/cm^3 -nél, valamint rendszámuk a periódusos rendszerben 20-nál nagyobb. A toxikusnak tekintett elemek, valamint esszenciális, de bizonyos határértéket meghaladó mennyiségben ártalmas elemek vizsgálata már hosszú idő óta áll az érdeklődés középpontjában. A nehézfémek állattenyésztéssel kapcsolatos kutatásai az 1920-as években kezdődtek. Sorra mutatták ki a réz, a mangán, a kobalt, a molibdén esszenciális voltát, melyek első sorban a termeléshez kapcsolódó biokémiai-élettani folyamatok szempontjából jelentősek.

A kémiai elemeket biológiai-élettani szerepük szerint szokás csoportosítani, de az egyes elemek (köztük a nehézfémek) megítélése mégsem egyszerű, számos tényező befolyásolja hatásukat: bizonyos átalakulási folyamatok során mérgező hatásuk csökkenhet, az elemek között fellépő segítő jellegű (szinergista), illetve ellenirányú (antagonista) hatás következtében változhat (Pais, 1999). A kérdéses elem koncentrációjának is jelentős szerepe van a megítélésben, hiszen bizonyos határok felett minden elem toxikus lehet, még a létfontosságúak is. Ugyanakkor a szervezet hozzá szoktatható bizonyos toxikus elem mennyiséghez, így képes tolerálni magasabb koncentrációkat is. Osztrák, hegyvidéki embereknek írták le például az arzén szándékos fogyasztását; ők élénkítő, állóképességnövelő hatása miatt alkalmazták (Jones, 2007).

A nehézfémek műszeres mérése

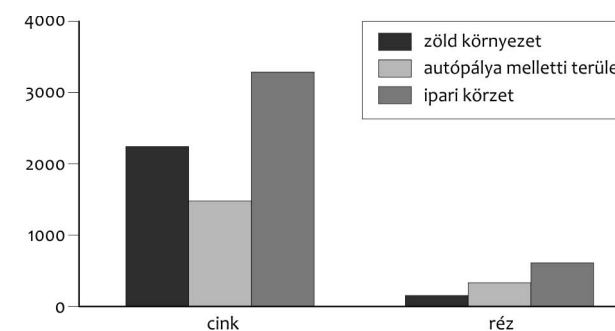
A kémiai analízis során nagy figyelmet kell fordítani arra, hogy a mérni kívánt komponens mellett előforduló egyéb, a mérést zavaró anyagok hogyan befolyásolják a mérés érzékenységét. Minél nagyobb a nemkívánatos anyagok mennyisége a mérendő nehézfémhez képest, annál nehezebb a mérés reprodukcióját és megbízhatóságát biztosítani. Egy analízist akkor lehet elvégezni, ha az általunk használt módszer érzékenysége és kimutatási határa megfelelő.

A környezeti analitikában a fémtartalom meghatározásokat általában a különböző optikai atomspektroszkópiai módszerekkel, illetve tömegspektrometriás módszerrel végzik. Ezek közül az eljárások közül is kiemelkednek az induktív csatolású plazma (ICP) módszerek, melyeket külföldön is elsősorattal alkalmaznak (Chiara – Beatrice, 2008): az induktív csatolású plazma optikai atomemissziós módszer (ICP-OES), ami hetven-nyolcvan elem mennyiségi meghatározását teszi lehetővé a plazmában keletkező gerjesztett részecskék fénykibocsátásának felhasználásával. A mintaoldat porlasztással, gázárammal kerül az induktív csatolású plazmába, ahol a minta komponensei elpárolognak, a keletkező szabad részecskék gerjesztődnek, és az elemekre jellemző hullámhosszú fotonokat bocsátanak ki (Settle, 1997). A hatékonyság növelhető, ha az ICP-t tömegspektrométerrel kombináljuk. Az ICP-MS-módszer az ICP-OES-módszerben használt induktív csatolású argon-argon plazmát mint atmoszférikus nyomáson üzemelő ionforrást használja. Kimutatási határa ppb nagyságrendű. Az ICP-ionforráson keresztül a tömegspektrométerbe bevitt minta ionjai tömeg/töltés (m/z) hányados szerint időben elválasztva kerülnek detektálásra. A módszerrel nagyszámú minta és nagyszámú elem határozható meg.

A környezeti analitikában a fémtartalom meghatározásokat általában a különböző optikai atomspektroszkópiai módszerekkel, illetve tömegspektrometriás módszerrel végzik. Ezek közül az eljárások közül is kiemelkednek az induktív csatolású plazma (ICP) módszerek, melyeket külföldön is elsősorattal alkalmaznak (Chiara – Beatrice, 2008): az induktív csatolású plazma optikai atomemissziós módszer (ICP-OES), ami hetven-nyolcvan elem mennyiségi meghatározását teszi lehetővé a plazmában keletkező gerjesztett részecskék fénykibocsátásának felhasználásával. A mintaoldat porlasztással, gázárammal kerül az induktív csatolású plazmába, ahol a minta komponensei elpárolognak, a keletkező szabad részecskék gerjesztődnek, és az elemekre jellemző hullámhosszú fotonokat bocsátanak ki (Settle, 1997). A hatékonyság növelhető, ha az ICP-t tömegspektrométerrel kombináljuk. Az ICP-MS-módszer az ICP-OES-módszerben használt induktív csatolású argon-argon plazmát mint atmoszférikus nyomáson üzemelő ionforrást használja. Kimutatási határa ppb nagyságrendű. Az ICP-ionforráson keresztül a tömegspektrométerbe bevitt minta ionjai tömeg/töltés (m/z) hányados szerint időben elválasztva kerülnek detektálásra. A módszerrel nagyszámú minta és nagyszámú elem határozható meg.

Kőolajfeldolgozó és járműforgalommal terhelt területeken termelt tehéntej nehézfém-tartalmának vizsgálata

A TÁMOP-4.2.1/B-09 projekt nyújtott anyagi támogatást ahhoz, hogy különböző hatá-



1. ábra • Cink és réz mennyiségi megoszlása ($\mu\text{g/kg}$) a zöld környezet, az autópálya melletti terület és az ipari körzet tejmintáiban

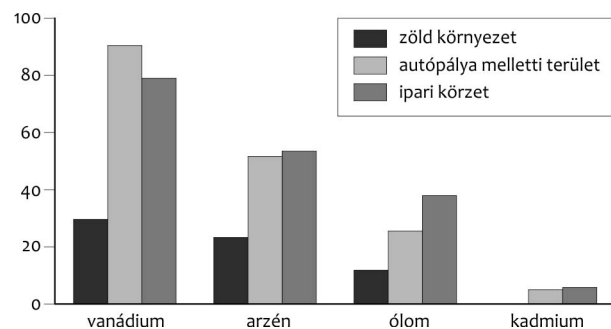
soknak kitett körzetekben termelt takarmánynövények és azokkal takarmányozott tehenek tejében vizsgáljuk a nehézfém-tartalom alakulását. A begyűjtött minták három csoportja, melyeket humán-környezeti hatások alapján választottunk ki, a következők voltak: ipari körzet, forgalmas közlekedési terület környéke és zöld régió. Az ipari körzet mintáit kőolajfeldolgozó közeléből gyűjtöttük. A forgalmas közlekedésnek kitett területek az M6-os és M7-es autópályák mellett található tehenészeti telepek területei voltak. A zöld régió mintái az Őrség, illetve Hetés (Zala megye) vidékéről származtak.

A nehézfémek mennyiségi megoszlásának sorrendje mindhárom vizsgált csoportban a következő volt: cink > réz > vanádium > arzén > ólom > kadmium (Kodrik et al., 2011). Valamennyi minta esetében, a vizsgált elemek közül a cink koncentrációja volt a legnagyobb (1. ábra). Ennek több oka lehet: egyrészt a cink kiürülése a tejjel jelentősnek mondható (Regiusné et al., 1990), másrészt ennek az elemnek a mennyisége a tejben nagyon szoros korrelációt mutat a takarmányban felvett mennyiséggel (Zali – Ganjkanlou, 2009).

Az ipari és a forgalmas közutak környezetében termelt tehéntej ólom-, kadmium- és

arzéntartalma meghaladta a zöld környezetből gyűjtött tejmintákét (2. ábra). Az utóbbi régióban termelt tejmintákban, olyan kis koncentrációjú kadmium volt jelen, hogy azt nem tudtuk kimutatni. Az arzén, hasonlóan az előbbi elemhez, mind az ipari, mind az autópályák körzetében előállított tejben közel azonos mennyiségben volt kimutatható, míg a zöld környezet mintáiban csak közel feleakkora mennyiséget mértünk, mint az előzőekben említett két csoportban. A legnagyobb különbség az ólom esetében mutatkozott, az ipari, majd az autópálya melletti területek mintáiban nagyobb koncentrációkban volt kimutatható. Hasonló megállapításra jutottak külföldi szakemberek is, a járműközlekedésnek kitett területekről származó tej ólomtartalma megváltozott: közel kétszer akkora értéket mutatott, mint a forgalomtól távol eső vidékeken begyűjtött tej esetében (Simsek et al., 2000).

Az ipari környezetben termelt tejben az ólom- és a réz-, míg az autópályák mentén a vanádiumszennyezettség volt kiemelkedőbb a tejmintákban. A krómtartalom mind az ipari, mind az autópályák környezetében nagyobb koncentrációkat mutatott a tejben, mint a zöld környezetből származóak.



2. ábra • Vanádium, arzen, ólom és kadmium mennyiségi megoszlása (µg/kg) a zöld környezet, az autópálya melletti terület és az ipari körzet tejmintáiban

A réz koncentrációja az előző nehézfémekhez képest nagyobb volt valamennyi mintában, egyedül a cinktartalom volt kimutathatóan nagyobb ennél az elemnél. Az ipari körzet mintáiban mértük a legnagyobb értékeket; a zöld régió mintáiban a legkisebbet.

A laktáció előrehaladásával is változhatnak az elemkoncentrációk. Vizsgálatok szerint a tej cink- és réztartalmára is hatással van ez a tényező. Fontos megjegyezni, hogy a tehén egyedi tulajdonságai, az ellés óta eltelt idő, az állatok egészségi állapota, ill. a tejkezelés és -raktározás körülményei is nagy szerepet játszottak az elemek koncentrációjában.

Összefoglalás

A tejben, tejtermékekben előforduló nehézfémek koncentrációja nagy ingadozásokat mutat, amely számos hatással magyarázható. A genetikai tényezőkön kívül a takarmányozás, a takarmányokban és az ivóvízben előforduló elemtartalom, valamint egyéb környezeti tényezők is befolyásoló tényezők (Csapó – Csapóné, 2009).

Modern életvitelünkkel együtt jár, hogy olykor egészségre ártalmas anyagok is bekeverülnek szervezetünkbe a tápláléklánc során. Ugyan a nehézfémek csak kis mennyiségben

juthatnak be étellemmel a szervezetünkbe: a kadmium közel egyharmada származik állati eredetű termékekből, míg az ólomnak nagyjából fele származik ételeinkből (Nasreddine – Parent-Massin, 2002), mégis fejünk felett érezzük Damoklész kardját. Nem meglepő tehát, hogy a nehézfémek monitorozása fontos élelmézés-egészségügyi feladat, melyet számos rendelet szabályoz, illetve ír elő.

A 2009-től alkalmazandó, az élelmiszerekben előforduló egyes szennyező anyagok felső határértékeinek meghatározásáról szóló 629/2008/EK bizottsági rendelet előírja az élelmiszerekben előforduló egyes szennyező anyagok határértékéről, beleértve az ólom, a kadmium és a higany nehézfémekre vonatkozó határértékeket is.

Az ivóvízre vonatkozó elemkoncentrációkat hazánkban a 201/2001.(X.25.) Korm. rendelet, az ivóvíz minőségi követelményeiről és az ellenőrzés rendjéről szabályozza. Az Európai Unió az ivóvízben 10 µg/L arzen, 5 µg/L kadmium, 10 µg/L ólom és 2 mg/L réz mennyiséget tart elfogadhatónak.

A kérődzők takarmányainak egyes nehézfém-tartalma a talajadottságtól függően és a növény fejlődése során is változik. Ugyanakkor az autópályáknál és az ipari területek

közelében termelt, nagyobb vegetációs felületű tömegtakarmányok jobban ki vannak téve a káros anyagok szennyező hatásának, mint a zöld környezetben termeltek.

Köszönetünket fejezzük ki a TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KONV-2010-0003 *Mobilitás és környezet: Járműipari, energetikai és környezeti*

kutatások a Közép- és Nyugat-Dunántúli Régióban projektnek, hogy lehetővé tette a kutatásainkat. A projekt a Magyar Állam és az EU támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Kulcsszavak: *nehézfém, környezetszennyezés, ICP-módszer, tehéntej*

IRODALOM

- Chiara, F. – Beatrice, B. (2008): Validation, Uncertainty Estimation and Application of a Sector Field ICP MS-based Method for As, Cd and Pb in Cow's Milk and Infant Formulas. *Microchimica Acta*. 162, 43–50.
- Csapó J. – Csapóné K. Zs. (2009): A tehéntej táplálkozástudományi szempontból legfontosabb összetevői. II. Laktóz-, ásványianyag- és vitamintartalom. In: Kukovics S. (szerk.): *A tej szerepe a humán táplálkozásban*, Melánia, Budapest
- Jones, F. T. (2007): A Broad View of Arsenic. *Poultry Science*. 86, 1, 2–14.
- Kádár I. (1995): *Környezet- és természetvédelmi kutatások: A talaj-növény-állat-ember tápláléklánc szennyeződése kémiai elemekkel Magyarországon*. A Környezet- és Területfejlesztési Minisztérium és az MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézete kiadványa, Budapest
- Kodrik L. – Wágner L. – Imre K. – Földiné P. K. – Besenyei F. – Husveth F. (2011): The Effect of Highway Traffic on Heavy Metal Content of Cow Milk and Cheese. *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*, 39, 1, 15–19.
- Lippmann, M. (ed.) (2009): *Environmental Toxicants. Human Exposures and Their Health Effects*. 3rd edition. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey
- Nasreddine, L. – Parent-Massin, D. (2002): Food Contamination by Metals and Pesticides in the European Union. Should We Worry? *Toxicology Letters*. 127, 29–41.
- Pais I. (1999): *A mikroelemek jelentősége az életben*. Mezőgazda, Budapest
- Regiusné M. Á. – Anke M. – Groppel B. (1990): A haszonállatok ásványianyag státuszának meghatározása a különböző szervek Zn-, Mn-, Cu-, I-, Se-, Mo-, Cd-, Ni-, Li- és As-tartalma alapján. *Állattenyésztés és takarmányozás*. 39, 1, 85–95.
- Settle, Frank A. (ed.) (1997): *Handbook of Instrumental Techniques for Analytical Chemistry*. Prentice Hall PTR, New Jersey
- Simsek, O. – Gültekin, R. – Öksüz, O. – Kurultay, S. (2000): The Effect of Environmental Pollution on the Heavy Metal Content of Raw Milk. *Nahrung*. 6, 8, 360–363.
- Szabó S. A. – Regiusné M. Á. – Györi D. – Szentmihályi S. (1987): *Mikroelemek a mezőgazdaságban (Esz-szenciális mikroelemek)*. Mezőgazdasági, Budapest
- Zali, A. – Ganjkanlou, M. (2009): Effect of Zinc from Zinc Sulfate on Trace Mineral Concentrations of Milk in Varamini Ewes. *African Journal of Biotechnology*. 8, 22, 6464–6469.

BELSŐÉGÉSŰ MOTOROK ÁRAMLÁSI ÉS ÉGÉSI SZIMULÁCIÓJA

Morauszki Tamás

PhD-hallgató,
Széchenyi István Egyetem

Mándli Péter

egyetemi hallgató,
Széchenyi István Egyetem

Horváth Zoltán

főiskolai tanár, tanszékvezető,
Széchenyi István Egyetem
horvathz@sze.hu

1. Bevezetés: a súrlódási veszteségek csökkentésének szerepe a motorfejlesztésben

Belsőégésű motorok fejlesztése során évtizedek óta fontos feladat a motor súrlódási veszteségének megállapítása és csökkentése. Különleges jelentőséget adnak ezen vizsgálatoknak a drasztikusan szigorodó károsanyag-kibocsátási normák: például 2012-re átlagosan 25%-kal kell a kibocsátott CO₂-mennyiséget csökkenteni a 2007-es évi szinthez képest, és a 2014-re tervezett Euro-6-os szabvány bevezetése még ezen is jelentősen szigorít. Ezek és a vásárlói elvárások miatt szükséges a gépjárművek minél hatékonyabb üzemanyag-felhasználásának kutatása és azok alapján új konstrukciók kialakítása.

Ismert, hogy egy belsőégésű motor hajtotta jármű hatékonyságát csökkentő tényezők közül jelentős a motor súrlódási vesztesége, ami a jármű teljes veszteségeinek akár 10%-a is lehet. Ha ezt a mennyiséget felbontjuk, kiderül, hogy az égéstér érintkező alkatrészeinek, más néven a dugattyúcsoporthoz: a dugattyú–dugattyúgyűrű–hengerfal–hárm-

nak tulajdonítható e veszteség fele. A motor, benne a dugattyúcsoporthoz súrlódási veszteségeinek csökkentésére emiatt minden motorfejlesztő, cég és kutatóintézet egyaránt nagy gondot kell hogy fordítson. A Széchenyi István Egyetemen az Audi Hungária Belsőégésű Motorok Tanszék a dugattyúcsoporthoz súrlódásának és kopásának méréses úton, a Matematika és Számítástudomány Tanszék a súrlódás számítógépes szimulációval való meghatározását kutatja. Utóbbi feladatra létrejött egy végelelemes szimuláción alapuló dinamikai modell, amely valódi 3D-mozgásokat szimulálva ad modellt a dugattyúcsoporthoz súrlódási veszteségeinek meghatározására. A számítógépes modell fejlesztéséhez szükséges a geometriai adatok minél pontosabb figyelembevétele, mivel az égés közben felszabaduló hő hatására keletkező hőtágulás jelentős hatásokat hordoz, a dugattyú felülete és a hengerfal alakja például jelentős változásokat szenved, ami lényeges hatással van az érintkező súrlódó felületek nagyságára.

A dolgozat célja, hogy bemutassa azt a 3D áramlástani számítógépes szimulációs kuta-

tást, amely a dugattyúcsoporthoz égés hatásaként keletkező hőterhelését számítja ki.

Megjegyezzük, hogy az eredményeket a 3D véges elemes modellezés és számítás használja tovább az eszközök hőtágulásának számítására és a súrlódás pontosabb szimulációjára, de ez nem esik jelen cikk tárgykörébe.

2. Áramlási és égési szimulációk a hőterhelés meghatározásához

A súrlódást számos tényező befolyásolja: az érintett alkatrészek geometriája, a felületi érdességi tulajdonságok, kenőolaj jellemzői, terhelés, fordulatszám stb. A modern motorok további optimalizálása így rendkívül összetett feladat, ami aprólékos munkát és párhuzamosan több fizikai jelenség figyelembe vételét követeli meg. A fejlesztés lehetőségének vizsgálatakor szóba jöhető módszereink: tapasztalat, mérés és szimuláció. A tapasztalati értékek és tudás alapján ma már szinte lehetetlen jelentős javulást elérni. Súrlódás mérése a motorban kétféleképpen lehetséges: a könnyebben kivitelezhető, ám pontatlan és nem minden részletre kiterjedő hidegjárátás, vagy a még kísérleti stádiumban levő melegjárátásos súrlódásmérés segítségével.

E két, kevésbé célravezető módszer mellett mára a rohamosan fejlődő számítástudomány lehetővé teszi az egyre komplexebb szimulációs modellek használatát, így lesznek a fejlesztési célok eléréséhez egyre inkább nélkülözhetetlenek a szimulációs elemzések a motorfejlesztés terén is. Ráadásul e szimulációk költséghatékonyan és gyorsan adnak megbízható eredményeket. Távol vagyunk azonban még attól, hogy tipikus mérnöki alkalmazások során a rendszer minden jellemző peremfeltételét megadva egyetlen modell segítségével az összes fontos fizikai mennyiségre értékelhető eredményeket kapjunk.

Az égéstér és dugattyúcsoporthoz vizsgálata során ezért komplex részmodellek láncolata segítségével haladunk. Célunk a rendszer dinamikai és súrlódási tulajdonságainak minél pontosabb meghatározása, majd a rendszer optimalizálása. Ehhez végelelemes dinamikai modell felépítésére van szükség, ami mikrométeres pontossággal veszi figyelembe a geometria jellemzőit, és így a valós gyűrű- és dugattyúmozgást adja meg. Ekkor egy összetett, sebességfüggő súrlódási modell segítségével lehetséges a veszteségek meghatározása.

Előzetes hőtani vizsgálataink azonban az alkatrészek hideg és üzemi hőmérsékletű állapotai közötti jelentős különbségekre hívják fel figyelmünket: az alkatrészek hőtágulása különös figyelmet érdemel, mivel a különböző anyagú (például vas-alumínium) kontaktpárok esetén a felmelegített darabok alakja és viselkedése is eltér a hideg állapottól.

E hatások figyelembevétele miatt hőtani szimulációk előzik meg a dinamikai és súrlódási vizsgálatokat. A hőtani vizsgálatok peremfeltételeinek megadásához viszont szükséges az egyes alkatrészek hőterhelésének meghatározása, ami az égéstérben zajló áramlástani és égési folyamatok vizsgálatát követeli meg.

Látható, hogy pontos eredmények eléréséhez több tudományterület, több szimulációs megoldó együttműködésére van szükség. Jelen esetben az Ansys Fluent szoftver szolgál a dugattyúcsoporthoz levegőterének áramlási és égési folyamatai modellezésének és szimulációs vizsgálatának alapjául. Az így biztosított fali peremfeltételeket később az Abaqus végelelemes megoldó hőtani, dinamikai és súrlódási modelljeiben fogjuk felhasználni.

Megjegyezzük: a szimuláció során a fizikai változók – tömeg, lendület és energia – sűrűségének időbeli változását számoljuk az áramlási tartomány kis részekre („cellákra”) osztá-

sa („hálózás”) után: minden cellában az ott jól közelítő átlagos értéket számolja a szoftver a változóknak megfelelő megmaradási törvényekből, s az ebből rekonstruált pontosabb közelítések adják a szimuláció eredményét.

2.1 Áramlási modell • Közvetlen célunk egy, a belső égésű motor áramlási állapotait időfüggően meghatározó, égési számítást is tartalmazó modell felépítése. Áramló anyagunk egy összenyomható ideális levegőből és üzemanyagból álló keverék lesz, ami a szimuláció végére égéstermékke alakul a kémiai reakcióknak köszönhetően. Az égéstérbe a szívócsövön jutó levegő nagy sebessége miatt mindenképpen szükséges a turbulencia modellezése az áramlási szimuláció során.

2.1.1 Motormodell és geometria • Konkrét megvalósított modellünk egy négyütemű, kétliteres, soros négyhengeres, szívó benzínmotor egy hengerét tartalmazza, azaz a következő alkatrészek által határolt tértartomány: szívócső és kipufogócső, velük együtt 2–2 szívó- és kipufogószelep és az égéstér határfelületei (dugattyú felső felülete, hengerfal, hengerfej egyes felületei).

Az általunk beállított fordulatszám 2000 1/s. Motorunk furata: 90 mm, lökete: 80 mm. Számításunk időtartama: 1 ciklus, vagyis 720° főtengely-szögelfordulás.

2.1.2 Mozgó peremek • A ciklus során lejárolt események behatárolják a diszkrétizált modell szerkezetét: az áramlási tartomány mérete és alakja folyamatosan változik, tehát a klasszikus módon hálózott áramlási modell nem megfelelő. Ezért bonyolult előkészítés során összetett, dinamikusan változó hálót készítettünk, mely időlépésként változó térfogat felbontást biztosít.

Természetesen nem minden perem mozog a modellben. A dugattyú és szelepek viszont előre meghatározott, precízen összehangolt mozgást végeznek, amit a forgattyús hajtómű méretei, szelepnívói görbék és a fordulatszám paraméterei irányítanak. Ezek a motor terhelésétől is függhetnek.

A teljes modellben három típusú térfogati hálót különböztethetünk meg:

- rögzített részek (például a kipufogócső nagy része), melyek nem változnak, és nem mozognak;
- mozgó, de alakjukat nem változtató részek (például szelepszárak mellett);
- deformálódó részek (például szelepek körül): cellák készítése és törlése szükséges (újrahálózás vagy rétegeltetés segítségével).

2.1.3 Szívás • A számítás kezdetén a dugattyú a felső holtponthoz van és a szívó-ütem kezdődik: a szívószelepek nyitnak a szelepnívó

tási görbének megfelelően. A dugattyú lefelé indul, és a kialakult vákuum miatt a szívócsövön levegő áramlik az égéstérbe. A szívócső elején a levegő szabadon tud áramolni, ami egy szívómotor működésének felel meg. Érdekes lenne feltöltött motorok vizsgálata is, ez esetben a bemeneti peremen a feltöltőnek köszönhetően túlnyomással számolhatnánk. A dugattyú tetejének tányérszerű kialakítása segít az örvénylő áramlás kialakításában, ami később a keverékképződés hatását javítja. Szimulációs szempontból kihívás a szelepek melletti nagy sebességű áramlás miatti instabilitás kezelése.

2.1.4 Sűrítés és munkaiütem • 190° fokos elfordulás után a szívószelepek zárnak. A következő két ütem (sűrítés és munka) során levegő nem lép az égéstérbe, és nem is távozik onnan. A levegőáramlást ekkor a dugattyú mozgása és a befecskendezési, keveredési-égési folyamatok befolyásolják. Sűrítés során a térfogat csökkenése, a nagymértékű kompresszió miatt bekövetkezik a levegő sűrűségének és hőmérsékletének növekedése, mintegy előkészítve az elegyet a gyújtásra.

2.1.5 Kipufogás • A kitolási ütemben a kipufogógáz a nyitott kipufogószelepen és kipufogócsövön át a szabadba távozik. Végül ennek az ütemnek a végén véget érnek az előírt események. Természetesen kivitelezhető itt a következő ciklussal való folytatás is, ennek azonban ismét jelentős erőforrásigényre hívnánk fel a figyelmet.

2.2 Égés • Az égés modellezéséhez az Ansys Fluent beépített modelljét használtuk. Ennek alkalmazásakor nagy kihívás volt a szükséges paraméterek meghatározása.

Amint egy égésmódot is beépítünk az áramlási modellbe, az időintervallumot újabb eseményekkel oszthatjuk: a sűrítési ütembe való befecskendezés kezdete és vége.

Felső holtponthoz 5°-kal megtörténik a gyújtás, melyet a rendszerbe a gyertya helyén bevezetett 0,1 J energia jelez, ami elég a keverék meggyújtásához.

Üzemanyagunk indolene-t választottunk, ami szabványosított üzemanyag, és nem tartalmaz adalékokat, ezért ideális vizsgálatokhoz. Moláris tömege megegyezik az oktánnal.

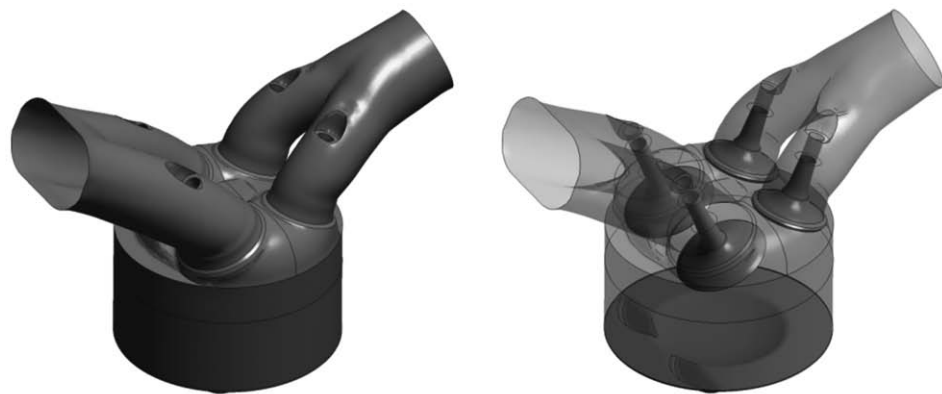
A szimulációs szoftver számolja a lángfront lamináris és turbulens sebességét, az exoterm folyamatból felszabaduló energia mennyiségét. Az áramlási tartomány peremén a hőmérséklet és a hőátadási tényező is meghatározásra kerül, ez a további számítások alapjául szolgálhat.

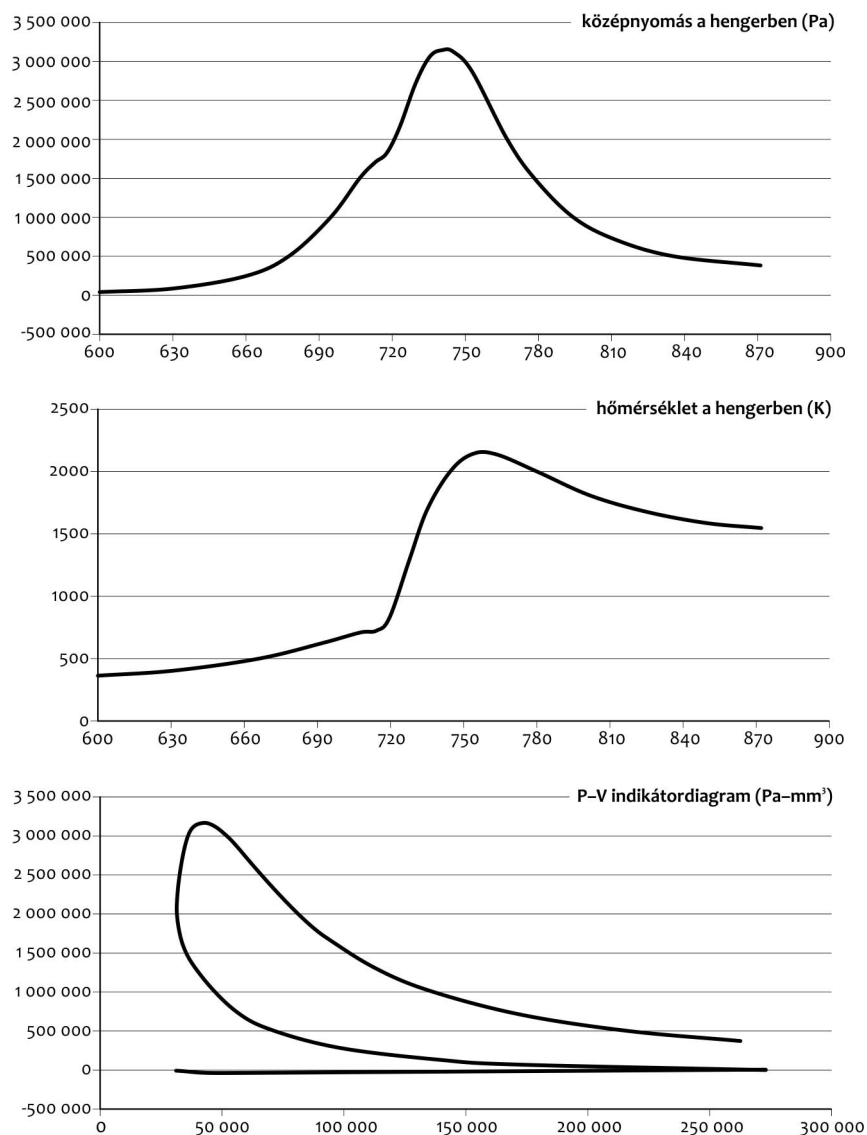
2.3 A szimuláció eredményei

2.3.1 Futási jellemzők • A szimuláció komplexitása miatt jelentős gépigényű, ezért a modell finomságának megválasztásánál kompromisszumra van szükség: a hálóméretet 850 000 tetraéder és hexaéder elemre kellett tartani. Így 16 magon, kb. 100 GB felhasznált memória segítségével mintegy 34 óra alatt lefut egy ciklus. Az eredményfájlok jelentős helyigényűek, kb. 200 GB adattal számolhatunk.

A háló finomítása pontosabb eredményekhez vezethetne. Például ha határrétegeket készítenénk a falak mentén, akkor a fali sebesség-gradiens és turbulenciajelenségek felismerhetőbbek lennének, ezzel javítva az eredmények minőségét. A futásidő miatt korlátozottak a finomítási lehetőségek.

2.3.2 Számítási eredmények • Időfüggő számítást végeztünk, ezért a hőmérséklet, nyomás, üzemanyag koncentrációjának időbeli lefutását is követni tudjuk. Számítási eredményeink szerint a középnomás tetőpontja kb. 32 bar, ami összhangban van az elméletből várt adatokkal.



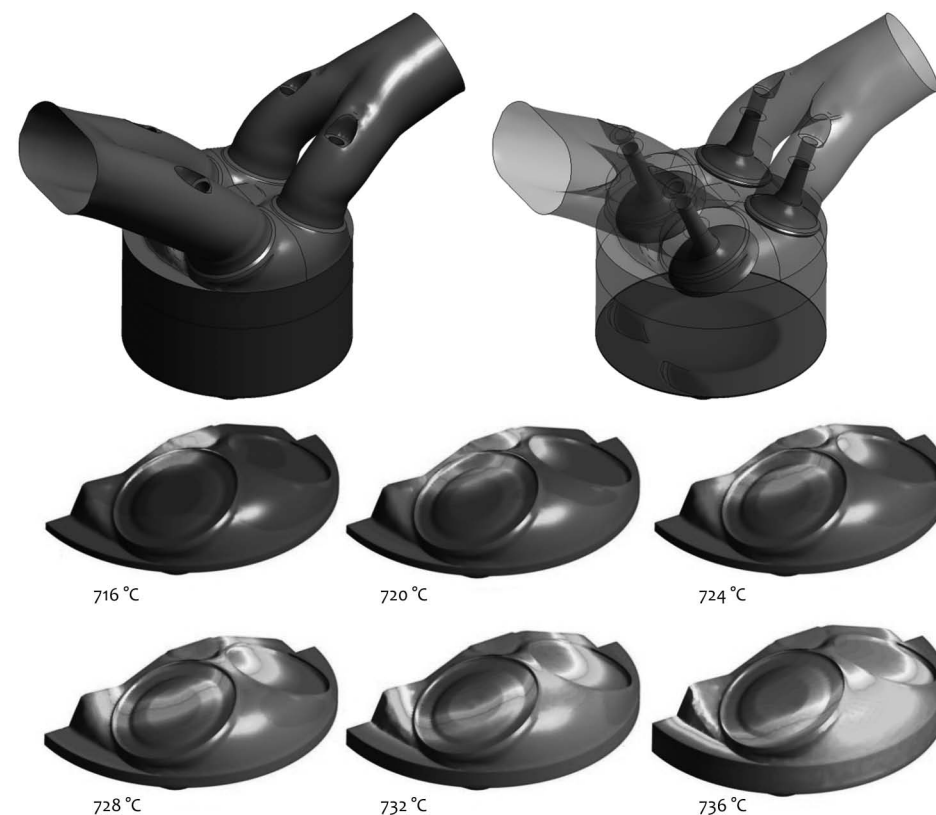


3. Összefoglalás

A kifejlesztett szimulációs modell az égéstérben lejároló áramlási és égési folyamatok számítására szolgál. Eredményeink önmagukban is érdekes információval szolgálnak, ezenkívül peremfeltételként (fali hőmérsékletek és hőátadási tényezők formájában) átvihetők és

felhasználhatóak a határoló alkatrészek véges elemes hőtani és hőátadási elemzéseikhez.

Az ilyen módon számolt felmelegített alkatrészek dinamikai és sűrűlási szimulációkban való felhasználása jelentős lépés lehet a motor sűrűlási veszteségeinek előrejelzésében és hosszabb távon hatékony optimalizálási módszerrel szolgálhat.



Hőmérséklet-eloszlás az égéstérben az égés különböző fázisaiban

Kulcsszavak: számítógépes áramlástan (CFD), számítógépes szimulációk, belső égésű motorok, égés

IRODALOM

- Ansyes Fluent: <http://www.ansyes.com/>
 Heywood, J. B. (1988): *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill.
 Hohler Zs. – Morauszki T. – Dreyer, M. R. (2011): Hőterjedés és hőátadás szimulációja a motorblokkban. In: Csibi V.-J. (szerk.): *OGÉT 2011 – a XIX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó Konferencia Kiadványa*. Csíksomlyó, 2011. 04. 28–2011. 05. 01. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság
 Morauszki T. – Mándli P. – Horváth Z. – Dreyer, M. R. (2011): Simulation of Fluid Flow, Combustion and Heat Transfer Process in Internal Combustion Engines. *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*, 39, 1, 27–31. • http://konyvtar.uni-pannon.hu/hjic/HJIC39_027_030.pdf
 Tóth A. – Morauszki T. – Dreyer, M. R. (2011): Áram-

lás és hőátadás szimulációja az égéstérben. n: Csibi V.-J. (szerk.): *OGÉT 2011 – a XIX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó Konferencia Kiadványa*. Csíksomlyó, 2011. 04. 28–2011. 05. 01. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság
 Morauszki T. – Mándli P. – Horváth Z. – Dreyer, M. R. (2011): Simulation of Fluid Flow, Combustion and Heat Transfer Process in Internal Combustion Engines. *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*, 39, 1, 27–31. • http://konyvtar.uni-pannon.hu/hjic/HJIC39_027_030.pdf

KUTATÁS A FENNTARTHATÓ JÁRMŰHAJTÁSÉRT – CÉL: A JÖVŐ VILLAMOS ENERGIÁN ALAPULÓ KÖZLEKEDÉSE

Varga Zoltán

PhD, Széchenyi István Egyetem
Közúti és Vasúti Járművek tanszék, Győr
vargaz@sze.hu

Lassan kezdjük az új korszakot, főleg a türelmetlen várakozás és életünk kedvezőtlen folyamatai miatt. Zsúfolttá vált a Föld, sok embert kell eltartania egyre növekvő igényekkel. A mobilitásnak mint a korunkban felvett általános emberi jognak a világ egész lakosságára való kiterjesztése az egyik aktuális folyamat. A konzervatív érdekvégyesítők szerint van elegendő energiaforrás, és a szennyezés a technika fejlesztésével kordában tartható. A növekedés eddigi logikája alapján a most motorizált világ nagyobb, gyorsabb, kényelmesebb és több járművet igényel, az eddigi gyalogosok pedig legalább a mostani jólétet szeretnék elérni. Szép és nemes célok hatalmas ipari, technikai, tudományos kapacitás kiépítését, kiterjesztését igénylik, eddig szegénységben élő népcsoportok emelkednek az idealizált szintekre. Vannak bizonyos korlátok: a jelenleg használt energiaforrások beszükülnek, az igényelt mennyiségben nehezebben hozzáférhetők, a nyersanyagok egyes fajtái átalakulnak, és újrahasznosításuk nagy ráfordítást igényel, az életfeltételek alapjait biztosító alaprendszerek: a víz, levegő, termő-

föld szennyeződik, felhasználható mennyisége csökken, a közlekedés számára igényelt hely egyre nő, és ezzel csökken az élethez szükséges tér. A korlátok kiterjesztése is nagyrészt tudományos technikai feladat, de természetesen a politika is jelentős szerepet játszik alakulásukban.

Kutatásaink a jövő lehetséges irányainak számbavételén alapulnak, és a fenti globális problémák egy vékony szeletével: a villamos hajtások közlekedésben való alkalmazásával foglalkoznak.

A villamos energia lehetőségei a közlekedésben; trendek, elektromos közlekedési eszközök

A villamosság mint energiahordozó a kőolaj-korszak kezdetén együtt indult a fosszilis anyagokkal. Az első jármű, amelyik túllépte a 100 km/h sebességet, egy elektromos versenyautó volt. A kőolajszármazékok nagyobb energiasűrűsége azonban a villamos hajtás közúti közlekedésben való felhasználását szinte teljesen eltűntette, és győzött a belsőégésű motor. Erre alapozottan alakult ki a mai közúti közlekedés modern rendszere, melyben

jelenleg több mint egymilliárd autó közlekedik. A növekedés pedig folytatódik, Kínában egy év alatt 27%-kal nőtt az autók száma, 2010-ben 27 millió darabra. Az autók átlagos tömege 800 kg körülire becsülhető, tehát a közlekedő autókban felhalmozott értékes anyag mennyisége a gyártásukhoz szükséges anyagmennyiséggel együtt kb. egymilliárd tonna. Az igények és előrejelzések alapján ha a kínaiak és az indiaiak is szeretnék elérni az észak-amerikaiak motorizáltságát, akkor ez a szám hamarosan duplázódik. Ehhez természetesen gyártókapacitás épül ki, az előállítás energiát igényel és szennyezést okoz.

A jelenlegi közlekedés autós szektorának energiaigénye Magyarországon a benzin tüzelőanyag vásárlása alapján közelíthető. 2010-ben 1,368 milliárd liter benzin és 1,591 milliárd liter gázolaj fogyott a közlekedésben, amelyből 82% jutott a közúti közlekedésre (forrás: MÁSZ/hvg, 2010 3). Az áruszállítás ebből 12%, a tömegközlekedés (autóbusz) pedig 6%. A személygépkocsi-közlekedés éves energiaigénye tehát 2010-ben 22 559,15 GWh volt, s ennek kb. fele fogyott el napi 40 km-nél rövidebb távolságok megtételére. A paksi erőmű 2011-ben 15 685 GWh energiát termelt, ami a Magyarországon előállított villamosenergia 43,25%-a (URL1) volt.

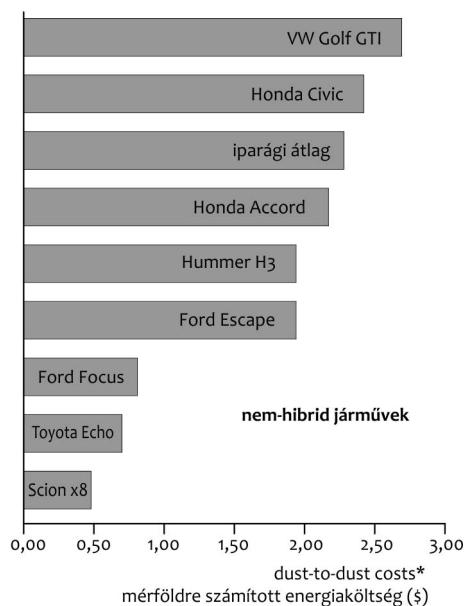
A belsőégésű motoros autókkal való közlekedés energetikai hatékonysága rosszabb, mint a villamos járművéké. Két Citroënt, a dízel C3-ast és a villamos hajtású C-Zerót (mindkettőnek van személy- és haszonjármű változata is) összehasonlítva: 3,6 liter gázolajból, azaz 137 MJ-ból képes megtenni 100 km-t a C3-as, erre a feladatra a C-Zero mindössze 45 MJ felhasználását igényli (URL2). A villamosenergia eljuttatása a fogyasztóhoz viszont hatékonyságrontó a villanyautóknál, a veszteség kb. 10%.

A fentiek alapján: ha a teljes autós közlekedést villamossá szeretnénk tenni a maihoz hasonló közlekedés viszonyok mellett, akkor az autózásra fordított energia a paksi erőmű csaknem fél évi működtetésével lenne megtermelhető, azaz a teljes magyar villamosenergia-fogyasztás 25%-át kellene erre fordítani. Természetesen ekkora villamosenergia-kapacitás nem áll rendelkezésre, és a közeljövőben sem számíthatunk erre, legfeljebb fokozatos kiépítésre. Tehát a leghatékonyabb, ún. *plug in*, konnektorból táplálkozó közlekedés a mai járművek szintjén nehezen, vagy inkább egyáltalán nem valósítható meg. Kötési lehetőség azonban van: a minimális energiaigényű járművek fokozottabb felhasználása és villamosítása. Amennyiben a városi közlekedést, amelynél a megtett napi kilométer viszonylag kevés, szeretnénk villamos járművekkel kiváltani, sokkal reménytelibb megoldás kínálkozik. Ezeknél az utazásoknál nem a lassan harci járművé fajuló városi terepjárókat kellene használni, hanem a kis helyigényű, kis tömegű és nagyon energiahatékony villamos kerékpárokat, robogókat vagy az ezekből származtatható egyszerű, de mindenki számára elérhető és használható járműveket. Egy ilyen jármű külső villamosenergia felhasználása napi átlagosan 20 km-es utakra 200 és 4000 Wh között van. Ha az év 270 munkanapján használjuk, akkor a teljes energiamennyiség egy járműre 54–1080 kWh között van. Hárommillió jármű esetén 154–3240 GWh lenne az évi villamosenergia-szükséglet, ami a jelenlegi hazai villamosenergia-termelés 0,4–8,9%-a között van. Az energetikai hatékonyság szempontjából elfogadható villamos jármű nem az eddig megszokott autó, hanem egy kisebb tömegű, kisebb sebességű, kisebb helyigényű, kevesebb komforttal rendelkező egy- vagy kétszemélyes közlekedési eszköz.

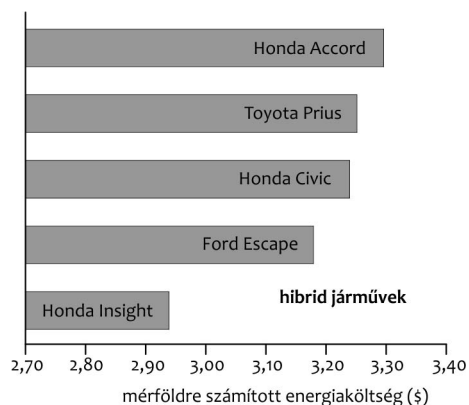
A fentebb vázolt, második járműként használható eszközök akkumulátorainak töltése a jelenlegi hálózatról, akár a lakóházak, lakások saját vagy erre a célra létesített, egyedi- leg is mérhető töltő csatlakozóiról is megoldható, különösebben nagy beruházások nélkül.

Az ilyen járművek természetesen számos egyéb kedvező tulajdonsággal is rendelkeznek, amelyek mindegyike a fenntartható emberi élet irányába mutat.

A jelenlegi autóformák fenntartására törekvő járműfajták a tisztán villamos hajtású hagyományos felépítésű és a hibrid személygépkocsik, illetve haszonjárművek. Ezek közül a nem *plug in* üzemmódban használt hibridek elterjesztése nagyobb jelentőségű, mivel ezek a belsőégésű motorok nagyon rossz hatékonyságú üzemszakaszait helyettesítik rövid



1. ábra • Energiaköltségek a jármű születésétől haláláig nem hibrid járműveknél (* *dust-to-dust costs*: „portól porig”; a tervezéstől az újrafeldolgozásig ráfordított teljes energiatartalom)



2. ábra • Energiaköltségek a jármű születésétől haláláig hibrid járműveknél

ideig tartó villamos hajtással. Viszonylag egyszerű építésmód, kevés tömegnövekedés és kis villamos hatótávolság jellemzi ezeket a járműveket. Az ilyen járművek növelik a belsőégésű motoros hajtás energiatartalmát, de nagy áttörést a villamos motorizáció irányában nem jelentenek. A plug in hibridekről mindez nem mondható el. A használatban lévő nagy villamos hatótávolságú hibridek ráfordításai hosszú távon nem tarthatók, a hagyományos autókhoz jóval nagyobbak. Erre utal az alábbi két ábrán látható felmérés eredménye, amelyekben a legnagyobb energiaráfordítású hagyományos belsőégésű motorral ellátott jármű teljes energiatartalma kisebb, mint a legjobb hibridautóé.

A haszonjárművek nagy kihívást jelentenek a villamos motorizáció szempontjából, mivel mind beruházási, mind pedig üzemeltetési tökélgényük magas. Az áru fuvarozás profitorientált ágazat, és nem rendelkezik azokkal az emocionális vonásokkal, mint a személygépkocsi-közlekedés, ezért politikai ráhatás nélkül a haszonjármű energetikai és járműstruktúra csak nagyon lassan fog változni. Részterületeken lehet megoldásokat ke-

resni, bizonyos helyi, főleg környezetvédelmi megfontolásokról, amelyek főként hibrid rendszereket jelenthetnek kisebb méretű autóbuszoknál és tehergépkocsiknál. Mivel a járművek megtérülési idejének kicsinek kell lennie, csak nagy hatótávolságú, állandóan üzemeltethető járművekről lehet szó, amelyek nagyon nagy villamosenergia-tárolókapacitást igényelnek. Mind a nagy tömegű akkumulátorok, mind pedig a hibrid rendszer további villamos elemei a hasznos tömeg csökkentését eredményezik, tehát a felhasználást erősen korlátozzák. Ilyen járműveket csak adott célra, adott forgalmi, szállítási és domborzati viszonyokra szabad szinte egyedileg tervezni, ami az egyébként is jelentős költségeket tovább növeli.

Jelentős beruházást igényel a nagy járművek töltési hálózatának kiépítése és az adott területen rendszertelenül jelentkező nagy áramú villamosenergia-igény is.

A villamos energián alapuló közlekedés egyik hozadéka lehet a hatékonyabb villamosenergia-menedzsment, amit a rendszerbe állított akkumulátorok jótékony hatása eredményezhet. A kis energiájú járművek tárolókapacitása járművenként 800–4000 kWh, a tárolókat két-három naponta kell tölteni, leginkább az éjszakai órákban. Ez a kis teljesítményű járművek tömeges elterjedése esetén jelent olyan kapacitást, amely a rugalmatlan erőműszerkezet egyenlőtlen terhelési problémáit ellensúlyozhatja.

Összefoglalásként tehát a fenntartható közlekedésre való átváltáshoz nem a mai járművekhez hasonló villamos közlekedési eszközökre, hanem rövid távolságra használható, kisméretű és -tömegű villamos hajtású járműparkra volna szükség, amelyet a jelenlegi villamos rendszer kis ráfordítással is ki tudna szolgálni. A plug-in hibridek csak korlátozott

számban létjogosultak, és speciális esetekben lehet autóbuszok, illetve teherautók villamos hibrid változatait a mindennapi közlekedésben felhasználni.

A minimális hajtási energiaigényű járművek létjogosultsága

Az energetikai fejezetben található számok alapján levont következtetés: ha a Föld minden lakosára szeretnénk kiterjeszteni a mai fejlett országok polgáraihoz hasonló egyéni mobilitás jogát, lehetőségét, akkor ez a jelenlegi járművekkel sem energetikai, sem pedig a nyersanyagok szempontjából nem valósítható meg. Még inkább nyilvánvalóvá válik ez, ha a világ fejlődésének további trendjeit is figyelembe vesszük. A mostani járművek gyártása is jelentős energiát, nyersanyagmennyiséget és szellemi, fizikai munkát köt le. Mind a gyártás, mind a járművek használata hatalmas területet foglal el, ami által csökken az élőlények által belakható terület, az élelmiszer- és ivóvízbázis. A nagyvárosok száma, mérete egyre nő, az itteni helyszükséglet nagymértékben a járművek méretei, fajtái, sebessége határozza meg. A Föld szennyezése olyan méreteket ölt, amely az életet fenntartó egyensúlyi állapot összeomlásához vezet. Ezek az irányzatok annyiban érintik a felvetett tématerületet, amennyiben hatással vannak a jelenlegi és a jövőben használatos járművek konstrukciós, energetikai és egyéb járműtechnikai vonatkozásaira. Tehát járműveinknek tekintettel kell lenniük a helyszükségre és a környezet terhelésére is.

A nagyvárosi forgalom átlagsebessége 10–20 km/ó között mozog, a legnagyobb sebességcsúcsok 50 vagy 70 km/ó nagyságúak. Az ehhez a sebességhez szükséges teljesítmény egy jó alaktényezővel és kis homlokfelülettel rendelkező, de még kényelmesen hasz-

	szélesség	magasság	hossz	alapterület	térfogat	tömeg	férőhely	terület/férőhely
összezsukható kerékpár	0,250	0,680	0,750	0,170	0,030	15	1	0,17
kerékpár	0,5	1,000	2,000	1,000	2,000	17	1	1
fekvőkerékpár	0,6	0,850	2,300	1,380	2,698	35	1	1,38
pedelec* kerékpár	0,5	1,000	2,000	1,000	2,000	28	1	1
kétszemélyes kerékpár	0,55	1,000	3,000	1,650	4,950	30	2	0,825
robogó	0,700	1,100	1,900	1,330	2,779	90	1	1,33
fedett robogó	0,700	1,770	2,000	1,400	4,956	160	1	1,4
motorkerékpár	1,000	1,000	2,800	2,800	9,408	210	2	1,4
zárt motorkerékpár	1,000	1,000	3,000	3,000	14,850	260	2	1,5
kis személygépkocsi	1,500	1,500	3,370	5,055	24,190	735	5	1,011
átlagos személygépkocsi	1,759	1,759	4,204	7,394	50,393	1280	5	1,478
pickup	1,800	1,800	5,530	9,954	97,4305	1097	5	1,990
városi autóbusz	2,500	2,500	11,00	27,5	834,9	9800	100	0,275
csuklós autóbusz	2,500	2,500	17,27	43,175	2057,94	11900	150	0,287
távolsági autóbusz	2,500	2,500	11,00	27,5	834,9	10800	45	0,610

1. táblázat • Tipikus járműméretek üresen, tárolási és parkolási helyszükséglet
(* – pedelec: elektromos rásegítéses kerékpár)

nálható járműnél 200–4000 W közötti. A városi közlekedés dinamikájához szükséges gyorsulás a járművek tömegének minimalizálásával érhető el, és versenyképesnek kell lennie a jelenlegi átlagos személygépkocsi gyorsító képességével. A tömeg csökkentése nemcsak a jármű kisebb méretei miatt lehetséges, hanem a rövid távú közlekedés alacsonyabb komfortigényei, valamint a kisebb sebességgel járó kisebb passzív biztonságigény miatt is. A kisebb járművek aktív biztonsági mutatói (fékezhetőség, kormányozhatóság, manőverező képesség) eredendően jobbak, mint nagyobb tömegű társaiké, passzív biztonságuk csökkenése az aktív

biztonság további növelésével ellensúlyozható. Nagy lehetőség és kihívás a kutatás-fejlesztés számára a kis járművek intelligenciájának kiépítése, növelése, a járművek közötti kommunikáció és egymásra hatás megteremtésével növelni ezek aktív biztonságát.

Közüti járművek helyszükséglete tárolásnál, parkolásnál, más járművel való szállításnál és a közlekedésben

A fenti és a következő táblázatok egyszerűsített, statikus felmérés alapján számított adatai szerint mind a parkolás, mind pedig a forgalmi helykihasználás szempontjából legelőnyösebbek az autóbuszok, és a jelenleg marginális

	szélesség (m)	hossz (m)	terület (m ²)	férőhely (m ²)	terület / férőhely (m ²)	átlagos férőhely (m ²)	terület / átlagos férőhely (m ²)
összezsukható kerékpár	0,900	3,000	2,7	1	2,700	1	2,700
kerékpár	0,900	3,000	2,7	1	2,700	1	2,700
fekvőkerékpár	1,00	3,3	3,3	1	3,300	1	3,300
pedelec kerékpár	0,900	3,000	2,7	1	2,700	1	2,700
kétszemélyes kerékpár	1,00	3,100	3,1	2	1,550	2	0,852
robogó	1,200	3,800	4,56	1	4,560	1	4,560
fedett robogó	1,300	4,000	5,2	1	5,200	1	5,200
motorkerékpár	1,400	4,300	6,02	2	3,010	1,05	5,700
zárt motorkerékpár	1,500	4,900	7,35	2	3,675	1,01	7,270
kis személygépkocsi	1,900	5,500	10,45	5	2,090	1,2	8,708
átlagos személygépkocsi	2,000	6,400	12,8	5	2,560	1,2	10,666
pickup	2,500	7,700	19,25	5	3,850	1,2	16,041
városi autóbusz	3,000	13,00	39	100	0,390	64	0,609
csuklós autóbusz	2,500	19,10	47,75	150	0,378	89	0,536
távolsági autóbusz	3,000	13,00	39	45	0,870	39	1

2. táblázat • Helyszükséglet a forgalomban, átlagos 15 km/h átlagos sebességnél

kétszemélyes (tandem, vagy gyermekét szállító szülő) kerékpár. Dinamizált vizsgálat (amely nem volt a kutatás célja) esetén az autóbuszok rugalmatlansága és nagy áteresztőképessége, míg a kerékpár és egynyomú járművek nagymértékű rugalmassága, szervezhetősége és alacsony beruházási, valamint üzemeltetési költsége domborodik ki.

A nyertesek tábora tehát a motorizált közúti közlekedésben: az autóbuszok és a villamos hajtású/rásegítésű kerékpár jellegű kétszemélyes járművek. Vesztes pedig a jelenlegi

közlekedési eszközpark, ami annyit jelent, hogy *nagy ráfordítással (beruházás, energia, útfelület, parkoló- és tárolóhely), illetve környezetrombolás árán tartjuk fenn jelenlegi mobilitásunkat.*

Az energetikai, az anyagigény és a helyfoglalás előnyös tulajdonságai mellett a minimális hajtásigényű járművek életciklus-problémái sem annyira súlyosak, mint a jelenlegi autóknál tapasztalni lehet. A kisebb tömeg egyértelműen kisebb újrafeldolgozási problémákat jelent, de a felhasznált anyagok fajtái-

nak száma is jóval kevesebb egy ilyen járműnél. A villamos hajtáshoz szükséges akkumulátorok és elektronikus rendszerek újrahasznosítása egyébként is megoldandó feladat, hiszen más rendszerek is használnak ilyeneket.

Mivel a minimális energiaigény mellett a járművek alapterület-igénye kb. 2 m², van értelme fedélzeti napelem használatának a jármű hajtásához. Egy ekkora napelem várható napi energiatermelése hazánkban 980 Wh, ami egy pedelec három-négy órás ráségítő energiája (győri besugárzás 1200 kWh/m²/év, napelemes töltés-kisütés hatásfoka 15%).

Amennyiben gyors megoldást akarunk találni a jelenlegi motorizáció problémáinak megoldására, akkor a minimális hajtásigényű járművek tömeges elterjesztése ezt lehetővé teszi, mert egy ilyen jármű:

- a városi közlekedés igényeit kielégíti,
- energia és anyagfelhasználása kicsi,
- értelmes lehetőséget ad napelem használatára,
- kevés helyet igényel a közlekedésben, parkolásnál, tárolásnál,
- veszélyessége az idegen járművekre kicsi, aktív biztonsága növelhető,
- környezetbarát az üzemeltetése és az újra-feldolgozhatósága.

A fenti előnyökkel szembeállítható hátrányai:

- felhasználhatósága korlátozott,
- sebessége kisebb,
- kevesebb komforttal rendelkezik.

A minimális hajtási energiájú járművek a jelenlegi járműpark kiegészítő állományaként is létjogosultak, hiszen csak egy bizonyos körben a városi, illetve az elővárosi közlekedésben lehetne ezeket tömegesen felhasználni. Tárolásuk megoldható, beruházásuk az üzemeltetési költségekből gyorsan megtérül. A gyártók számára jelentős kapacitásbővítést és fejlesztést jelentenének, amennyiben tömeges igény

mutatkozik irántuk. A jelenlegi individuális eszközök mellett nevezhetjük őket második járműnek.

A minimális hajtásienergia-igényű járművek jellemzői

Az eddigiekben ezeknek a járműveknek a környezeti követelményeit vettük sorba, amelyek alapján a jármű alajellemzői kialakíthatók. A járművet jellemző mennyiségek egy általánosított típusra a már sorozatban készült, nagy tömegben használt eszközökből származtathatók. A legegyszerűbb motorizált közúti közlekedési eszköz a pedelec szabványt kielégítő kerékpár. Ez a jármű a jelenlegi közlekedésdinamikába egyre inkább csak mint elkülönített eszköz jön szóba, igyekeznek a gyorsabb, nagyobb gyorsulású járművek forgalmából kizárni. Tehát univerzális gépkocsi-helyettesítőként csak zárt vagy félig zárt rendszerekben terjedhet el tömegesen.

A jelenleg gyártottak közül a városi közlekedés mai dinamikájához optimálisnak tekinthető jármű a fedett robogó, illetve motor-kerékpár, 4 kW teljesítményű villamos hajtással, legalább 50 km hatótávolsággal. Az egynyomú jármű saját tömege 120 kg, végsebessége 70 km/h. Ez a jármű a fenti megfontolások mindegyikét pozitívan teljesíti, de az alkalmazási célterület változtatásával az elektromos kerékpár, illetve nagyobb teljesítményű villamos hajtású motorkerékpár kategóriák irányába fejleszthető.

Az összehasonlító táblázatban a fajlagos, egységnyi tömegre jutó teljesítmény, a motorizáltság foka mutatja a városi közlekedésben használható járművek közötti értelmetlenül nagy különbségeket. A lomhának érzett csuklós autóbusz és a furge segédmotoros kerékpár között az eltérés kétszeres. A motor-kerékpárok csaknem négyszeres dinamikus

	saját tömeg (kg)	férőhely (fő)	max. teljesítmény (W)	max. sebesség (km/ó)	max. teljesítmény / tömeg (W/kg)	hatótávolság (km)
összecukható pedelec kerékpár	25	1	200	20	2,15	50
pedelec kerékpár	30	1	200	25	2,04	80
fekvő pedelec kerékpár	42	1	200	25	1,82	100
kétszemélyes pedelec kerékpár	50	2	200	25	1,08	150
fedett kétszemélyes pedelec kerékpár	80	2	200	25	0,93	150
villamos segédmotoros kerékpár	45	1	4000	45	24,54	50
villamos fedett segédmotoros kerékpár	110	1	4000	45	22,47	50
villamos zárt segédmotoros kerékpár	210	1	4000	45	14,39	50
villamos hajtású motorkerékpár	220	2	>15 000	210	42,13	60
villamos hajtású fedett motorkerékpár	180	2	11 000	110	34,81	60
villamos, zárt, négykerekű motorkerékpár	300	2	15 000	130	34,40	100
villamos, zárt, kétkerekű motorkerékpár	260	2	>15 000	260	37,88	100
kis személygépkocsi	735	5	40 000	145	37,21	600
átlagos személygépkocsi	1280	5	65 000	155	40,12	600
pickup	1097	5	95 000	140	66,11	800
városi autóbusz	9800	100	2 400 000	70	14,46	200
csuklós autóbusz	11 900	150	2 600 000	70	11,76	170
távolsági autóbusz	10 800	45	2 800 000	100	20,20	800

3. táblázat • Járművek összehasonlítása hajtásdinamika és teljesítmény alapján

sága, mint azt a gyakorlat is mutatja már veszélyt jelent. Egy erre irányuló kutatás célja lehet a motorizáltság értelmes határának megadása egy városi közlekedési környezetben.

A minimális hajtásienergia-igényű járművek létező megjelenési formái

A legkisebb, már közlekedési célra felhasználható motorizált jármű a pedelec irányelveket (a *pedelec* szó a *pedal electric cycle* szavak összevonásából alakult ki, lényege, hogy a pedelec

elektromos rendszer csak akkor segít hajtani, ha a pedált forgatjuk [Richtlinie, 2002]) kielégítő villamos ráségítésű kerékpár. Ez a jármű egy kényelmes kerékpár, amely villamos ráségítéssel rendelkezik. (A ráségítés korábbi 250 W teljesítménykorlátját az Európai Parlament 2012-ben szándékozik feloldani). A ráségítés vagy a pedálforgatás hatására, vagy pedig a pedálynomaték-növekedés miatt következik be, és csak bizonyos sebességig (ált. 25 km/ó) marad fenn. A villamos rendszer

általánosan elterjedt elemei: állandó mágneses háromfázisú szinkronmotor, motormeghajtó szabályzó erősítő, pedálforgás, illetve -nyomaték-jeladó, kezelő szervek: ráségítés fokozatkapcsoló és fékkarok mikrokapcsolóval. A pedálforgatást, illetve nyomatékot érzékelő rendszer irányítástechnikai szempontból különbözik: a pedálforgatást érzékelő berendezéseknél egy-két folytonos pedálfordulás hatására a ráségítés megkezdődhet, és a beállított fokozatnak megfelelő sebességig az erősítő áramkorlátljának megfelelő áramerősséggel forgatja a ráségítő villamos motort. A sebesség-határon belül a kerékpáros a pedál forgatásával növeli a sebességet, segíti a határsebesség elérését. A határsebességen túl a rendszer nem segít rá, a nagyobb sebességet csak a kerékpáros energiájával lehet növelni és megtartani. A pedálynomatékot érzékelő rendszerrel a fokozatkapcsolóval a kerékpáros az általa kifejtett nyomatékszükséglet mértékét állítja be, és a ráségítő nyomaték követi a kerékpáros hajtónyomatékát egészen a beállított értékig. Amennyiben a beállított értéknél nagyobb nyomatékra van szükség, akkor azt a kerékpárosnak kell kifejeznie.

A forgalomban lévő pedelec rendszerek motorelrendezése három változatban terjedt el: a hátsó vagy az első kerékagiban, illetve a pedálnál. A kerékagymotorok lehetnek közvetlen meghajtásúak, ill. hajtóműves megoldásúak. A pedálráségítők (PAS) minden esetben hajtóművel rendelkeznek.

A közvetlen meghajtású motorok jobb hatásfokúak, de tömegük általában nagyobb, mint a hajtóműves kiviteleké. Nagy különbség a hajtóműves és hajtómű nélküli változatoknál, hogy az előbbieknél villamos fékezésre jelenleg még nincs még elvi lehetőség sem.

A motorok szabályzó meghajtó egysége vagy PWM- (négyzögimpulzus) vagy szinu-

szos jelformával dolgozó háromfázisú inverter, amely viszonylag kis fordulatszám-tartományban tudja a motort működtető háromfázisú forgó mágneses teret létrehozni periodikus áramot az akkumulátor egyenfeszültségű tápegysége segítségével előállítani. A szabályzó egységgel integrált elektronikus erősítő (teljesítményfokozat) hozza létre azt a hajtáshoz szükséges nagy áramerősséget, amely a motornyomatékot eredményezi. A szabályzó egység jeladó: a motorban elhelyezett HAL-szenzorok, amelyek a motortengely szöghelyzetét mérik, a pedálforgás, illetve -nyomaték-szenzor, a fékkarok mikrokapcsolói.

A ráségítéshez szükséges villamos energiát akkumulátorokban tároljuk a kerékpáron. Az alkalmazott akkumulátorok ólom, lítium alapanyagúak. Mindkét alapanyag jelentős mértékben elterjedt, és alapvetően beszerzési árak határozza meg, melyik járműbe kerülnek. Kapacitásuk és feszültségük határozza meg energiatároló képességüket. Az elterjedt rendszerek általában 24–48 V-os névleges feszültséggel és 6–18 Ah kapacitással rendelkeznek, ami egy pedelec kerékpár számára 20–120 km ráségítéssel rendelkező hatótávolságot jelent kényelemtől, domborzati viszonyoktól, forgalomtól függően.

A legnagyobb példányszámban üzemelő, minimális hajtásienergia-igényű villamos járművek a segédmotoros kerékpárok kategóriájában terjedtek el. Ezeknél a nagyobb hajtóteljesítmény (4 kW), nagyobb sebesség (45 km/ó), a motoros és pedálhajtás függetlensége a jellemző. Ez a járműtípus belsőégésű motoros változataival integráns része a közúti forgalomnak, nagy dinamikája és jó manőverező képessége, kis tároló, parkoló és forgalmi helyszükséglete ideális városi járművé teszi. Hátránya a kisebb komfort és a szükséges vezetési képességek, a veszélyérzet.

Elvi felépítésükben különböznek a pedelec járművektől. Mivel nem szükségességes a pedálozás, a szabályzás már nem ráségítés célú. A villamos motor általában hajtómű nélküli, közvetlen meghajtású, állandó mágneses szinkronmotor, szinte kizárólag a hátsó tengelyre építve. A motorszabályzás a meghajtó erősítőn keresztül a szabályzás áramkorlátljának változtatásával történik, amelyet a hagyományos gázforgattyúval vezérelt jeladó (HAL-vagy potenciométer) vezérel. Annak ellenére, hogy a motorok közvetlen meghajtásúak, a segédmotoros kerékpároknál is csak nagyon ritka esetekben alkalmaznak rekuperációs fékezési lehetőséget.

Energiatároló egységeik alapvetően megegyeznek a kerékpároknál használtakkal, a nagyobb teljesítményigény azonban növelt kapacitás igényel, és ezzel nagyobb tömeget is jelent.

Bár a segédmotoros kerékpárok a gyakorlatban nem akadályozzák a gépkocsikra alapozott közlekedést, ez csak annak köszönhető, hogy valós paramétereik már nem ebbe a járműkategóriába tartoznak. Járműdinamikailag valóban a gépkocsival versenyképes járműkategória a motorkerékpár, amelynek kisebb változata (L7e) is teljesen megfelelő a városi, elővárosi közlekedésre. Ez a járműfajta kevésbé elterjedt, mert a jogi szabályzás nem tette lehetővé ennek a járműnek a vezetését személygépkocsi vezetői engedéllyel (ez hamarosan feloldódik). Ez a jármű kialakítható két, három és négy kerékkel, két személy szállítható vele, és haszonjármű formában is építhető. Tehát ideális kiindulási alap lehet a jövő kis energiaigényű közlekedése számára.

Létező jármű ezekből kis számban üzemel, ami annyit jelent, hogy a piac ezeket nem fogadja el, tehát fejleszteni kell őket. A fejlesztés igényét már nem a divat, illetve a fogyasztás-

tásgerjesztés, hanem a szükségszerűség teremti meg.

A kutatás-fejlesztés szükséges irányai

A közlekedési energia, nyersanyag- és helyfelhasználás, valamint a környezeti igények által kijelölt szükségszerűségek alapján a kutatás-fejlesztési irányok meghatározhatók. A kutatási területeket itt nagy vonalakban vázoljuk fel, mert egyes fő elemekkel a továbbiakban részletesen foglalkozunk.

Az optimális járműtípus és -méret meghatározása, ami illeszkedik a jelenlegi igényekhez

• A kutatások során külön lehet foglalkozni a közlekedés emocionális viszonyaival. Bizonyára olyan közlekedés sosem lesz, amelyből teljesen kiszűrhető az emberi érzelmek befolyása, de jobb volna a közúti közlekedést kivenni a küzdőter kategóriából, és más közlekedési ágakhoz hasonlóan A helyről B helyre való helyváltoztatásra használni. Egy ilyen hangulati rendszerben már nincs akkora jelentősége a jármű jelenleg nagyra értékelt tulajdonságainak, amelyek nagymértékben hozzájárulnak a jelenlegi rossz állapot fenntartásához. Ha csupán szikár használati szempontból közelítjük az optimális (a tárgyalt esetekben városi) járművet, akkor egy nagyon egyszerű, viszonylag kis helyigényű és sebességű, a mai gépkocsira kevésbé emlékeztető járműig jutunk. Ez egy kétszemélyes, legfeljebb 7 kW teljesítményű, két- vagy négykerékű, villamos hajtású, fedett, félig zárt jármű, amely a parkolóhelyen és a forgalomban egy jelenlegi autó fele helyével beéri. Az optimális jármű kialakítása természetesen a felhasználás helyétől, a forgalmi körülményektől, a felhasználóktól, éghajlattól függ.

A hajtásrendszer: motor, elektronika, informatikai rendszer • A mai járművek hajtásrendszerétől jelentősen eltérő motorral és hajtó-

művel rendelkezik a második jármű. A technika mai szintjén a villamos hajtás a leginkább elterjeszthető, ezen belül pedig ugyan jelentős korlátokkal, de egy bizonyos hajtásrendszer: az állandó mágneses szinkronmotoros hajtómű a legmegfelelőbb. Ennek a motornak jelentős elektronikai háttérigénye van, ami jelentős ráfordítást igényel mind a hardver, mind pedig a szoftver szempontjából. A motorok helyszükséglete és tömege csökkentésének igénye teremti meg a kutatások szükséges alapját, amihez a hatásfok növelésére való törekvés járul.

A motormeghajtó elektronika már önmagában önálló informatikai rendszert képez, amely kapcsolódik a jármű kommunikációs és külső irányításához. Az informatikai rendszer hivatott a motorok hajtó és fékező (generátoros) üzemének szabályzására, a fékezési energia tárolásának biztosítására.

Az energiatároló rendszer • A járműhajtás második nagy egysége az akkumulátorok alkotta energiatároló egység. A szintén korlátosan terjedő lítium alapanyagú akkumulátorok jelentik a korszerűséget ezen a területen. Az akkumulátoroknak a járműves alkalmazás tekintetében főbb mutatói: a rendszerfeszültség (12–48 V a kisebb, és akár 400 V a nagyobb járműveknél), a fajlagos és az abszolút a kapacitás. Az akkumulátorfejlesztés a nagy gyártóknál folyik, a járműves felhasználásra azonban az energiatároló egységek még szükségyszerűen fejlesztendő, lassan alakulnak ki az egységes, szabvány rendszerek. Nagy probléma a sorba kötött cellák töltéskiegyenlítése (400V-os rendszernél 128 db. cella) és az akkumulátorok töltési-kisütési felügyelete, ami védi a telepeket a kigyulladásától és a túlmerítéstől. Mechanikai rendszernek kell gondoskodnia az akkumulátorok gyors és biztonságos cserélhetőségéről és az üzembiztos

érintkezésről. A töltőrendszer a kiegészítő töltő feszültségforrásokból (hálózat, másik jármű, saját töltés, napelem) tölti az akkumulátortelepet a névleges feszültségen és megengedett áramerősséggel.

Aktív és passzív biztonság, jármű intelligencia • A jármű irányítása teheti leginkább modernné a második járművet. A jelenlegi autóhoz képest egyszerűbb, jobb hatásfokú, kisebb eszköz, mint rendszertechnikai egység sokkal kevésbé bonyolult, és ezért irányítása is egyszerűbb. A mai autóknál egy mindenre kiterjedő központi informatikai egység egyelőre nem tudott megvalósulni, az egyszerűbb járműnél azonban erre van lehetőség. Alapjait a legkisebb egységeknél: kerékpárnál és robogónál célszerű megteremteni. A járműintelligencia a hajtás szintjén valósítható meg a legegyszerűbben. Bármilyen főegység szintű intelligenciával rendelkező jármű aktív biztonsága megnő, és ez lehetővé teszi a passzív biztonság csökkentését, illetve eleve kisebb passzív biztonságú járművek fejlesztését.

Villamosenergia-ellátó és -töltő hálózat • Ez a rendszer nem a járművek része, de nélküle nincs villamosított közlekedés. Minél nagyobb egyedi fogyasztású járműveket használunk, annál nagyobb problémát jelent a hálózat számára a töltés. A töltőhálózat kiépítése energetikai stratégiai feladat, és bár elszívetlen foglalkoznak töltőállomások létesítésével, ezek főleg inkább a figyelem felkeltésére, a villamos mobilitás, illetve az áramszolgáltatók népszerűsítésére hivatottak. A korábban kifejtett számok alapján a villamosenergia-szolgáltatók számára egyelőre jelentéktelennek látszó minimális energiaigényű járművek tömeges elterjedése villamosenergia-fogyasztás 0,4–8,9%-os bővülését jelentené az éjszakai időszakban, amikor a villamos energia elhelyezése problematikus. A kis ener-

giájú járművek által igényelt töltés kis teljesítményű egyedekből álló, szórt rendszer, amelynek a beruházásigénye alacsony, gyorsan megtérül, a jelenlegi hálózatra ráépülhet.

Bár egyelőre a napelemes rendszerek megtérülési ideje és hatásfoka nagyon kedvezőtlen, de a kutatásokat érdemes erre a szektorra is kiterjeszteni, mivel a *Nap az egyetlen tiszta energiaforrás a Föld számára*.

Járműkomfort • A villamos hajtás bevezetése mindenképpen a jármű komfortcsökkenésével jár. Még a rendkívül drága *full* hibridek sem használhatók a korábbi járművekhez hasonló gondtalansággal. Amennyiben elfogadjuk a kisebb energiaigény létjogosultságát, akkor jelentős komfortcsökkenéssel kell számolni az új járműveknél. A közép-európai éghajlaton használt járművek legnagyobb problémája a fűtés, amit eddig a belsőégésű motorok hulladékhője látott el energiával. Közvetlen követője a jármű hűtése, amely az egyik legnagyobb energiapazarló rendszere a jelenlegi fogyasztásnak. A tömegcsökkenés további komfortvesztéssel jár, ami várhatóan csak a rövid távú utazásoknál fogadtatható el.

A fenti legfontosabb témákon kívül természetesen számos terület van, amely igényelheti a kutatás-fejlesztés ráfordításait, és foglalkoztatja a közlekedés tervezőit. A továbbiakban azokkal a témákkal foglalkozunk, amelyek a fentiek alapján a *Mobilitás és környezet: járműipari, energetikai és környezeti kutatások a közép- és nyugat-dunántúli régióban* projekt *Jármű informatikai és mechatronikai kutatások* főirány munkásságába tartoztak.

A második jármű hajtáskutatása

Ennek a tématerületnek a pontos címe a kutatásban *Minimális hajtásienergia-igényű jármű villamos hajtás és energiaforrás rendszerének kutatása* volt. A kutatás kiterjedt a legkorsze-

rűbb állandó mágneses motorok mágneses tér, nyomaték, hatásfok és tömeg optimalizációval való megközelítésére, a motorok korszerű elektronikus hajtásrendszerének fejlesztésére, a járművek villamos tápegységeinek, azok töltési rendszereinek fejlesztésére, a fejlesztett rendszerek próbapadi vizsgálatára.

PMS-motorok kutatása a kis járműteljesítmény-tartományban • A motorok fejlesztésének megalapozása a mágneses tér elméleti kutatása és a már létező eredmények összegző felmérése és kiterjesztése során történt meg. Az elméleti megfontolások mellett természetesen gyakorlati, alkalmazástechnikai szempontokat is figyelembe kellett venni, amelyek lehetővé tették egyes szerkezetek tesztelésre alkalmas példányainak megvalósítását. Az alapozó kutatás eredményei alapján a járműhajtásoknál egyetlen motortípus felé koncentráltak a további munkálatok, ez pedig az állandó mágneses háromfázisú szinkron (PMS) gép volt.

A PMS-motorok járműhajtás szempontjából kedvező jellemzői:

- rendkívül jó fajlagos (egységnyi tömegre jutó) nyomaték és hatásfok,
- elterjedt alkalmazások,
- beszerezhető anyagok, kivitelezhető alkatrészek,
- kellő tapasztalatok és rendelkezésre álló elemző, kutató informatikai szoftverek.

A kutatások szempontjából kedvező, hogy a terület az irányítás és szabályzás elméleti szempontjaiból nem teljesen lefedett, számos elméleti és gyakorlati probléma még megoldatlan.

Kedvezőtlen jellemzők:

- a szükséges anyagok drágák és egyre kevésbé hozzáférhetők (lesznek).
- az egyedi motorgyártás technológiai kiforratlanok, számos kivitelezési problémával kell számolni.

- a szabályzó elektronika bonyolult, és egyedi gyártásban drága.

Kis teljesítményű motorok szimulációja, a hatásfok és tömeg optimalizációja • A motorok kutató megközelítése általános elektrondinamikai vizsgálatokra is alkalmas, ill. speciálisan csak a célzott motorokhoz használható szoftverekkel történhet. Mindegyik eljárás alkalmas volt a motorok elemzésére, gyakorlati, gyors eredményeket azonban csak a speciális szoftverektől lehet várni. A kutatások során párhuzamos elemzésekre került sor, melyek a motorok geometriai, nyomaték-, hatásfokviszonyain túl azok villamos és mágneses jellemzőire, hőtani folyamataira is kiterjedtek.

A motorok prototípusgyártás előtti teljes adatrendszerét egyedi függvényválogatással vizsgáltuk, amelynél a nyomaték-, illetve hatásfokmaximumra törekedve a tömegminimum volt a cél.

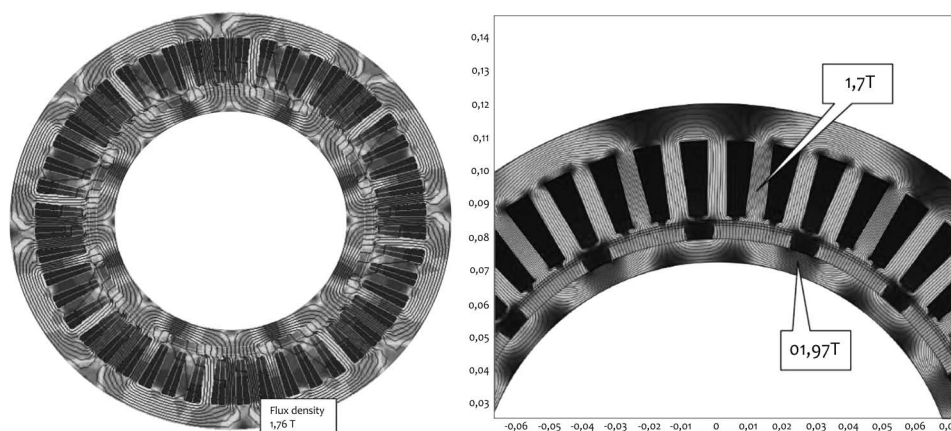
Az Infolytica PMS-motorelemző szoftver segítségével különböző geometriájú villamos gépeket lehet elemezni. Az elemzés során szimulált nyomaték-, veszteség-, feszültség-, áramfüggvényeket generál a program idő- és

szöghelyzet-tartományban, melyekből meghatározza a réz- és vasvesztés, a hatásfok maximális értékét. Lehetőséget ad az áramvektor-forgatás hatásainak vizsgálatára, a hatásfokra és a fordulatszám-tartományra. A szimuláció eredménye egy akár gyártható motor minden lényeges paramétere: álló- és forgórész geometriai méretek, mágnes alak és osztás, pólusszám, tekercselési jellemzők.

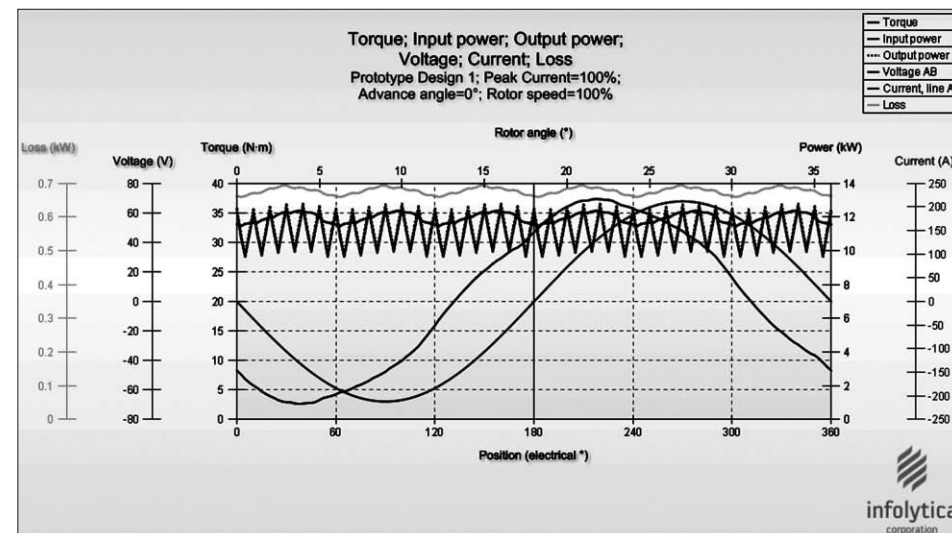
A motorok prototípusainak gyártását gépészeti tervezés előzte meg, amelynek során a motorok alumíniumházat kapnak.

A motorok gyártása az állórész lemezek kivágásából, azok zsugorító összesütéséből, tekercselésből, a mágnesek gyártásából, a forgórészvasmag-gyártásból, mágnes ragasztásból, a tengely és ház gyártásából, valamint a rendszer összeszereléséből áll. Az összeszerelés főleg a nagy motoroknál okoz problémát, ezért ott összeszerelt állapotú motor mágnesezésével is foglalkozni lehet, ami egy új kutatási területet jelent.

A prototípus motorok tesztelése a kutatási program során kifejlesztett próbapadon történik. A próbapad egy villamos fékgéppel



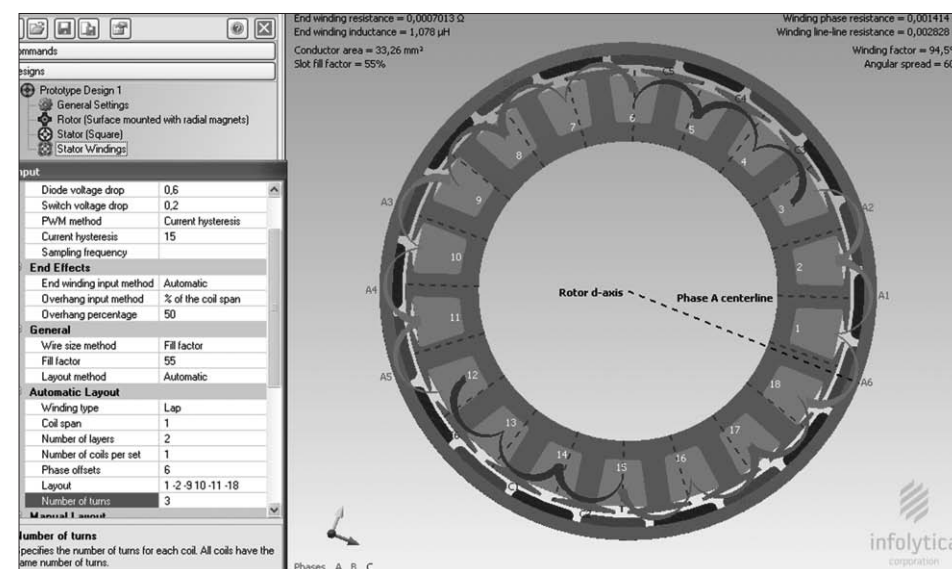
3. ábra • Fluxuseloszlás párhuzamos vizsgálata két szoftver segítségével (Infolytica: dr. Szénásy I., Comsol: Licskó Gábor)



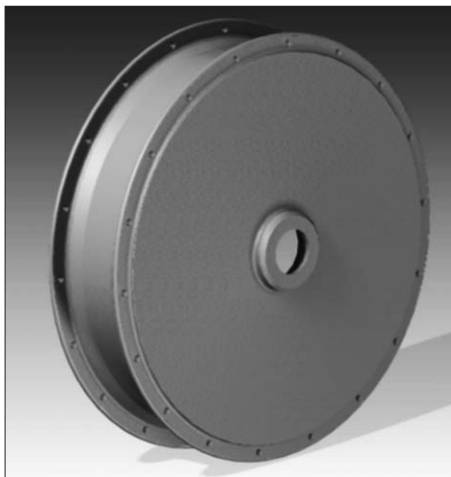
4. ábra • A lüktető nyomaték vizsgálata célszoftverrel (dr. Szénásy István, Infolytica)

rendelkező terhelő berendezés, amellyel mérhetők a motorok villamos jellemzői, nyomatéka és fordulatszáma. A próbapad LabView programmal készített mérési adatgyűjtő és

kiértékelő rendszere lehetővé teszi a motorok előre definiált ciklusfüggvények alapján történő programozott tesztelését, ami biztosítja a különböző motorfajták összehasonlítását.

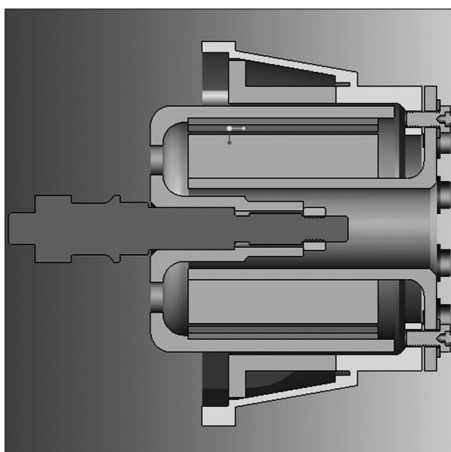


5. ábra • Tekercselési jellemzők egy 11 kW teljesítményű motornál (dr. Szénásy István, Infolytica)



6. ábra • Tárca alakú motor alumínium-házának CAD-rajza

A PMS-motorok legdrágább alkotórészei a mágnesek és a ritkaföldfémek fogyasztásával egy idő után szinte elérhetetlenek lesznek. Minden lehetőséget meg kell ragadni tehát, hogy olyan villamos motoros hajtások szülessenek, amelyek a hasznos fizikai mutatókat teljesítve kis tömegűek, és lehetőleg alacsony a mágnes(anyag)- és réztartalmuk. A jelenlegi kutá-



7. ábra • Robogó villamos motorjának CAD-rajza

tások ezt a feladatot alapozzák, amit a jövőben kell kiteljesíteni. Ebben a kutatásban nagy szerepet kapnak a hatásfokra optimalizált mechanikus hajtóművek.

A motorok fejlesztése összekapcsolódik a szükséges elektronikus szabályzó erősítő kutatásával. A PMS-motorok háromfázisú forgó mágneses terét a korszerű gépeknél szinuszos jelformájú feszültséggel hozzák létre, amelyet a meghajtó nagyfrekvenciás négyszögimpulzus jelekkel közelít. Amennyiben a szinkronmotorok fordulatszám-függvényében növekvő indukált feszültsége eléri a tápfeszültség pillanatnyi értékét, a motor fordulatszáma tovább nem növelhető. Ezért a motoroknak a járműhajtáshoz szükséges tág fordulatszámát csak úgy lehet biztosítani, ha az indukciót a fordulatszám növekedésével valamiképpen csökkentjük, a mágneses mezőt valamilyen gyengítjük. Bevált eljárás az indukciót létrehozó áramvektor elforgatása, amely a nyomaték és egyúttal az indukált feszültség csökkenésével is együtt jár, a teljesítmény állandósága mellett. Az áramvektor-forgatásnak egyéb kedvező járműüzemi hatásai is vannak: ezzel a módszerrel érhető el a motor elméleti legnagyobb hatásfoka, és lehetőséget ad a reluktancia nyomaték hasznosítására, ami azonos geometriai feltételek mellett nagyobb motornyomaték előállítására ad lehetőséget. A járműhajtásra optimalizált meghajtó kutatása a kezdeti stádiumban van: jelenleg egy Microchip processzorral rendelkező fejlesztő panelen sikerült egy modellmotort áramvektor forgatással meghajtani.

A kutatások által megalapozott és felvetett további célok egyik legfontosabb eleme az optimális jármű hozzárendelése a hajtásrendszerekhez, és ezen jármű intelligens hajtásirányításának megteremtése egy központi járműinformatikai rendszer segítségével.

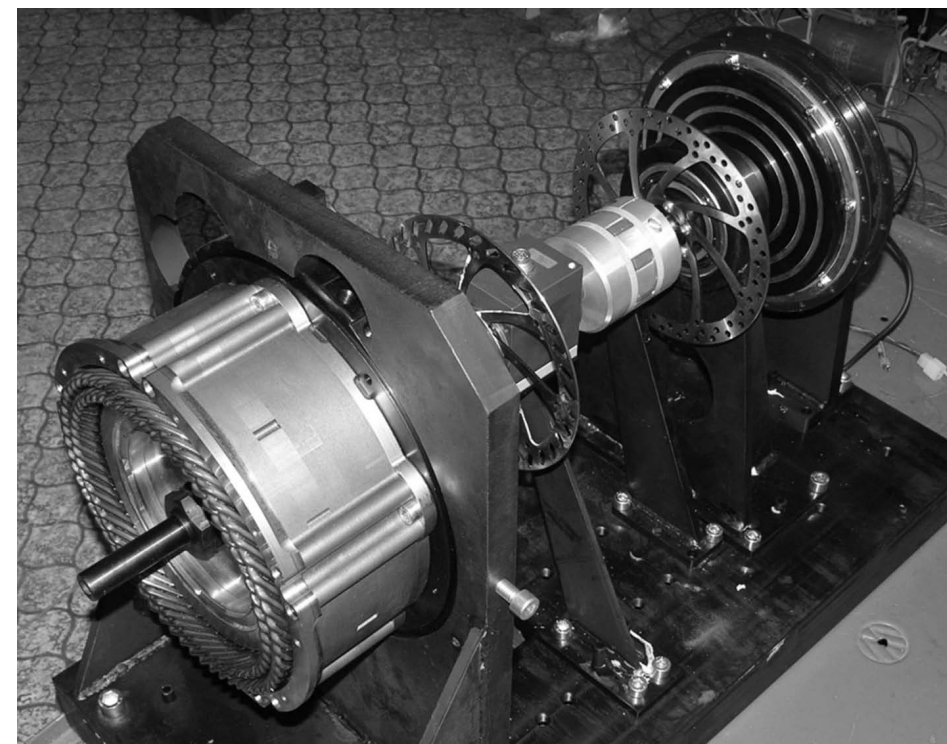
Hibrid jármű hajtáskutatása

A fentebb ismertetett kutatások eszköz- és feltételrendszeréhez hasonlóan a járműdinamika, szimuláció és optimalizáció, a mágneses tér kutatás, irányítás- és kommunikációkutatás eszközei jelennek meg a hibrid járművek hajtásainak fejlesztésénél is. A kutatások a nagyobb teljesítményű, haszonjárműben is alkalmazható hajtásrendszerek motorja, meghajtó elektronikus rendszere, tápegysége és kommunikációs-járművezérlő rendszere körében folytak. A cél egy adott feladat elvégzésére képes, korszerű kishaszonjármű villamos hajtásrendszere volt, amely együttműködik a jármű eredeti vezérlő-, hajtás- és kommunikációs rendszerével.

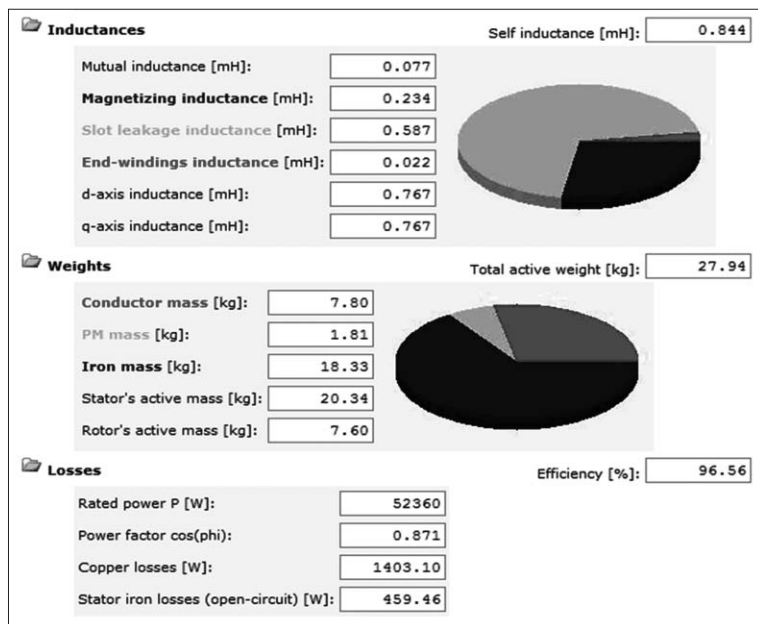
A városi üzemre, sík területen való állandó használatra szánt villamos hajtás főbb paramétereit az alábbiak szerint járműszimulációk eredményeként határozta meg a kutatás előkészítése: belső forgórészes, íves palástra ragasztott neodímiummágnesekkel rendelkező folyadékhűtéses PMS-motor

- névleges teljesítmény: $P_{max}=60 \text{ kW}$,
- névleges motornyomaték: $M_{max}=500 \text{ Nm}$
- névleges fordulatszám tartomány: $n=2000 \text{ f/p}$ mindkét irányban
- névleges feszültség: $U_{max}=400 \text{ V DC}$
- névleges áram: $I_{max}=200 \text{ A}$

A motorok kezelhetősége, beépíthetősége, gyártása és későbbi felhasználása szempontjait mérlegelve a hajtás két, egymással sorba kötött motor alkalmazásával valósult meg.



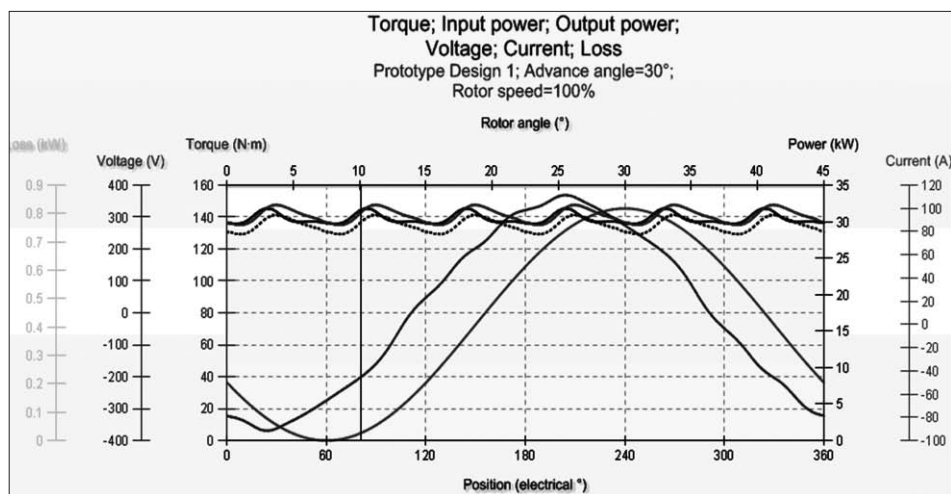
8. ábra • Kismotor próbapad terhelő egység: fékező, hajtó villamos gép, mechanikus fékek, nyomatékmérő tengely, tesztelt motor (Titrik Ádám)



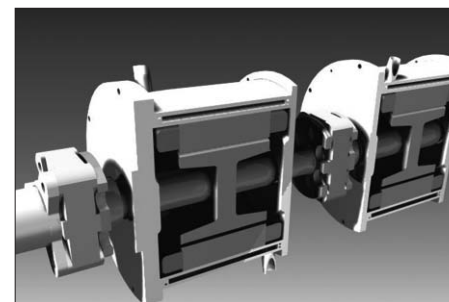
9. ábra • Szimulációs eredmények MotorSolve szoftverrel: a motor geometriai, tömeg-, veszteség- és hatásfokadatai (dr. Szénásy István)

A motorszimulációt két szoftverrel is lehetett végezni, a kettős eredmény alapján történt meg a végleges motorok kialakítása.

A villamos motoroknál az egyik fontos megoldandó feladat a megfelelő hűtés volt. A hajtásrendszer kísérleti jellegre való tekin-



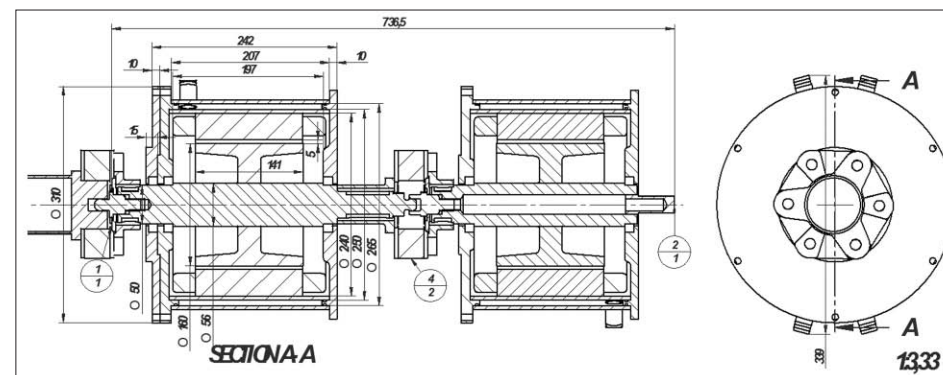
10. ábra • Motorszimuláció eredményei: a motor jellemző villamos és fizikai mennyiségei (Infolytica, dr. Szénásy István)



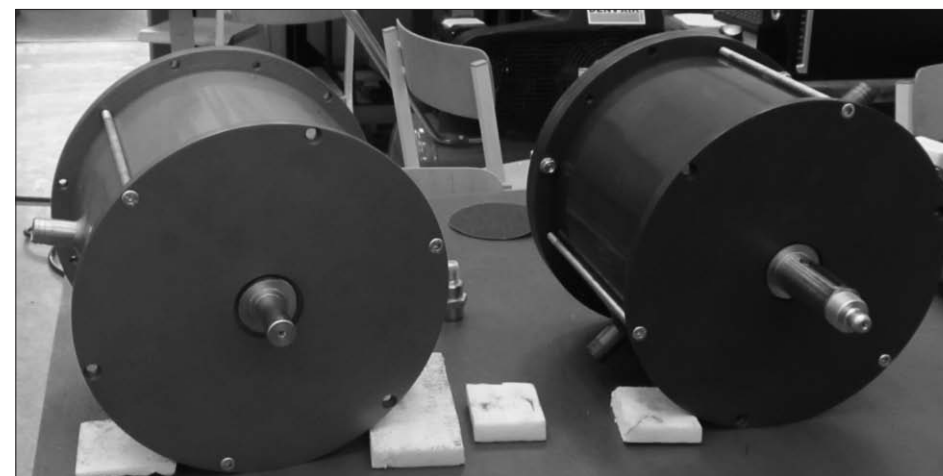
11. ábra • A sorbakötött PMS-motorok CAD-rajza (Titrik Ádám)

tettel olyan, nagyhatékonyságú folyadékhűtés alkalmazása volt célszerű, amelyen a későbbiekben a teljes motor termodinamikai folyamat mérhető, illetve hő- és áramlástechnikai szimulációk előkészítésére megfelelő validációs objektum keletkezik. A hőtani szimulációk eredménye a folyadék hűtőköpeny és a bevezetőcsonkok optimális kialakítása.

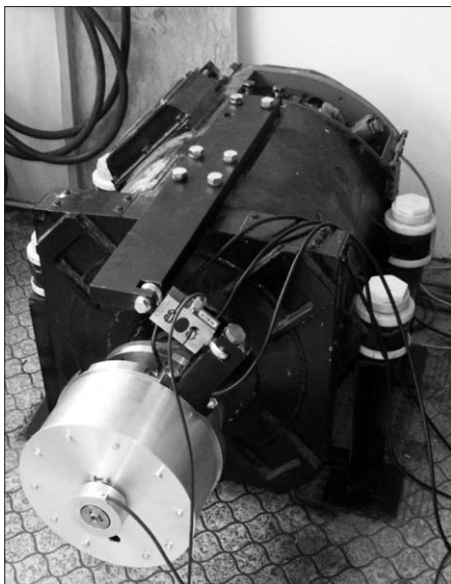
A villamos motorok prototípusai a többszörös szimulációk eredményei alapján készített gépészeti tervek szerint készültek.



12. ábra • A hibridhajtás villamos gépeinek összeállítási rajza (Titrik Ádám)



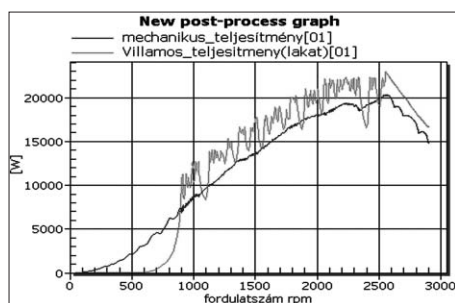
13. ábra • A két fejlesztett hibrid tehergépkocsi PMS-motor, egyenként 30 kW névleges teljesítménnyel



14. ábra • Referenciamotor mérése a nagymotor próbapadon

A tervek alapján készült el a két darab prototípus motor. Mindkét motor önállóan szabályozható és szükség esetén külön-külön is használható.

A kész motorokat a projekt során fejlesztett terhelőpadon lehetett tesztelni. A mérőberendezés egy egyenáramú aszinkron motorból



15. ábra • Villamos és mechanikai teljesítmény összehasonlítása a nagymotor padon egy fejlesztett motornál (Lőrinc Illés)

(terhelő villamos gép) és egy erőmérő cellán átkötött toldatból áll. A fordulatszámot a motor inkrementális szögjeladó segítségével méri. A tesztelés során a mechanikai és villamos mennyiségek mérésére került sor az idő függvényében. A tesztek során egy kísérleti elektronikus szabályzó meghajtó került alkalmazásra 400 V névleges feszültség és 100 A áramerősség mellett.

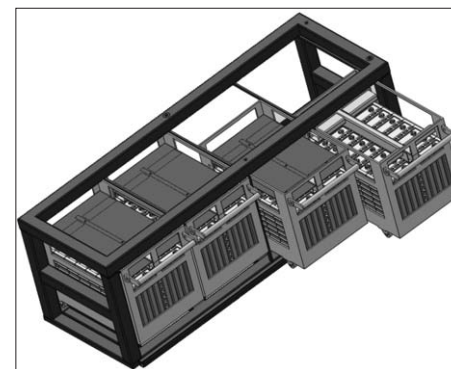
A hibrid hajtás elektronikus szabályzó egyikeként egy az Advanced Motion Control Europe Kft. által fejlesztett nagyteljesítményű meghajtó erősítő került alkalmazásra.

Az összekapcsolt teljes rendszer járműben való tesztelésére is sor került, és jelenleg is folyik.

Nagyfeszültségű tápegység kutatás-fejlesztése

A motorok fejlesztése mellett a tesztrendszerhez szükség volt egy nagy teljesítményű, akár járműben is használható, egyenfeszültségű akkumulátoros táprendszer kifejlesztésére. A tápegység egy mozgatható állványon helyezkedik el, és 8 db, egyenként 50 V névleges feszültségű akkumulátorcsomagból áll, amelyek egy, a keretben mozgatható kocsira kötegelt 14 db 40 Ah-s lítium-ion (LiFePO₄) akkumulátort tartalmaznak. A sorba kötött akkumulátorok cellák közötti elektronikus töltéskiegyenlítővel és önálló hibadiagnosztikával, valamint kocsinkénti biztonsági töltésfelügyelettel rendelkeznek. A kocsik egyenként 26 kg tömegűek, így a felhasználó maga is kicserélheti a hibás vagy lemerült akkumulátorcsomagot.

A nagyfeszültségű tápegység saját fejlesztésű illesztő, csúszo érintkezői automatikus összekapcsolást biztosítanak a keretrendszer dugaszoló aljához, és megbízható kötést adnak a blokkok közötti, akár 200 A áramerősségű kapcsolathoz.



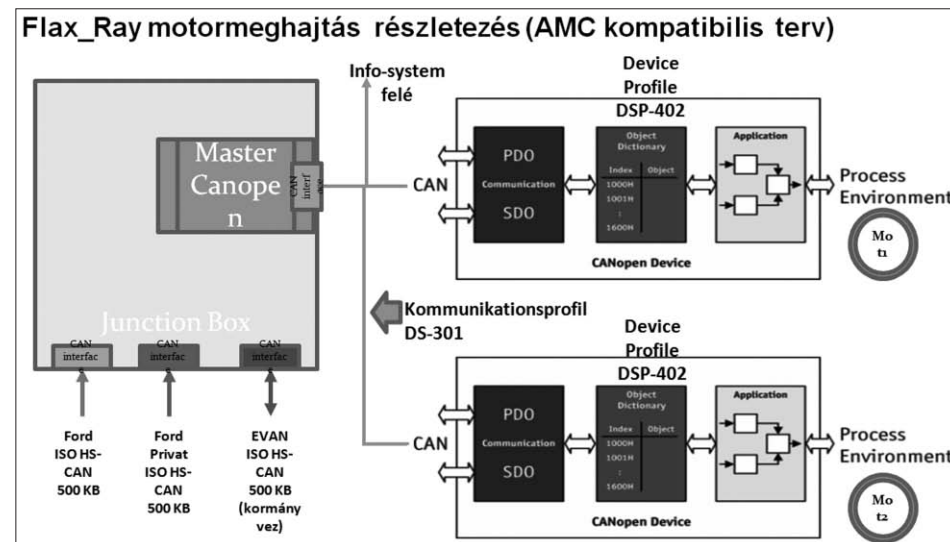
16. ábra • A 400 V DC-tápegység egy keretének 50 V-os blokkjai (Polák József)

Hibrid jármű kommunikációs rendszerének fejlesztése

A tesztelésre választott jármű elektronikus vezérlőrendszerének kommunikációs rendszere CAN-BUS-ra épül. A fejlesztett hajtásrendszernek illeszkednie kell a jármű eredeti elektronikus és vezérlő rendszeréhez, ezért

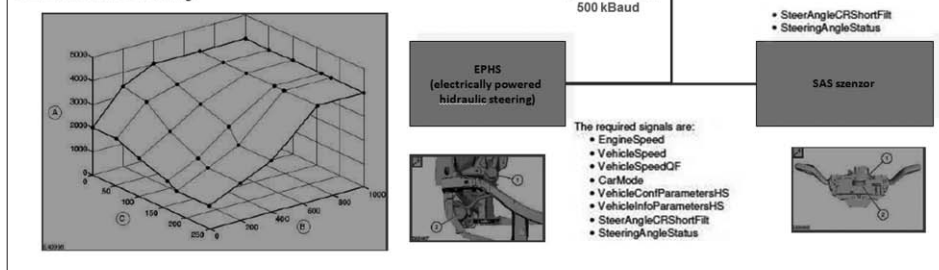
szükséges volt a hajtásrendszer járműben való tesztelése érdekében egy saját kommunikációs rendszert kifejleszteni, amely együttműködésre képes a jármű eredeti rendszerével. A CAN rendszerű architektúra egy *gate-way*-en keresztül kapcsolódik a jármű BUS-hoz, és saját központi egységének I/O-moduljain keresztül vezérli a járműhajtás és az egyes kiegészítő elemek elektronikáját. A BUS-rendszer kifejlesztéséhez szükséges volt a rendszer-kommunikációs követelmények, a működési stratégiák meghatározása, amelyekben súlyponti téma a biztonságos üzemmódváltás, jelfeldolgozás és továbbítás, a regeneratív töltésmenedzsment, az elektronikus fékererőszabályozás, a kormányrásegítés-vezérlés, a hűtés-vezérlés, a tempomat, az E-gáz, a diagnosztika. A funkciók összefogására szolgáló vezérlőegység a *Junction Box*, amelynek fejlesztési aktivitásai az alábbiak voltak:

- a JB-vezérlőegységgel szemben támasztott követelmények írásos összefoglalása, do-



17. ábra • A villamosmotor-meghajtás CAN-kommunikációs rendszere, amely próbapadi körülmények között és a járműbe építve működött.

Kommunikációs megoldások vizsgálata a kormányrásegítésben

E-VAN Topology
részletezés kommunikáció elektromos
szervokormány

18. ábra • Kommunikációs megoldások kormányrásegítésnél (Mesics Imre)

kumentációja, egyeztetések a vezérlőegységet tervező/gyártó cég képviselőjével;

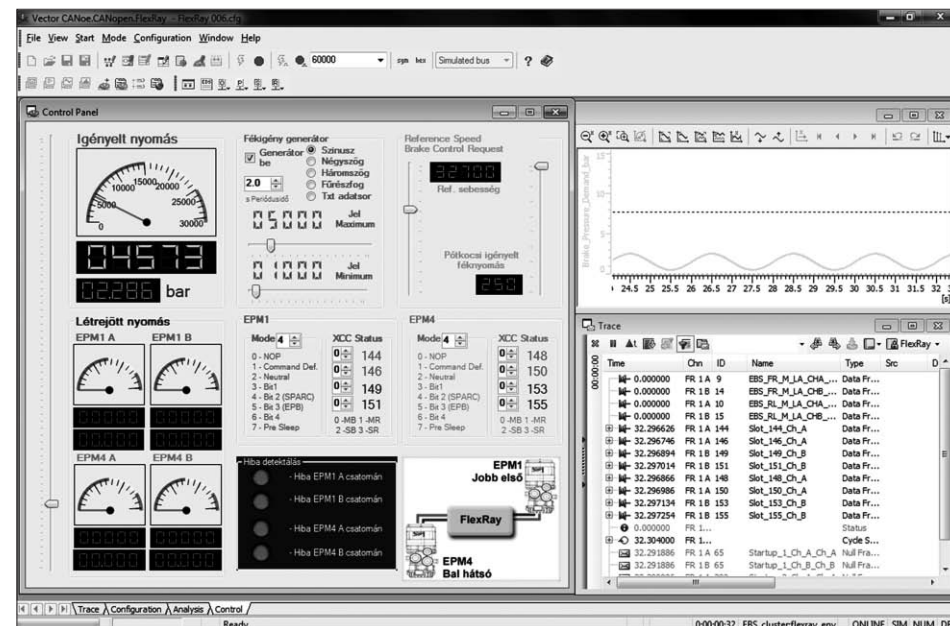
- informatikai Topológia elkészítése (követelményfüzet);
- az alapáramkörök feltérképezése, a szükséges csatlakozópontok kialakítása.

A CAN BUS-rendszer kutatásával párhuzamosan sor került egy biztonságkritikus kommunikációs kísérletre, amelynek során egy FlexRay kommunikáción keresztül vezérelt fékrendszer analízise történt meg. Ennek során egy olyan tesztmodell keletkezett szoftver és hardver oldalon egyaránt, ami képes demonstrálni a biztonságkritikus rendszer működését. Bővíthető, konfigurálható teszt-pad valósult meg, úgy, hogy az informatikai rendszer működése „látható” lett. A szoftveres megvalósítás Vector CANoe 7.5 fejlesztőkörnyezet és Fibex Explorer FlexRay adatbázis-szerkesztő, valamint Vector VN 3600 Interface segítségével történt. A kísérlet eredményei:

- párhuzamos kommunikáció elemzésére alkalmas tesztberendezés,
- a fékrendszer új fejlesztőkörnyezetbe való beleillesztése,
- adatbázis konfigurálása új szabvány szerint,
- működő FlexRay-hálózat,
- valós idejű vezérlés.

A kutatások összefoglalása,
a folytatás lehetőségei

A fejlesztési projektek teljesítették a kitűzött célokat, és magas szinten járultak hozzá a fenntartható közlekedés fejlődéséhez. A kutatások során elkészült és járműbe beépítésre került egy állandó mágneses szinkronmotor és annak elektronikus meghajtása, amely villamos és hibrid tehergépkocsik, autóbuszok hajtásrendszerének villamos gépe lehet. A kutatások eredményeként mind a hajtásrendszer, mind pedig a többi elektronikus járműegység sikeres illesztése, összehangolása



19. ábra • Interaktív grafikus felület a FlexRay vezérléshez (Körös Péter)

is megtörtént saját fejlesztésű kommunikációval, amely segített megindítani a biztonságkritikus BUS-rendszerek kutatását. A minimális hajtási energiát felhasználó villamos járművek területén a kutatás megalapozta a gyakorlatban is használható modellekhez szükséges motorok és elektronikus irányító eszközök kísérleti fejlesztését. A fejlesztés szellemi hátterén kívül kiépült egy számítógépes irányítású mérőrendszer, a motorok szimulációs és gépészeti tervező háttere, a gyártási környezet. Megindult a második jármű központi irányításának a kutatása, amely lehetővé teszi ezek számára a fejlett technikával rendelkező mai modern járműpark tulajdonságainak megközelítését. A villamos hajtásokhoz nélkülözhetetlen villamos energia-

tárolók fejlesztésében is sikerült előrelépni: a nagyobb járművekhez, ill. a tesztberendezésekhez szükséges olyan kompakt, nagyfeszültségű tápegység fejlesztése történt meg, amely lítium akkumulátorokra épül, és rendelkezik a szükséges biztonsági és töltésoptimalizáló elektronikus szabályozórendszerrel. A kutatások tehát ténylegesen felhasználható eredményeket hoztak, valamint megalapozták a további irányokat: a második jármű hajtó- és irányítórendszerének, illetve hibrid haszonjárművek, autóbuszok fejlesztésének lehetőségét.

Kulcsszavak: *állandó mágneses szinkron motor; motormeghajtó elektronika; minimális hajtásigényű jármű; pedelec kerékpár; hibrid haszonjárművek; CAN-BUS és FlexRay-kommunikáció*

IRODALOM

- URL: <http://www.narancsjuice.hu/cikk/paks-sikeresevet-zart-az-atomeromu>
URL: <http://tudastar.255.hu/2011/01/villanyauto-lepesrol-lepesre.html>

MÁSZ – Magyar Áramszolgáltató Kft./hvg, 2010
Richtlinie 2002/24/EG des Europäischen Parlaments

LÉPTETŐMOTOR-FORGÓRÉS ELEKTRO- ÉS MAGNETOREOLÓGIAI FLUIDUMOKKAL CSILLAPÍTOTT LENGÉSEINEK KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

Bagi Tamás

BSc, mechatronikai mérnök,
Pannon Egyetem Fizika és Mechatronika Intézet

Medvegy Tibor

egyetemi tanársegéd,
Pannon Egyetem Fizika és Mechatronika Intézet
medvegyt@almos.uni-pannon.hu

Kronome Gergely

PhD, egyetemi tanársegéd,
Pannon Egyetem Fizika és Mechatronika Intézet
kronome@almos.uni-pannon.hu

Horváth Barnabás

PhD-hallgató,
Pannon Egyetem Fizika és Mechatronika Intézet
bhorvath@almos.uni-pannon.hu

Molnár Gergely

BSc, mechatronikai mérnök,
Pannon Egyetem Fizika és Mechatronika Intézet
mgergely@almos.uni-pannon.hu

Szalai István

az MTA doktora, egyetemi docens,
Pannon Egyetem Fizika és Mechatronika Intézet
szalai@almos.uni-pannon.hu

Bevezetés

Elektroreológiai (ER) folyadékhoz juthatunk, ha ϵ_p dielektromos permittivitású részecskéket ϵ_f dielektromos permittivitású folyadékban diszpergálunk. Az elektroreológiai hatás kialakulásához szükséges, hogy $\epsilon_p > \epsilon_f$ teljesüljön. A gyakorlati alkalmazások során a gömb alakúnak tekintett részecskék átmérője a 0,1–100 μm intervallumba esik. (A diszperziók kiüledését felületaktív anyagok adagolásával csökkentik.) Ha egy ilyen diszperziót külső elektromos térbe helyezünk, az elektrosztatika törvényei alapján belátható, hogy a részecskéknak a külső tér irányába mutató dipólusmomentuma indukálódik (Greiner,

1991). Az indukált dipólusmomentum arányos a részecskék térfogatával, ezért az nagyságrendekkel nagyobb, mint a molekuláris folyadékoknál megszokott dipólusmomentumok. A dipólus–dipólus kölcsönhatás anizotrop jellegének következményeként a diszpergált részecskék igyekeznek olyan pozíciót felvenni, hogy egyik részecske indukált pozitív töltése a másik részecske indukált negatív töltése közelében helyezkedjék el. Az ilyen konfigurációk a többi lehetséges konfigurációval szemben energetikailag kedvezőbbek. (Az indukált dipólusmomentumokkal megfogalmazva ezt úgy is mondhatjuk, hogy a dipólusoknak energetikailag a *nose to tail* konfiguráció a kedvező.) Így az elektromos

tér hatásideje alatt a részecskék elmozdulnak, és először párokba, láncokba, majd oszlopokba szerveződnek. Az egész folyamat lejátszódásához – a konkrét fizikai paraméterek függvényében – ms-ektől néhány s-ig terjedő időre van szükség. A láncok, oszlopok – dipólusmomentumaikkal együtt – a külső tér irányába mutatnak. Ha ezt az anizotrop elektroreológiai folyadékot a láncokra merőleges nyírási sebesség-gradiensnek tesszük ki, az a nyírási feszültség növekedését eredményezi, ami a viszkozitás több nagyságrendbeli növekedéséhez vezet (Nava et al., 1997). Az elektromos tér kikapcsolásával a részecskék elvesztik indukált dipólusmomentumukat, és a viszkozitás az eredeti értékre áll vissza. Az elektroreológiai folyadékokat a külső elektromos tér kapcsoló hatása miatt intelligens fluidumoknak is hívják. Ennek az ún. elektroreológiai hatásnak mára már számtalan alkalmazása alakult ki a mechatronikában. Szabályozható módon alkalmazzák rezgéscsillapításra, nyomtatékvitelre és több mérés technikai fejlesztés is megjelent az utóbbi időben (Bossis, 2001).

A magnetoreológiai (MR) folyadékok felépítésének megismeréséhez először a mágneses folyadékokkal kell foglalkoznunk. A mágneses folyadékok olyan kolloidok, amelyekben ferromágneses részecskék vannak stabilizálva. A részecskék (például magnetit-részecskék) mágneses mono-domének, így permanens mágneses dipólusmomentummal rendelkeznek. A gömb alakúnak feltételezett részecskék átmérője jellegzetesen a 10–50 nm-es mérettartományba esik. A hordozó közeg minősége alapján megkülönböztetünk vizes és szerves bázisú mágneses kolloidokat (Rosensweig, 1985). A részecskék stabilizálása felületaktív anyagok, polimerek vagy elektrolitok adagolásával történhet. Az ilyen

kolloidok több tíz évig stabilak, és folyadékfázisban szuper-paramágneses (ferromágneses) tulajdonságokat mutatnak. (Relatív mágneses permeabilitásuk jellegzetesen az $1 < \mu_r < 5$ intervallumba esik. Kis ferromágneses részecskék koncentráció esetén mágnesezettségük a Langevin-féle mágnesezettségi egyenlet segítségével írható le. A mágnesesen dipoláris folyadékok az elektromosan dipoláris folyadékok polarizációjával szemben telítésig mágnesezhetők.) Mágneses folyadékokat alkalmaznak egyes printerek festékeiben, hangszórók lengőtekerceinek hűtésére, szenzorokban (Odenbach, 2009) és a gyógyászatban a mágneses hipertermiás kezeléseknél (Roca et al., 2009). Amennyiben egy μ_f mágneses permeabilitású ferrofluidumban $\mu_p > \mu_f$ mágneses permeabilitású ferromágneses részecskéket diszpergálunk, úgy magnetoreológiai folyadékhoz juthatunk (Odenbach, 2002). A gömb alakúnak tekintett részecskék jellemző átmérője a 0,1 < a < 50 μm mérettartományba esik. A diszpergált részecskék ferromágnesesek, de méretüknél fogva több mágneses domént is tartalmaznak, így külső mágneses tér hiányában nincs eredő mágneses dipólusmomentumuk. Magnetoreológiai fluidumokat külső mágneses térbe helyezve – az elektroreológiai folyadékok viselkedéséhez hasonlóan – a diszpergált részecskéknak mágneses dipólusmomentuma indukálódik (de Vincente, 2011). A mágneses és az elektromos dipólusok kölcsönhatását leíró összefüggések analógiája alapján, külső mágneses tér hatására az előzőekhez hasonló módon értelmezhető dipóluspárok, láncok és oszlopokba tömörült láncok alakulnak ki a magnetoreológiai fluidumokban is. Ez a hatás a tér kikapcsolásával gyorsan megszűnik. A láncok kialakulása – az elektroreológiai folyadékoknál már ismertetett módon – a viszkozitás növekedé-

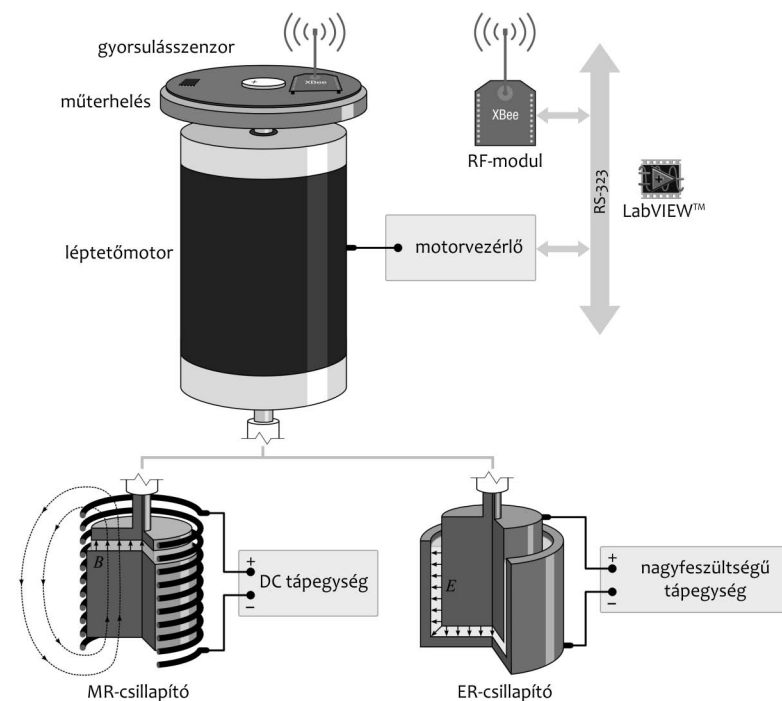
sét eredményezi. Megjegyezzük, hogy külső tér hatására a hordozó mágneses folyadékban is bekövetkezik a láncosodás, ám ennek a viszkozitásnövekedésre gyakorolt hatása jóval kisebb, mint a magnetoreológiai részecskék megfelelő hatása. Napjainkban a finommechanika és a gépjárműtechnika számos területén alkalmaznak magnetoreológiai folyadékokat rezgések csillapítására, nyomatképvitelre és autonóm lengéscsillapítókban (Ohno et al., 2008).

Jelen munkánkban léptetőmotor-forgórész lengéseinek csillapítására alkalmazzuk az elektro- és magnetoreológiai folyadékokat. Jól ismert, hogy a léptetőmotorok rotorja egy-egy lépés után csillapodó lengéseket végez. (A csillapítás mértékére a léptető nyomtató után bekapcsolt tartó nyomtatóknak is meghatározó szerepe van.) Folyamatos léptetés esetén ennek zavaró hatása kisebb, ám egy pozícióra állás esetén – különösen az utolsó lépésekben – a csillapítás mértéke meghatározó lehet a motort tartalmazó mechatronikai rendszer pontosságára nézve is. Egyes gyártók viszkózus folyadékot vagy gél tartalmazó korongot javasolnak (és gyártanak) a rotorok lengéseinek csillapítására, amelyek a léptetőmotor forgó tengelyére rögzíthetők. Az ilyen esetekben a csillapítás mértéke nem szabályozható, ezek a viszkózus csillapítók azonos csillapítást nyújtanak folyamatos léptetés és a pozícióra állás utolsó – kritikus – lépéseiben is. Ebben a közleményben egy mérőtechnikai fejlesztés eredményeit mutatjuk be, amely segítségével az egyedi lépések utáni csillapodó lengőmozgás jól regisztrálható. Munkánk során nem a lengések szögelfordulását, hanem a belőle származtatható tangenciális gyorsulást mértük. A méréshez alkalmazott gyorsulásérzékelőt és néhány adatfeldolgozó áramkört egyéget a rotor tengelyéhez rögzít-

tettük. A súrlódási veszteségek elkerülése végett a forgó elektronikus egység tápfeszültség-ellátását – csúszó érintkezők helyett – egy, a forgó részbe ültetett galvánelemmel oldottuk meg. A forgó egységről a mért adatokat egy rádiófrekvenciás (RF) modul segítségével adtuk át az asztali egységnek. A továbbiakban az általunk fejlesztett mérőtechnikát mutatjuk be, a mérési eredmények fizikai modell alapján történő feldolgozásával egy következő publikációkban foglalkozunk.

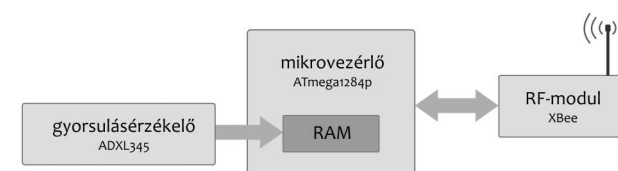
Kísérleti berendezés

A léptetőmotor olyan digitális vezérlésű elektromechanikai eszköz, amelynek a rotorja egy léptető impulzus hatására diszkrét szögelfordulást végez, azaz a léptetési parancs kiadása után eredeti helyzetéből egy, a motorra jellemző meghatározott szöggel elfordul. A motor forgórészének Θ lépésszögnyi elfordulásához t lépésideje van szüksége. A forgórész szöggyorsulásának növelésével érhetjük el, hogy adott szögelfordulás mellett a motor a lehető leggyorsabban álljon a kívánt pozícióba. Ekkor azonban a nagy gyorsítás nagy túllendülést és csillapodó lengést eredményez, ami növeli az ahhoz szükséges t időt, hogy a motor a léptető impulzus kiadása után stabil helyzetbe álljon. Felhasználástól függően ez a lengés sokszor nem megengedhető, így nem is csoda, hogy mára számos módszer alkalmaznak a lengések csillapítására. Az általunk épített berendezéssel egy, a Vexta cég által gyártott PH2610-E2.9 típusú kétfázisú léptetőmotor lengéseinek csillapítását vizsgáltuk. Ez a léptetőmotor egy átmenőtengelyes, nyolc kivezetéssel rendelkező típus, melynek szögelfordulása lépésenként $1,8^\circ$. Maximális fázis- és tartóárama fázisonként $2,9\text{ A}$. A rotor tehetetlenségi nyomatéka 320 gcm^2 . Méréseink során a motort egy 2700 gcm^2 tehetetlen-



1. ábra • Az általunk épített mérőrendszer sematikus rajza

ségi nyomtatók, bronzból készült tárcsával (müterhelés) terheltük, amit a motortengely egyik végén rögzítettünk. A mérő- és adatátviteli áramkört egységeket a müterheléshez rögzítve alakítottuk ki. A teljes mérőrendszer elvi felépítése a választható ER- és MR-csillapító egységekkel együtt az 1. ábrán látható. A léptetés utáni lengést 3 kHz-es mintavételezési frekvencia mellett a forgórészhez rögzített elektronikus egység gyorsulásérzékelőjével (ADXL345) regisztráljuk. A gyorsulásérzékelő jelét egy mikrovezérlő (ATmega 1284p) fogadja, amely gondoskodik a mérési adatok átmeneti tárolásáról és az XBee RF-modul vezérléséről. A mikrovezérlő által végrehajtott programkódot C programozási nyelven fejlesztettük. A forgó-, mérő- és kommunikációs egység elvi felépítése a 2. ábrán látható.

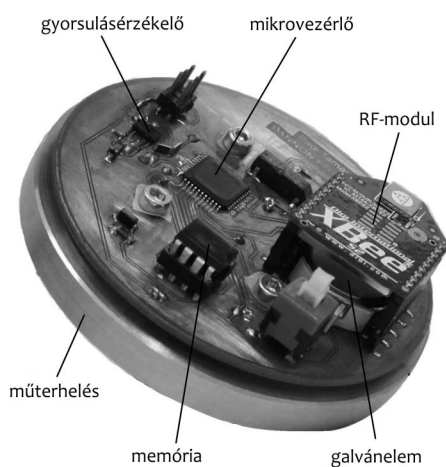


2. ábra • A léptetőmotor rotorján elhelyezett mérő- és kommunikációs egység elvi felépítése

A léptetőmotor vezérlését és meghajtását az L297 és L298 típusú integrált áramkörpárossal valósítottuk meg. A motorvezérlő elektronika és az asztali számítógép között RS-232 szabvány szerint zajlik a kommunikáció. Az asztali számítógépen futó, vezérlést és adatfeldolgozást végző szoftvert LabVIEW grafikus fejlesztői környezetben programoztuk. A forgó egységen lévő RF-modullal kommunikáló XBee modul szintén RS-232 szabvány szerint kapcsolódik az asztali számítógéphez.

A léptetőmotor tengelyéhez rögzített műterhelés és a nyomtatott áramkört lemezen kialakított mérő- és kommunikációs egység fényképét a 3. ábrán mutatjuk be. Az alkatrészek aszimmetrikus elhelyezkedéséből eredő, tengelyre ható deviációs nyomaték elhanyagolható. A gyorsulásérzékelőt a mérés érzékenysége érdekében a forgástengelytől távol helyeztük el.

Az 1. ábrán az általunk épített MR- és ER-csillapítóegységek sematikus rajzát is bemutatjuk. Ezek az egységek egy merev tengelykapcsoló segítségével csatlakoztathatók

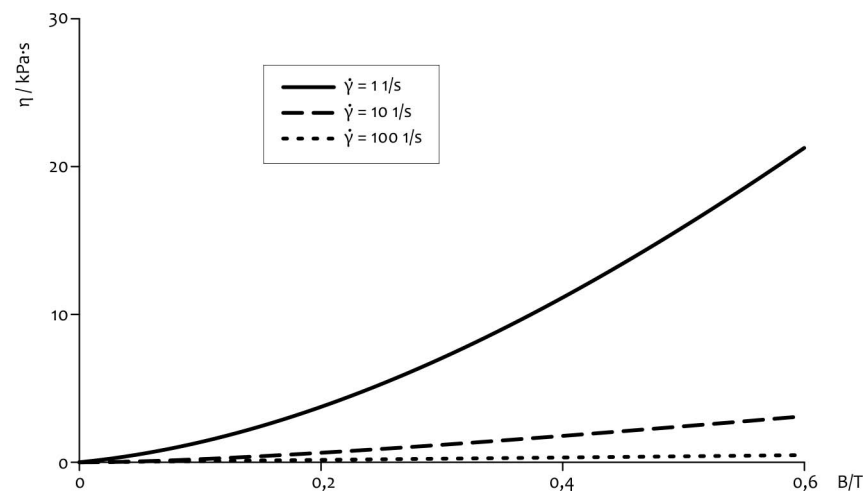


3. ábra • A műterhelés a hozzá rögzített mérő- és kommunikációs egységgel.

tók a léptetőmotor átmenő tengelyének másik végéhez. Az MR-csillapítót egy 4 cm belső átmérőjű $N = 1500$ menetű szolenoid belsejében alakítottuk ki. A motor tengelyéhez lágyvas tárcsa csatlakozik, amely egy ugyancsak lágyvas hengerrel szemben tud rotációs mozgást végezni. (Ez utóbbi, a készülék állórészéhez rögzített henger fluxusvezető szerepet is játszik.) A tárcsa és a henger közti 2 mm-es résben helyezkedik el az MR-fluidum. A mágneses indukciót ebben a résben mértük egy Hall-érzékelő segítségével. Az MR-folyadékban a résből való kifolyását egy műanyag hengerpalást akadályozza meg. A szolenoidot egy nagyáramú tápegységről ($I = 1-3$ A) hajtottuk meg. Az ER-csillapítót egy a léptetőmotor tengelyéhez kapcsolódó 4 cm magas és 3,8 cm átmérőjű alumínium hengerből és egy alumínium serlegből alakítottuk ki. A henger és a serleg felületei között 1 mm rést biztosítottunk. Ebbe a résbe töltöttük az általunk előállított ER-folyadékot. A serleget a nagyfeszültségű tápegység (Stanford Research PS350) föld potenciálú negatív pólusára, míg a hengert a pozitív polaritású pólusra kapcsoltuk. (Ebben az esetben a tengelykapcsolót szigetelő anyagból készítettük.)

Kiegészítő mérőberendezések és mérések ER- és MR-folyadékok vizsgálatára

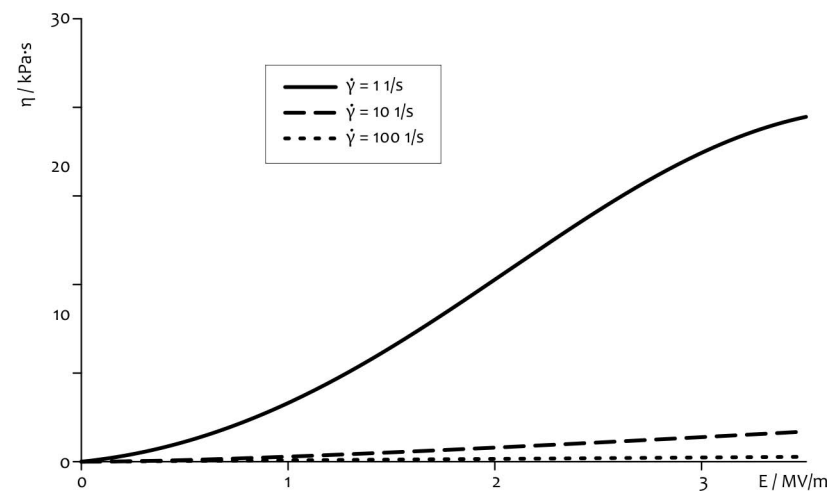
Az általunk használt MR- és ER-fluidumok viszkozitásának mágneses és elektromos térerősség függését egy Physica MCR 301 típusú Anton Paar reométerrel határoztuk meg. Az alapkészülékhez egy MRD70/iT típusú MR-feltétet és egy P-PTD200/E típusú ER-feltétet használtunk. A mágneses indukciót egy Magnet-Physik gyártmányú teslaméterrel (FH 54) mértük. A méréseket 20 °C hőmérsékleten végeztük. Az MR-csillapításhoz a Lord cég magnetit alapú MRF-122EG típusú



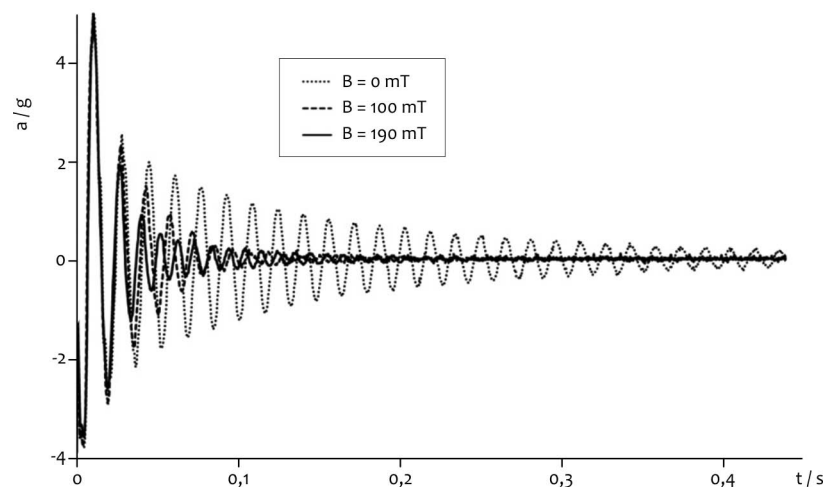
4. ábra • Az MRF-122EG magnetoreológiai fluidum viszkozitásának mágneses indukció függése különböző nyírási sebességek mellett

sú magnetoreológiai folyadékját használtuk. Az ER-csillapítási mérésekhez laboratóriumban összeállított különböző koncentrációjú, $\eta = 0,97$ Pas dinamikai viszkozitású szilikonolaj és bárium-titanát (BaTiO_3) alapú elektorreológiai folyadékokat használtunk. A BaTiO_3 -szemcsék átmérője 50 nm körüli.

A 4. ábrán az MRF-122EG magnetoreológiai fluidum viszkozitásának mágneses indukció függését mutatjuk be különböző nyírási sebességeknél. Látható, hogy a legkisebb nyírási sebességnél az MRF-122EG szuszpenzió viszkozitása három nagyságrendet is változik az alkalmazott mágneses indukció



5. ábra • A szilikonolaj és bárium-titanát alapú elektorreológiai fluidum viszkozitásának elektro-mos térerősség függése különböző nyírási sebességeknél (a fluidum koncentrációja 40 m/m %)

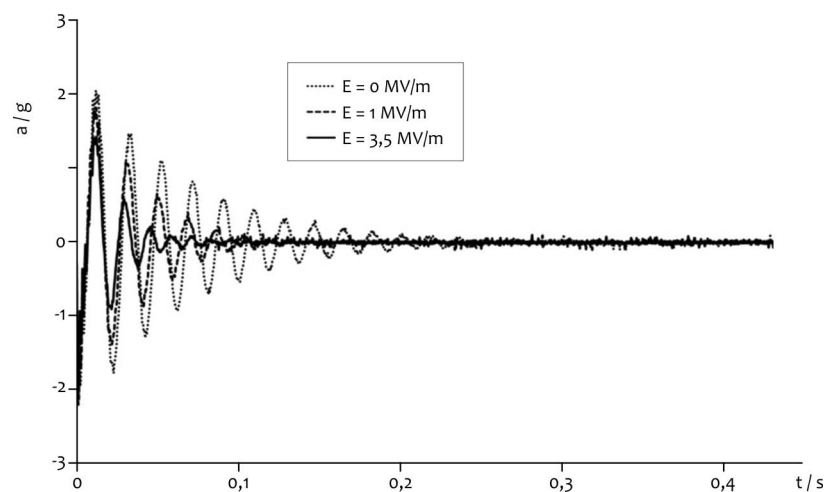


6. ábra • Léptetőmotor-rotor lengéseinek csillapítása MR-csillapító alkalmazásával (MRF-122EG fluidum 1,5 A motor fázisáram mellett)

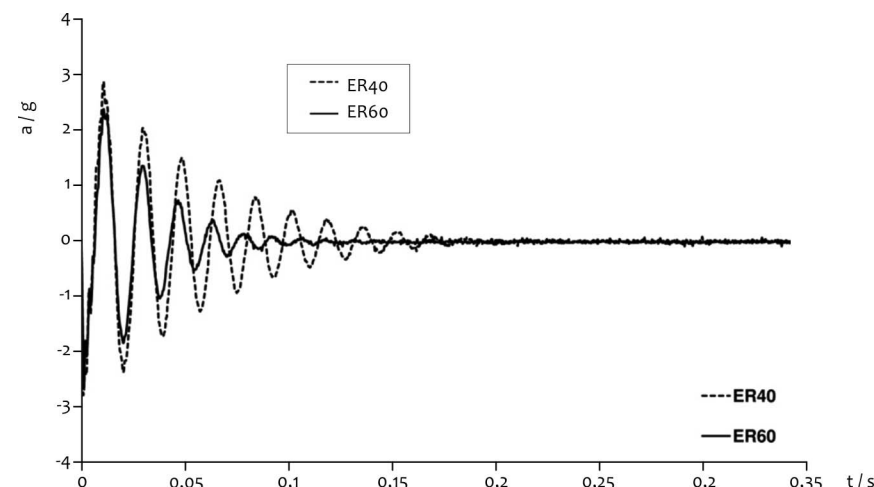
tartományban. A nyírási sebesség növekedésével a viszkozitás értéke csökken.

Az 5. ábrán a 40 m/m %-os szilikonolaj és bárium-titanát ER-fluidum viszkozitásának elektromos térerősség függése látható különböző nyírási sebességek mellett. Az 5. ábrát a 4. ábrával összehasonlítva jól látható, hogy

az ER-szuspenzió viszkozitásnövekedése kisebb mértékű, mint az MR-fluidumnál tapasztalt. A nyírási sebesség növekedésével a viszkozitás *vs* elektromos térerősség görbék ellaposodnak, alig változnak. A továbbiakban az általunk használt ER- és MR-szuspenziók lengéscsillapító hatását részletezzük.



7. ábra • Léptetőmotor-rotor lengéseinek csillapítása ER-csillapító alkalmazásával (40 m/m %-os szilikonolaj és bárium-titanát ER-szuspenzió esetén, 1,5 A motor fázisáram mellett)



8. ábra • Léptetőmotor-rotor lengéseinek csillapítása ER-csillapító alkalmazásával (40 m/m %-os és 60 m/m %-os szilikonolaj és bárium-titanát ER-fluidumok $E = 2$ MV/m elektromos térerősségnél és 1,5 A motor fázisáram mellett)

Mérési eredmények és értékelésük

Mérési eredményeinket a csillapítási idő változása alapján értékeljük. A csillapítási idő az az időintervallum, amelynek elteltével a gyorsulás mint az idő függvénye a maximális gyorsulás $\pm 5\%$ -ával adott gyorsulási intervallumon belül marad. (A csillapítási időt általában a kitérések alapján definiálják, esetünkben a definíciót a közvetlenül mért gyorsulásra terjesztjük ki.)

Az általunk épített mérőberendezést először MR-fluidumok lengést csillapító hatásának mérésével teszteltük. A 6. ábrán az MRF-122EG fluidum csillapító hatását mutatjuk be. Az ábra az idő függvényében mért tangenciális gyorsulást szemlélteti, amelyet nehézségi gyorsulás egységekben tüntettünk fel.

Látható, hogy a mágneses indukció növelésével a csillapítási idő csökken. Míg MR-csillapítás nélkül a csillapodó rezgőmozgás gyorsulási amplitúdója még 0,4 s után sem esik az előírt sávba, addig az MR-csillapítás

bekapcsolásával a csillapítási idő 0,25 s-nak adódik. Kvalitatív módon megállapítható az is, hogy a csillapítás mértéke nemlineáris függvénye a mágneses indukciónak. Az ER-csillapítás hatását a 7. ábra szemlélteti.

A 7. ábrán látható, hogy már az $E = 0$ elektromos térerősséghez tartozó csillapítási idő jóval kisebb mint a 6. ábrán a $B = 0$ mágneses indukcióhoz tartozó csillapítási idő. Ez az MR- és az ER-csillapítók geometriai kialakításával és az alapfluidumok eltérő viszkozitásával magyarázható. (Az ER-csillapító esetén sokkal nagyobb az effektív felület, amelynek mentén a csillapító feszültség kifejti hatását.) Megállapítható: míg $E = 0$ elektromos térerősség esetén a rotor kb. 0,3 s csillapítási idő elteltével éri el az egyensúlyi állapotot, addig $E = 3,5$ MV/m elektromos térerősség esetén ez már 0,15 s alatt megtörténik. Az ábrán jól látható, hogy a csillapítási idő csökken az elektromos térerősség növelésével. A 8. ábrán a csillapítás ER-fluidum koncentrációfüggését mutatjuk be. A töményebb ER-

szuszpenzió csillapítási ideje kb. 2/3 része a hígabb ER-szuszenzió csillapítási idejének.

Összefoglalás

1. Gyorsulásmérésen alapuló kísérleti berendezést állítottunk össze léptetőmotor-forgórész ER- és MR-fluidumok által csillapított lengéseinek meghatározására. A rotációs mozgást végző forgórészen mért gyorsulásadatokat RF-kommunikáció révén juttattuk el a megfelelő asztali egységhez.

2. Az általunk épített kísérleti berendezéssel ER- és MR-csillapítás mellett megmértük egy léptetőmotor egyszeri léptetése utáni lengés gyorsulásgörbéit.

3. Mérési eredményeinket a csillapítási idő változása alapján értelmeztük.

4. Az általunk vizsgált rendszer fizikai modellezésével, a modellparaméterek identifikálásával egy következő publikációnkban foglalkozunk.

A kutatási téma a Magyar Állam és az Európai Unió anyagi támogatásával a TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KONV-2010-0003 projekt keretén belül valósult meg.

Kulcsszavak: *mechatronika, léptetőmotorok, elektroreológiai folyadékok, magnetoreológiai folyadékok*

IRODALOM

- Bossis, G. (2001): *Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*. Proceedings of the Eighth International Conference, World Scientific, London
- Greiner, W. (1991): *Klassische Elektrodynamik*. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main
- Nava, R. – Ponce, M. A. – Rejón, Z. et al. (1997): Response Time and Viscosity of Electrorheological Fluids. *Smart Materials and Structures*. 6, 67–75.
- Odenbach, S. (2002): *Magnetoviscous Effects in Ferrofluids*. Springer, Berlin
- Odenbach, S. (2009): *Colloidal Magnetic Fluids; Basics, Development and Application of Ferrofluids*. (Lecture Notes in Physics 763), Springer, Berlin

- Ohno, K. – Shimoda, M. – Sawada, T. (2008): Optimal Design of a Tuned Liquid Damper Using a Magnetic Fluid With An Electromagnet. *Journal of Physics D: Condensed Matter*. 20, 204146, 1–5.
- Roca, A. G. – Costo, R. – Rebolledo, A. F. et al. (2009): Progress in the Preparation of Magnetic Nanoparticles for Applications in Biomedicine. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 42, 1–11.
- Rosensweig, R. E. (1985): *Ferrohydrodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge
- de Vincente, J. – Klingenberg, D. J. – Hidalgo et al. (2011): Magnetorheological Fluids: A Review. *Soft Matter*. 7, 3701–3709.

ELEKTROREOLÓGIAI FOLYADÉKOK SZERKEZETE: A LÁNCKÉPZŐDÉS IDŐBELI VÁLTOZÁSÁNAK VIZSGÁLATA DIELEKTROMOS MÉRÉSI MÓDSZERREL

Horváth Barnabás

PhD-hallgató,
Pannon Egyetem Fizika és Mechatronika Intézet
bhorvath@almos.uni-pannon.hu

Szalai István

az MTA doktora, egyetemi docens,
Pannon Egyetem Fizika és Mechatronika Intézet
szalai@almos.uni-pannon.hu

1. Bevezetés

Az elektroreológiai (ER) folyadékok nevüket onnan kapták, hogy külső elektromos tér hatására látszólagos viszkozitásuk ugrásszerűen nő. ER-folyadékhoz úgy juthatunk, hogy egy ϵ_f dielektromos permittivitású folyadékban $\epsilon_p > \epsilon_f$ dielektromos permittivitású, szilárd halmazállapotú részecskéket diszpergálunk. Egy tipikus ER-folyadékban a diszpergált részecskék mérete 0,1 és 100 μm közötti. A részecskék kiülepedése elkerülhető, ha a hordozó folyadék és a diszpergált anyag sűrűsége közel van egymáshoz. A szuszpenzió stabilizálása felületaktív adalékanyagokkal is biztosítható, ami megakadályozza a szemcsék összetapadását.

Ha egy ilyen rendszert külső elektromos tér hatásának teszünk ki, a diszpergált részecskéknek indukált dipólusmomentumuk keletkezik. A polarizált részecskék párokba, majd a külső elektromos térrel párhuzamos láncokba szerveződnek. A kialakult láncok egymással párhuzamosan is összekapcsolódhatnak, oszlopszerű struktúrákat alakítva ki. Ez az elektromos tér hatására kialakuló szerkezet

felelős a folyadék viszkozitásának növekedéséért. A jelenség mágneses analógiája: ha a folyadék és a benne diszpergált részecskék mágneses permeabilitása között különbség van, akkor külső mágneses tér hatására a részecskék ugyancsak láncokba, oszlopokba rendeződnek. Ezeket a rendszereket *magnetoreológiai (MR) folyadékoknak* nevezzük.

Gyakorlati felhasználás szempontjából az ER-folyadékok elsősorban az elektromos térrel kapcsolható nyomtatékviteli mechatnikák, hidraulikus szelepek, fékberendezések, felfüggesztések, rezgéselnyelő szerkezetek területén jutnak szerephez. Az ilyen rendszerek nagy előnye, hogy elektronikus úton szabályozhatóak és 10^{-3} s nagyságrendű „válasz-idővel” rendelkeznek.

Az ER-folyadékok szerkezeti változásának követésére több módszer is alkalmazható. A láncos szerkezet megfelelő méretű részecskék esetén közvetlenül megfigyelhető optikai mikroszkópos felvételeken (Klingenberg – Zukoski, 1990). A közvetett módszerek közé tartoznak a fényszóráson, fényelhajláson alapuló vizsgálati eljárások (Martin et al., 1998). A szerkezeti átrendeződés közvetett vizsgálata

történhet a viszkozitásváltozás mérésével, valamint a dielektromos tulajdonságok meghatározásán alapuló módszerekkel is.

A dielektromos mérési módszerek alapját az adja, hogy a láncképződés során az elektroreológiai folyadékok dielektromos permittivitása is változik. Az anizotrop beláncosodott rendszer dielektromos permittivitásának a láncokkal párhuzamos irányban mért komponense nagyobb, mint az izotrop, vagyis a részecskéket véletlenszerű eloszlásban tartalmazó folyadéké (Wen et al., 1997).

A dielektromos permittivitás meghatározására alkalmas módszer a hagyományos impedancia spektroszkópia. Az ER-folyadékok láncosodásának vizsgálatára azonban ez csak korlátozottan alkalmazható, mivel a mérést nagyfeszültségű impulzus hatása alatt kell elvégezni, a dielektromos mérőberendezésre viszont nem juthat nagyfeszültségű impulzus. Ez a technikai nehézség megkerülhető, ha a mérést az impulzus előtt és után végezzük el (Blackwood et al., 1994). Ez az eljárás csak megfelelően stabil láncos szerkezet esetén alkalmazható, ráadásul ilyenkor csak a kialakult szerkezet tulajdonságairól nyerünk információt, a láncosodás dinamikájáról azonban nem.

Különleges, ferromágneses belső réteget tartalmazó szemcsékből készült ER-folyadékokban a láncos szerkezet külső mágneses térrel is létrehozható. Az ilyen rendszerek anizotrop dielektromos permittivitását impedancia spektroszkópiával meg lehet mérni (Wen et al., 1998), mivel nincs szükség nagyfeszültségű impulzusra (külső elektromos térre) a láncos szerkezet kialakításához. A folyamat időbeli lefolyásáról azonban ebben az esetben sem kapunk képet.

Speciális dielektromos mérési módszerekkel a láncos szerkezet időbeli fejlődése is vizs-

gálható, vagyis megmérhető a folyadék „válaszidejét” jellemző karakterisztikus idő (τ). Egy ilyen eljárást alkalmazott kísérleteiben Douglas Adolf és Terry Garino (Adolf – Garino, 1995). A dielektromos permittivitás nagyfeszültségű impulzus hatásideje alatti mérése a korábban főleg molekuláris folyadékok nemlineáris dielektromos effektusának vizsgálatára használt kísérleti elrendezéssel (Rzoska – Zhelezny, 2004; Bradley – Jones, 1974) is megvalósítható. Kísérleteinket egy ezen a módszeren alapuló berendezéssel végeztük.

2. Az ER-folyadékok szerkezetét meghatározó kölcsönhatások

A statikus, nyírásnak ki nem tett ER-folyadék szerkezetének kialakításában a legfontosabb tényezők a polarizált részecskék között ható elektrosztatikus erő és a hőmozgásból adódó diffúzió. Amennyiben a rendszert nyírásnak tesszük ki, akkor a szerkezet kialakításában a viszkózus erő is részt vesz. Dinamikai vizsgálatok szempontjából fontos ismerni, hogy ez a három hatás milyen időskálán játszódik le. A polarizációs kölcsönhatás miatt bekövetkező részecskeaggregáció τ_p , a diffúzió τ_d , míg a viszkózus folyás τ_v karakterisztikus idővel jellemezhető.

A karakterisztikus idők meghatározásához tekintsünk a sugarú ϵ_p dielektromos permittivitású gömböket, amelyek ϵ_f dielektromos permittivitású folyadékban ($\epsilon_p > \epsilon_f$) vannak diszpergálva. A gömböknek egy külső E elektromos tér bekapcsolásakor

$$m = 4\pi\beta\epsilon_f\epsilon_0a^3E \quad (1)$$

dipólusmomentuma indukálódik, ahol

$$\beta = \frac{s_p - s_f}{s_p + 2s_f} \quad (2)$$

ϵ_0 pedig a vákuum permittivitása. A dipólusmomentum és a térerősség vektora azonos

irányúak, az (1) egyenletben és a továbbiakban is csak a vektorok nagyságát jelöljük. Pontszerű, r_{12} távolságra lévő dipólusok közötti kölcsönhatás energiája az

$$U(r_{12}, \theta) = \frac{m^2}{4\pi s_f s_0} \frac{1 - 3\cos^2\theta}{r_{12}^3} \quad (3)$$

egyenlet alapján adható meg, ahol θ a dipólusok középpontját összekötő vektor és az elektromos térerősség vektora által bezárt szög. Bevezethetjük a dipólus–dipólus kölcsönhatási energia minimumának a kT termikus energiához való viszonyát megadó λ paramétert, amit a két energia hányadosaként definiálunk. Figyelembe véve, hogy a dipólusok nem pontszerűek, a dimenzió nélküli paraméterre felírhatjuk (Baxter-Drayton – Brady, 1996), hogy

$$\lambda = \frac{|U_{\min}|}{kT} = \frac{12\pi s_f s_0 a^3 \beta^2 E^2}{kT} \quad (4)$$

ahol k a Boltzmann-állandó, T pedig a hőmérséklet. Ha λ értéke kicsi, a Brown-mozgás miatti diffúzió megakadályozza a láncok létrejöttét. Nagyobb λ esetén viszont a részecskék közötti elektrosztatikus vonzás a domináns kölcsönhatás, így megkezdődhet a láncos szerkezet kialakulása. Az Eyring-elmélet alapján egy η viszkozitású folyadékban az aggregálódott részecskék diffúziója a kölcsönös potenciálvölgyből

$$\tau_p = \frac{a^2}{D} \frac{kT}{|U_{\min}|} e^{\frac{|U_{\min}|}{kT}} \approx \frac{\eta}{2s_f s_0 \beta^2 E^2} \quad (5)$$

időskálán játszódik le. Az exponenciális függvény sorfejtésének csak az elsőrendű tagját vettük figyelembe, mivel $\lambda < 1$. A Stokes–Einstein-törvény szerint a diffúziós állandó a $D = kT/6\pi\eta a$ formulával adható meg. A τ_p

időt tekinthetjük a részecskék párképződési idejének. Ha csak a diffúzió a meghatározó kölcsönhatás, akkor a karakterisztikus idő a Stokes–Einstein-törvény felhasználásával a

$$\tau_d = \frac{6\pi\eta a^3}{kT} \quad (6)$$

egyenlet alapján számolható.

Abban az esetben ha az ER-folyadék nyírás alatt áll, a λ paraméterhez hasonlóan definiálhatjuk a viszkózus és a polarizációs kölcsönhatás viszonyát, amely dimenzió nélküli mennyiséget Mason-számnak nevezünk (Baxter-Drayton – Brady, 1996):

$$Mn = \frac{\eta \dot{\gamma}}{2s_f s_0 \beta^2 E^2} \quad (7)$$

ahol $\dot{\gamma}$ a nyírási sebesség.

A viszkózus és a termikus energia viszonyára is fel lehet írni egy a Mason-számhoz hasonló paramétert, amit Peclet-számnak (Pe) nevezünk. A Pe viszont nem független paraméter, mivel $Pe = \lambda Mn$. A Mason-számot megadhatjuk mint a megfelelő karakterisztikus idők hányadosát, azaz $Mn = \tau_p/\tau_v$, amiből a viszkózus kölcsönhatás karakterisztikus ideje $\tau_v = 1/\dot{\gamma}$.

A fentiekben említett kölcsönhatások egymáshoz való viszonya alapján definiált dimenzió nélküli mennyiségeket, a hozzájuk tartozó karakterisztikus időkkel együtt az 1. táblázat foglalja össze. Meg kell jegyeznünk, hogy az irodalomban az 1. táblázatban megadottaktól eltérő összefüggések is találhatók. Az ER-folyadékok meglehetősen bonyolult rendszerek, sok elhanyagolással és közelítő feltétellel kell élni a megfelelő egyenletek megoldása során. A kísérleti eredmények kiértékelésénél és értelmezésénél ezek a különböző közelítésekkel származtatott összefüggések is hasznosnak bizonyulnak.

kölcsönhatások hányadosa	paraméter	karakterisztikus idő
polarizációs / termikus	$\lambda = \frac{12\pi\epsilon_f\epsilon_0 a^3 \beta \epsilon^2 E^2}{kT}$	$\tau_p = \frac{\eta}{2\epsilon_f\epsilon_0 \beta^2 E^2}$
viszkózus / termikus	$Mn = \frac{\eta\dot{\gamma}}{2\epsilon_f\epsilon_0 \beta^2 E^2}$	$\tau_v = \frac{1}{\dot{\gamma}}$

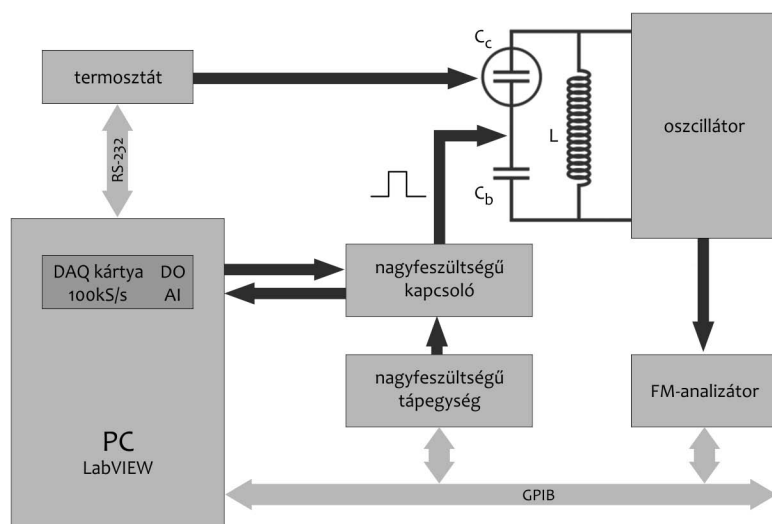
1. táblázat • Az ER-folyadékok szerkezetét befolyásoló kölcsönhatások és a hozzájuk tartozó karakterisztikus idők

3. Az ER-folyadékok szerkezetének kísérleti vizsgálata

A kísérletek során különböző viszkozitású ($\eta = 0,34$ Pas és $\eta = 0,97$ Pas 25°C -on) szilikonolajból és az abban diszpergált szilícium-dioxid (SiO_2) szemcséből készült elektroreológiai folyadékokat használtunk. A szilícium-dioxid szemcsék átmérője 10 és 20 nm közötti. Ekkora méretű szemcsék ülepedése a vizsgálatok időtartama alatt elhanyagolható mértékű. A folyadékok 2 és 4 térfogat%-ban tartalmaztak szilícium-dioxidot. Az elkészített mintákat homogenizálás után vákuum szárítószekrényben víz- és buborékmentesítettük.

3.1. A dielektromos mérési módszer • Az ER-folyadékokban lejátszódó láncképződést a következőkben ismertetendő dielektromos módszerrel vizsgáltuk. A berendezés blokkvázlatát az 1. ábra mutatja be. A módszer alapját egy LC-oszcillátor frekvenciaváltozásának mérése képezi. A vizsgálandó ER-folyadék a termosztálható mérőcella fegyverzetek között helyezkedik el mint dielektrikum. Az így kapott kondenzátor (C_c) kapacitása határozza meg az oszcillátor rezonanciafrekvenciáját (f).

Amennyiben a cellára nagyfeszültségű impulzus formájában külső elektromos teret kapcsolunk, a tér hatására a folyadék belán-



1. ábra • A dielektromos berendezés blokkvázlata

cosodik. Az ER-folyadék dielektromos permittivitása megváltozik, ami a mérőcella kapacitásának változását vonja maga után. Ez a kapacitásváltozás az oszcillátor frekvenciájának elhangolódását okozza, amit egy frekvenciamoduláció (FM) analizátorral követünk.

A nagyfeszültségű négyszögimpulzust egy tápegységből és egy nagyfeszültségű kapcsoló egységből álló impulzusgenerátor állítja elő. A cella fegyverzetek között a kialakuló elektromos térerősség 10^6 Vm^{-1} nagyságrendű. A C_b blokkoló kondenzátor akadályozza meg, hogy a nagyfeszültségű impulzus az oszcillátor aktív elemeire jusson. Ahhoz, hogy a Thomson-egyenlet, azaz $f = (2\pi\sqrt{LC})$ alapján az oszcillátor frekvencia meghatározó eleme C_c legyen, a $C_c \ll C_b$ feltétel teljesülése szükséges.

3.2. Reológiai vizsgálatok • Az ER-folyadékok nyírás közbeni viselkedését egy elektroreológiai feltétellel ellátott Anton Paar gyártmányú reométerrel (Physica MCR 301) vizsgáltuk. Az ER-feltét lehetővé teszi, hogy a reológiai méréseket elektromos tér alkalmazása mellett végezzük el. A minta két párhuzamos, egy álló és egy forgó síklap (sík-sík geometria) között helyezkedik el. A nagyfeszültségű négyszögimpulzust a két elektród közé kapcsoljuk. Az elektródok között az elektromos térerősség a dielektromos mérőberendezésnél alkalmazottnál hasonlóan 10^6 Vm^{-1} nagyságrendű. A mérések során a nyírási sebesség $0,1$ és 100 s^{-1} között változott.

4. A kísérleti eredmények értelmezése

Az általunk végzett vizsgálatoknál a (4) egyenlet alapján definiált paraméter értéke $\lambda \approx 0,01$. Ez azt jelenti, hogy a vizsgált ER-folyadékok szerkezetének kialakításában a hőmozgásból eredő diffúzió szerepe nem elhanyagolható, ami a felhasznált SiO_2 -szemcsék kis méretét tekintve nem meglepő.

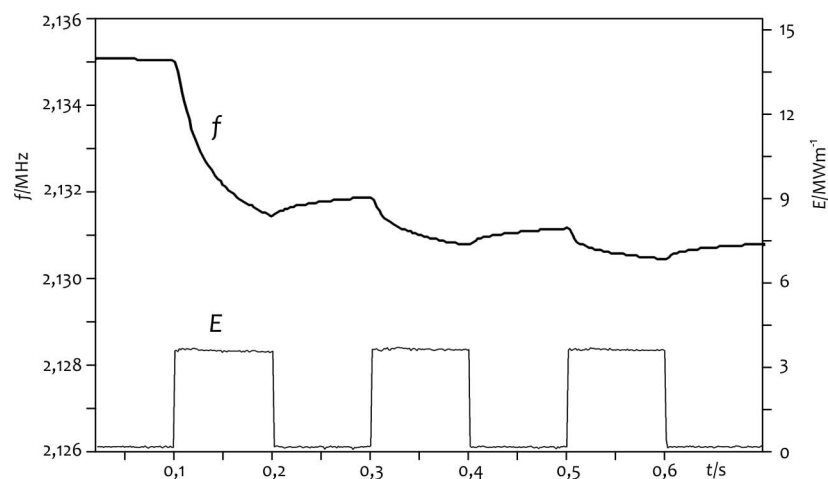
A dielektromos mérőberendezéssel mért frekvenciaváltozást – ami arányos a vizsgált folyadék permittivitás változásával – a 2. ábra mutatja be. Két ismert dielektromos permittivitású anyaggal végzett kalibráció után a mért frekvenciaváltozásból kiszámolható a permittivitásváltozás. Az ábrán három $0,1 \text{ s}$ időtartamú, azonos amplitúdójú impulzus-sorozat hatása látható. Az impulzusok között eltelt idő $0,1 \text{ s}$.

Az első impulzus bekapcsolásakor az oszcillátor frekvencia exponenciális függvény szerinti csökkenése tapasztalható, ami a láncosodás okozta permittitásváltozás következménye. Az impulzus után az elektromos térerősség megszűnésével ($E = 0$, $\lambda = 0$) a folyadék szerkezetét a hőmozgásból eredő diffúzió határozza meg, azaz a létrejött láncos szerkezet elkezd szétesni. Ezt a folyamatot a frekvencia növekedése (a permittivitás csökkenése) jelzi. A további impulzusok hatására a folyadék permittivitása már csak kisebb mértékben növekszik, hiszen a második és a harmadik impulzus bekapcsolásakor a folyadék már tartalmaz láncokat.

Az ER-folyadékok dielektromos permittivitásának időbeli változása a nagyfeszültségű impulzus hatásideje alatt (3. ábra) egy kettős exponenciális alakú függvénnyel írható le a legjobban (Jolly et al., 1999):

$$\Delta\epsilon = A(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + B(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (8)$$

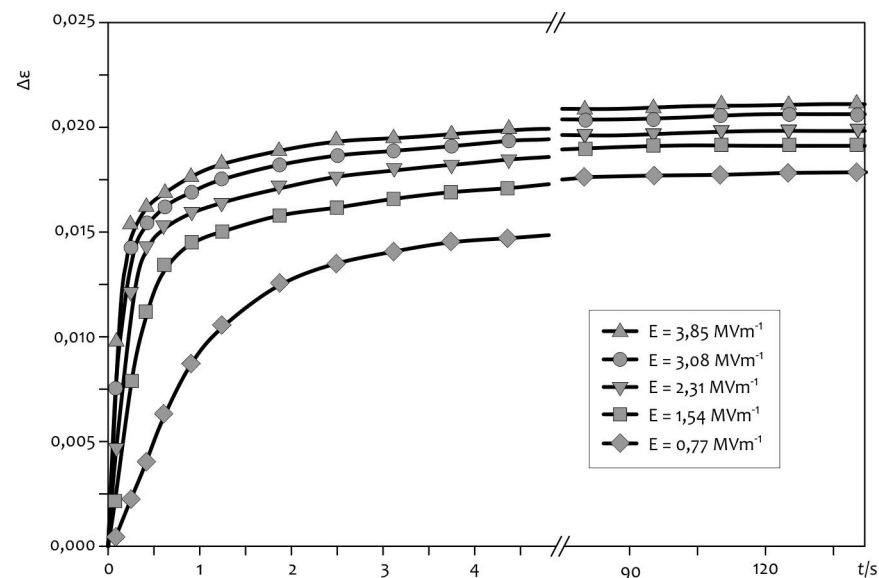
A fenti egyenletben $\Delta\epsilon$ a folyadék impulzus előtti dielektromos permittivitásához viszonyított permittitásváltozás, t az idő, A , B , τ_1 és τ_2 pedig illesztési paraméter. A (8) egyenletben szereplő τ_1 időállandó a részecskék párképződését jellemző, (5) egyenlet alapján számolható τ_p karakterisztikus időnek feleltethető meg. A τ_2 időállandó pedig a



2. ábra • Az oszcillátor frekvenciájának változása az impulzussorozat ($E = 3,85 \text{ MVm}^{-1}$) hatásideje alatt ($\eta = 0,97 \text{ Pas}$ viszkozitású szilikonolaj és 2 V/V % SiO_2 tartalom, $T = 25^\circ\text{C}$)

hosszú láncok kialakulásának karakterisztikus idejét adja meg. Különböző rendszerek esetén a τ_2 általában öt-tízszer nagyobb, mint a párképződési időállandó (Ly et al., 1999).

A karakterisztikus idők meghatározásához az ER-folyadékokra különböző amplitúdójú, 140 s időtartamú impulzusokat kapcsolunk (3. ábra). Ilyen hosszú impulzusok



3. ábra: A beláncosodott ER-folyadék dielektromos permittivitásának változása az idő függvényében különböző télerősségű impulzusok hatásideje alatt ($\eta = 0,97 \text{ Pas}$ viszkozitású szilikonolaj és 2 V/V % SiO_2 tartalom, $T = 25^\circ\text{C}$)

E/MVm^{-1}	$\eta = 0,34 \text{ Pas}$ viszkozitású szilikonolaj			$\eta = 0,97 \text{ Pas}$ viszkozitású szilikonolaj		
	elméleti	mért	mért	elméleti	mért	mért
	T_1/s	T_1/s	T_2/s	T_1/s	T_1/s	T_2/s
1,54	0,159	$0,012 \pm 0,001$	$1,233 \pm 0,032$	0,454	$0,303 \pm 0,004$	$0,237 \pm 0,056$
2,31	0,071	$0,073 \pm 0,001$	$0,916 \pm 0,012$	0,201	$0,154 \pm 0,001$	$0,824 \pm 0,014$
3,08	0,040	$0,051 \pm 0,001$	$0,808 \pm 0,010$	0,113	$0,102 \pm 0,001$	$0,677 \pm 0,009$
3,85	0,025	$0,041 \pm 0,001$	$0,764 \pm 0,010$	0,072	$0,073 \pm 0,001$	$0,581 \pm 0,008$

2. táblázat • Az elméleti és a mért karakterisztikus idők különböző elektromos télerősség mellett ($\eta = 0,34 \text{ Pas}$ és $\eta = 0,97 \text{ Pas}$ viszkozitású szilikonolaj, 2 V/V % SiO_2 tartalom, $T = 25^\circ\text{C}$)

hatása alatt körülbelül 90 s eltelte után a folyadék permittivitása már nem növekszik, azaz a szerkezet állandósul. Nagyobb télerősségű impulzusok nagyobb permittitásváltozást okoznak, mivel λ növekedésével egyre több részecske vesz részt a láncok kialakításában. A télerősség növelése egy határon túl ($E \approx 6 \text{ MVm}^{-1}$, $\lambda \approx 0,15$) már nem okoz nagyobb permittitásváltozást. Ez azzal magyarázható, hogy ekkora télerősség mellett a részecskék döntő hányada már a láncos szerkezet tagja.

A két különböző viszkozitású szilikonolajból készült folyadék esetén az illesztés alapján kapott időállandókat a 2. táblázat hasonlítja össze az (5) egyenlettel számolt karakterisztikus időkkel. Annak ellenére, hogy a képletek csak közelítő feltételek mellett érvényesek, az egyezés a mért értékekkel jónak mondható.

A permittitásváltozás mértékét megbecsülhetjük a Weijia Wen és munkatársai által elméleti megfontolások alapján megadott formulákkal (Wen et al., 1997). Az izotrop ER-folyadék dielektromos permittivitása az

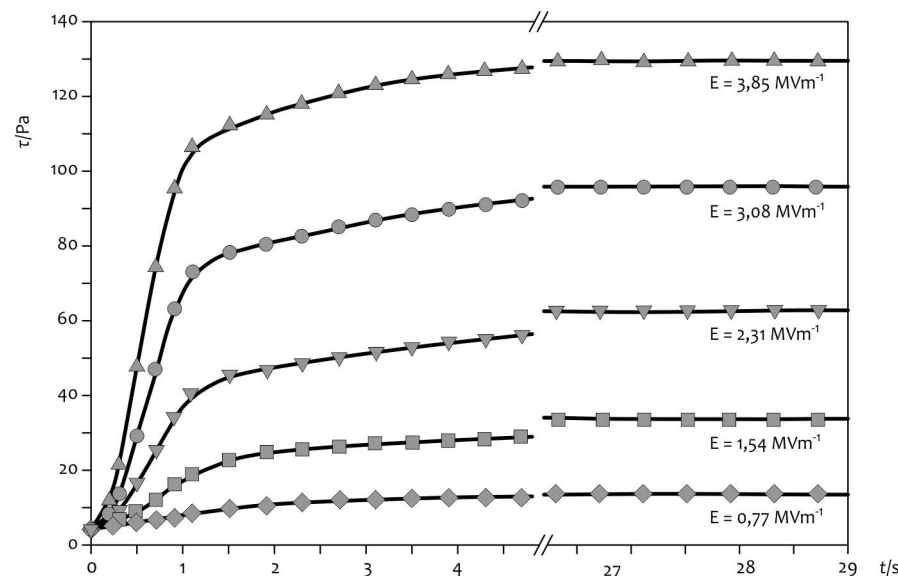
$$\varepsilon_i = \varepsilon_f \frac{s_p + (\varphi - \varphi^{1/3})(s_p - s_f)}{s_p - \varphi^{1/3}(s_p - s_f)} \quad (9)$$

míg a teljes mértékben beláncosodott folyadéké az $\varepsilon_c = \varphi \varepsilon_p + (1 - \varphi) \varepsilon_f$ (10)

egyenlettel számolható, ahol φ a diszpergált szemcsék térfogattörtje. Az általunk vizsgált 2 térfogat%-os, $\eta = 0,97 \text{ Pas}$ viszkozitású szilikonolajból készült ER-folyadék dielektromos permittivitása $\Delta\varepsilon = 0,021$ -el változott az $E = 3,85 \text{ MVm}^{-1}$ elektromos télerősség hatására. Ugyanerre a rendszerre az említett (9) és (10) egyenletekkel számolva $\Delta\varepsilon = 0,007$ permittitásváltozás adódik, azaz a formula csak korlátozottan használható.

A nagyfeszültségű impulzusnak kitett szilikonolaj- SiO_2 ER-folyadék nyírás ($\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$) közbeni viselkedése a 4. ábrán látható. Az eltelt időt a 30 s időtartamú, különböző amplitúdójú impulzusok bekapcsolásától számítjuk. A nyírás alatt álló folyadék válaszüzeje az 1. táblázatban szereplő egyenlet alapján a nyírási sebesség reciprokéval egyenlő, azaz $T_v = 1 \text{ s}$, míg a mérések alapján a válaszüze $T_v = 0,8 \text{ s}$. Kisebb nyírási sebesség mellett ($\dot{\gamma} = 0,1 \text{ s}^{-1}$) a számolt karakterisztikus idő $T_v = 10 \text{ s}$, a mérések szerint pedig $T_v = 5,1 \text{ s}$. Azaz az elméleti formula csak nagyságrendi becslésre használható. Megállapítható, hogy az ER-folyadék válaszüzeje a nyírási sebesség növelésével csökken.

Ahogy a 4. ábrán jól látható, az elektromos télerősség növelésével adott nyírási sebesség mellett a folyadékban ébredő nyírási feszültség



4. ábra • A nyírófeszültség változása az idő függvényében különböző térerősségű impulzusok hatásideje alatt ($\eta = 0,97$ Pas viszkozitású szilikonolaj és 2 V/V % SiO₂, $\dot{\gamma} = 1$ s⁻¹, $T = 25$ °C)

ség megközelítőleg lineárisan növekszik. Ez eltér a folyadék dielektromos permittivitásának a 3. ábrán bemutatott változásától. Ahogy azt korábban említettük, a térerősség egy kritikus értékénél szinte az összes részecske láncokba szerveződik, így a térerősség további növelése nem okoz nagyobb permittivitásváltozást. A részecskék közötti elektrosztatikus vonzóerő viszont növekszik, vagyis a láncokat egyre nehezebb elszakítani, ami a nyírófeszültség növekedését jelenti.

5. Összefoglalás

Dielektromos permittivitást mérő berendezést építettünk elektorreológiai folyadékok elektromos tér hatásideje alatti láncosodásának vizsgálatára. Szilikonolaj és szilíciumdioxid-alapú ER-folyadékokra megmértük a részecskék láncosodása okozta dielektromos permittivitásváltozást.

A dielektromos mérési adatok kiértékelésénél kiszámítottuk a párképződés és a hosszabb láncok kialakulásának karakterisztikus T_1 és T_2 idejét. Az így nyert karakterisztikus idők jó egyezést mutattak az irodalomból vett elméleti egyenletek alapján számolt adatokkal.

A vizsgált ER-folyadékokra meghatároztuk a viszkozitás időfüggését a különböző külső elektromos terek esetén. Megállapítottuk, hogy a viszkozitásmérésekből származtatott karakterisztikus idő (T_v) nagyságrendileg egyezik az elméleti formulákkal számoltakkal.

A kutatási téma a Magyar Állam és az Európai Unió anyagi támogatásával a TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KONV-2010-0003 projekt keretén belül valósult meg.

Kulcsszavak: *elektorreológiai folyadékok, lánc-képződés, dielektromos permittivitás*

IRODALOM

- Adolf, D. – Garino, T. (1995): Time-Dependent Dielectric Response of Quiescent Electrorheological Fluids. *Langmuir*. 11, 307–312.
- Baxter-Drayton, Y. – Brady, J. F. (1996): Brownian Electrorheological Fluids as a Model for Flocculated Dispersions. *Journal of Rheology*. 40, 1027–1056.
- Blackwood, K. M. – Block, H. – Patray, P. et al. (1994): The Polarization, Structuring and Rheology of ER Fluids. In: Tao, R. – Roy, G. D. (eds.): *Electrorheological Fluids*. World Scientific, Singapore
- Bradley, P. A. – Jones, G. P. (1974): A System for the Investigation of Nonlinear Dielectric Effects Using Digital Techniques. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 7, 449–452.
- Brown, B. L. – Jones, G. P. – Davies, M. (1974): Dielectric Measurements in the Presence of a Rectangular Electric Pulse and Their Comparison with Electric Birefringence. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 7, 1192–1199.
- Jolly, M. R. – Bender, J. W. – Mathers, R. T. (1999): Indirect Measurements of Microstructure Development in Magnetorheological Fluids. *International Journal of Modern Physics B*. 13, 2036–2043.
- Klingenberg, D. J. – Zukoski, C. F. (1990): Studies on the Steady-Shear Behavior of Electrorheological Suspensions. *Langmuir*. 6, 15–24.
- Ly, H. V. – Ito, K. – Banks, H. T. (1999): Dynamic Simulation of the Temporal Response of Microstructure Formation in Magnetorheological Fluids. In: Tao, R. – Roy, G. D. (eds.): *Electrorheological Fluids*. World Scientific, Singapore
- Martin, J. E. – Odinek, J. – Halsey, T. C. et al. (1998): Structure and Dynamics of Electrorheological Fluids. *Physical Review E*. 57, 1, 756–775.
- Rzoska, S. J. – Zhelezny, V. P. (2004): *Nonlinear Dielectric Phenomena in Complex Liquids*. (NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry) 157.
- Schwarz, G. – Walther, P. (1985): Experimental and Theoretical Studies on the Dielectric Field Effect of an Alamethicin-Like Peptide in a Lipophilic Medium. *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*. 89, 491–500.
- Wen, W. – Ma, H. – Tam, W. Y. et al. (1998): Anisotropic Dielectric Properties of Structured Electrorheological Fluids. *Applied Physics Letters*. 73, 21, 3070–3072.
- Wen, W. – Men, S. – Lu, K. (1997): Structure-Induced Nonlinear Dielectric Properties in Electrorheological Fluids. *Physical Review E*. 55, 3, 3015–3020.

JÁRMŰKERÉK-MODELLEZÉS

Fodor Dénes Weisz Róbert

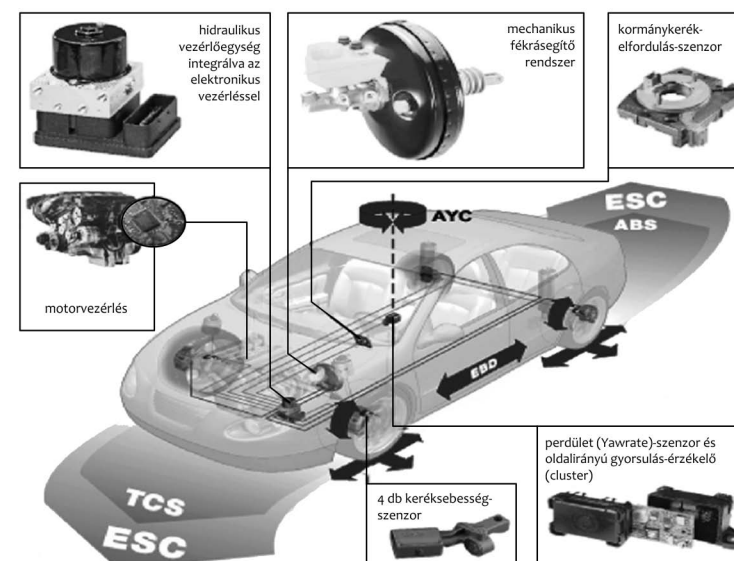
egyetemi docens, mechatronika MSc-hallgató,
Pannon Egyetem Mérnöki Kar Gépészmérnöki Intézet Járműrendszer-technikai Laboratórium
fodor@almos.uni-pannon.hu szjoezsv@gmail.hu

Bevezetés

Napjainkban a gépjármű modellezésére mint egy összetett rendszer leírására, számos modellt és modellegyütttest használnak a mérnökök. A modellek szerepe igen sokrétű lehet, némelyeket egyszerűségük, könnyen kezelhetőségük miatt előszeretettel alkalmaznak valós időben futó szabályozások algoritmusaiiban belső modellként, míg mások kimondottan szimulációkra, előzetes tesztelesekre vagy egy-egy alkatrész modellezésére lettek kifejlesztve. A környezetünk leírására megalkotott modellek két nagy csoportba sorolhatók: folytonos vagy diszkrét – elektronikai példával élve analóg vagy digitális. Általánoságban e szemlélet alapján megkülönböztethető időbeli és/vagy távolságkoordináta szerinti folytonosság vagy nem folytonosság. A folytonos modellek az anyagot folytonos közegként (kontinuumként) kezelik, azt a végtelenségig nagyítva is anyagi jellemzőkkel ruházzák fel. Ezzel szemben a diszkrét megoldás, melyet bizonyos szemszögből véges elem-módszernek is nevezhetünk, az anyagot kicsi részekre bontja, melyek tovább már nem bonthatók. A valóságban a folytonos modellek a számíthatóság miatt általában csak erőteljes megkötéssel alkalmazhatók: például tömegpontként tekinthető testek mozgása vagy egyenes csővezetékben történő homogén

közeg áramlása (ilyen lehet például a hűtési folyamat előtt lévő hűtővíz áramlása). Ha azonban a mozgást végző test deformálódásra képes, vagy az áramló anyag összetétele térben-időben változó, esetleg a csővezeték alakja nem írható le folytonos függvényekkel (szabályozószelep), célravezetőbb a végeselem-módszer alkalmazása. Hasonlóképpen az aerodinamikában, például autók karosszériájának szélcsatornás tesztelésénél a közeg felfogható kontinuumként vagy ütköző levegőrészecskékként („gömbökként”), és így a newtoni fizikából ismeretes lendületmegmaradással is megalkotható egy modell, amely az eredő légellenállásra próbál becslést adni. Azonban a diszkretizálásnál legtöbbször nem érdemes az atomi méretekig lemenni, hiszen ilyen nagyszámú elem külön kezelése hihetetlen mértékben megnövelné a számítási igényeket, sőt a mai eszközökkel kezelhetetlenné válna e modellek számítása. Így a mozgó test anyagának összetételétől, alakjától vagy az áramlás milyenségétől függően a vizsgált teret különböző nagyságú térrészekre érdemes osztani, és egy-egy ilyenben belül homogén viszonyokat feltételezve vizsgálni az adott fizikai problémát.

Az időben folytonos, síkbeli és egyszerű járműmodellek csoportjába tartozik az ún. biciklimodell (Zomotor, 2006), más néven

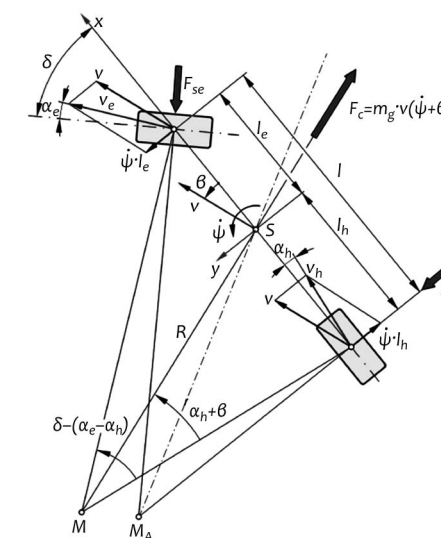


1. *ábra* • Az ESP (Electronic Stability Program): szenzorok és eszközeik a járművön belül, illetve a biciklimodell alkalmazása (AYC)

egynyomvonalú járműmodell (*STM* – *Single Track Model*), amely az adott járműre történő paraméterillesztés után a jármű függőleges tengelye körül végzett forgómozgására (perdülés, legyezés) ad becslést. A biciklimodell (Lundquist – Schön, 2009) állapotváltozói: a perdülési szögsebesség és az úszási szög, melyek szabályozási célú felhasználásával a jármű menetdinamikai tulajdonságai jelentősen javíthatók; például túlkormányzás (belső ív felé sodródás) vagy alulkormányzás (külső ív felé sodródás) esetén a jármű kanyarmenetben az ideális íven tartható. E folyamatot a magyar szakirodalom aktív perdület szabályozásnak (angol megfelelője: AYC – Active Yaw Control) hívja, mely az 1. ábrán látható módon a jármű kitörését hivatott megakadályozni.

A 2. ábrán a biciklimodell struktúrája és a modell felállításához figyelembe vett fizikai mennyiségek láthatók. A modell hat paramé-

terrel állítható: a tömegközéppont távolsága az első keréktengelytől (l_e), valamint a hátsótól (l_h), a jármű tömege (m), tehetetlenségi



2. *ábra* • A biciklimodell szerkezete és fontosabb mennyiségei

nyomatéka (J), és a két–két összevont kerékre egy–egy kúszási merevségnek (C_e és C_h) nevezett mennyiség.

Az első két geometriai paraméter, valamint a tömeg és (eltekintve a bólintás- és dőlés-jelenségektől) a tehetetlenségi nyomaték is a járműre jellemző közel állandó értékű fizikai tulajdonságot írnak le. Ezen paraméterek értékei csupán kis mértékben változhatnak meg, például az utasszám vagy a csomagartató terhelésének, a benzintank telítettségének függvényében (eltekintve a vontatmányoktól). Belátható, hogy a hatból utolsóként említett két paraméter, azaz a kúszási merevségek egyesítik magukban mindazon jellemzőket, amelyek az útfelület–kerék és a kerék–felfüggesztés közötti kapcsolatokat írják le. Tehát a kúszási merevségek egyesítik a felfüggesztésből, a gumi anyagminőségéből, a keréknyomás értékéből és az útburkolat minőségéből adódó összefüggéseket. A biciklimodell számtalan egyszerűsítést használ, és így megbízhatósága, pontossága korlátozott: kis kúszási szögek ($-6-8^\circ$, az *1. ábrán* alával jelölve), limitált oldalgyorsulás ($3-4 \text{ m/s}^2$), és nem léphet fel hosszirányú eredő erő (közel állandó hosszirányú sebesség). Emellett a jármű mozgása során a kúszási merevségek értékei nem állandóak, ami nehezíti a modell paraméterillesztését, azaz a mérési eredményekre támaszkodva a paraméterek meghatározását optimalizálással.

A négy kerék meghagyásával a biciklimodellhez hasonló paraméterekkel rendelkező, ám egy fokkal bonyolultabb járműmodell származtatható, ahol a négy kerék mindegyikéhez tartozik egy-egy kúszási merevség. A négykerékű kétdimenziós járműmodell már jobban kezeli a hosszirányú tengelyre nem szimmetrikus hatásokat, dinamikáját tekintve azonban hasonló a biciklimodellhez. Bő-

vítve a járműmodellt, egyre több hatás vehető figyelembe. A fő kérdés, hogy mennyire érdemes részleteibe menően egyetlen hatást figyelembe venni.

Könnyen belátható, hogy ha a jármű mozgásának szabályozása az elvárás, akkor elsőként a kerekek vizsgálata, megismerése és modellezése sarkalatos pont, hiszen a járműre ható külső erők zöme itt, a kerék és a talaj érintkezési felülete között ébred. Két példán szemléletesen bemutatható e folyamatok fontossága. Ahogy egy jármű halad az útfelületen, a különböző kormányzási, gyorsítási és fékezési műveleteknél mind a négy kerék alakja és a rájuk ható külső erők nagysága, iránya folyamatosan változik. Mivel a tapadás során létrejövő oldalerők kanyarmenetben a kanyar középpontja felé mutatnak, és ezen erők a talaj síkjában ébrednek, így eredőjük a jármű tömegközéppontjára forgatónyomatékot fejt ki, méghozzá azt a kanyarból kifelé döntve. Ekkor a külső íven lévő kerekek terhelése jelentősen megnövekedhet, míg a belső íven lévőké jelentősen csökken, például fokozatosan élesedő kanyar esetén. Intenzív fékezésnél a járműre ható hosszirányú erők szintén a talaj síkjában ébrednek, és eredőjük olyan forgatónyomatékot fejt ki, mintha a jármű orra akarna bukni, az első tengelyen elhelyezkedő kerekek terhelése megnövekszik, és a hátsó kerekek tapadása akár teljesen meg is szűnhet. A két példa során a megcsúszást követően egy kellő rutinnal nem rendelkező, de akár egy gyakorlott vezető is elvesztheti a jármű feletti irányítást, ha a jármű nem tartalmaz olyan elektronikus vezérlő egységeket (*ECU – Electronical Control Unit*), amelyek ilyen esetekben be tudnak avatkozni.

A jelen cikkben ismertetett kerékmodell célja, hogy végső formájában képes legyen visszaadni a kerekek és a talaj között ébredő

külső erőket bármilyen kormányzási, hajtási-fékezési művelet esetén. Miért olyan fontos ez? Ha e négy erő ismeretes – a légellenállástól eltekintve –, a jármű menetdinamikai viselkedése biciklimodellnél pontosabban írható le, és e mennyiségekre támaszkodva megfelelő algoritmussal szabályozhatóvá válik. A végső cél egy olyan járműmodell megalkotása, melynek segítségével a járművekben alkalmazott menetdinamikai stabilitásért felelős elektronikus vezérlőegységek (ECU) hatékonysága jelentősen növelhető.

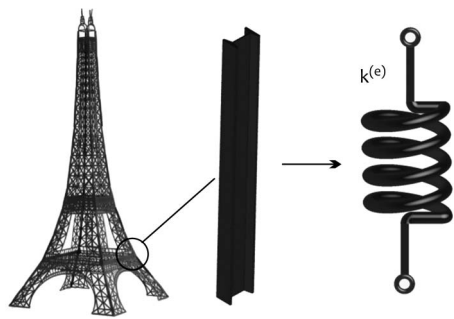
A kerékmodell szerkezete

A járműre ható külső erők a deformálódott kerekek és a talaj közös érintkezési felületein ébrednek, ha eltekintünk a haladási sebességgel egyre erőteljesebben növekvő légellenállásból származó „fékező” és a különféle karosszériakialakítástól függő, talajra leszorító vagy emelő erőktől. Ha egy kerék terhelése növekszik, a talajérintési felülete és ezáltal a tapadása is fokozódik, ha a terhelése csökken, a felület és a tapadás is csökken. Forgó kerék esetén a gumiabroncs és a talaj alkotórészeinek egymáshoz viszonyított sebességétől is függ a tapadás. Tehát a kerék alakváltozásánál fontos szerepet kap a talajérintési felület meghatározása, és hogy e felületen hogyan oszlanak meg a külső erők, azaz milyen, a felületre merőleges normál-, és a felülettel párhuzamos érintőirányú feszültségek ébrednek. Mivel ezen erők nem egyenletesen elosztva terhelik az említett felületet, és a talajt érintő pontok sebességei egymástól különbözőek, így a kerék kerületi pontjai eltérően tapadnak vagy csúsznak, attól függően, hogy milyen lesz a talajjal párhuzamos (tangenciális) feszültségek eloszlása. Így a jármű aktuális menetdinamikai viselkedésétől függően a kerék talajérintési felületén megkülönböztethetők tapadó,

csúszó és átmeneti felültrészek (Lacombe, 2000). A gumianyagok érintkezési felületén fellépő súrlódási erőket – a szennyezőanyagoktól és folyadékfilmrétegektől eltekintve – a szakirodalom (Pálfi, 2010) többnyire két részre bontja: adhéziós és deformációs (histerézis) komponensre. Az adhéziós komponens a két felület molekulái között kialakuló kötésekkel fakad, míg a deformációs komponens a felületi érdességtől, a keményebb anyagnak a puhábbba való benyomódásából, és ezen érdességcsúcsok között fellépő nyírásból származik.

A fentiek alapján a kerék és az útburkolat között lejátszódó fizikai jelenségek megértéséhez és matematikai leírásához a végeselem módszer érdemes alkalmazni, mely által a teljes kerék felépíthető a modellben definiált építőkövekből. Az alapelemek meghatározásánál a kiinduló gondolat a mechanika egyik ágából, a statikából ismeretes rácsostartós szerkezetek kialakításából eredt. Ezen szerkezetek eredetileg olyan építmények általános és kritikus terhelésének meghatározását, modellezését hivatottak megvalósítani, amelyek rúdelemekből épülnek fel, például vasúti hidak, épületek belső acélváza vagy távvezeték-tartó villanyoszlopok. A *3. ábrán* baloldalt az Eiffel-torony látható, középen kiemelve egyetlen tartó rúdelem, illetve a helyettesítő képe. A rugó szimbolizálja a csak rugalmas alakváltozásokat. E módszerrel a mérnökök jó közelítést kapnak a különféle terhelések során kialakuló állandósult (stacioner) alakra, illetve az elemekben ébredő belső erőkre. A rendelkezésre álló rúdelemek keresztmetszetei a tervezésnél ismeretesek, így az elemekben ébredő mechanikai feszültségekre méretezhető ezen eljárással a megépítendő szerkezet.

A kerékmodell alapötlete, hogy a rácsostartóknál ismeretes rúdszerkezetek anyagi



3. ábra • Példa rácsostartóra (Eiffel-torony), egy elem kiragadva és helyettesítő képe.

tulajdonságait – melyek összefoglalóan rugalmas tagként ismeretesek – egy csillapítási taggal kibővítve a szerkezet időbeli változása is megfigyelhető, nem csupán az állandósult, alakváltozás lezajlása utáni állapot.

Erre azért van szükség, mert különböző terheléseknél nem evidens, hogy a kerék területének egyes pontjai mikor és hol érintik a talajt, hiszen a kerületi pontok az alakváltozások során nem állandó távolságra vannak egymástól. A rácsostartókhoz hasonlóan tehát a kerékmodell építőelemei között szerepelnek rúdelemek, kapcsolódási pontok (idealizált csuklók) és megtámasztások (kényszeretek), valamint szükséges bizonyos csomópontokhoz rendelt külső erők ismerete is. Ez utóbbira példa egy kerékre jutó terhelés (a jármű tömegének bizonyos hányada) vagy a motor által leadott és a keréktengelyre átszarmasztatott nyomaték (erőpároként kezelve). A csomópontok (kapcsolódási pontok) idealizált csuklók, azaz nem képesek nyomatékot átadni, csupán erőket. A rugós vagy rugalmas tag olyan tényezőt jelent, amely egy elem alakváltozása és a benne ébredő belső erő között teremt lineáris kapcsolatot, azaz egy konstans szorzó. E rugalmassági tényezőt szokás rugómerevségnek is hívni, hiszen első-

ként a rugóknál alkalmazták e fogalmat, és ilyen elven működnek a rugós erőmérők is, ahol (bizonyos határok között) a megnyúlással arányos lesz a mérendő erő. Jelképi jelölése egy rugó, ahogy ez a 3. és 4. ábrán is látható; betűjele: „k”, egyes szakirodalmakban jelölésük „s” (*springconstant*).

A rugalmassági tényező fizikai jelentése és számítása a szerkezeti anyagoknál:

$$k^{(e)} = \frac{A^{(e)} \cdot E_{\text{anyag}}}{L^{(e)}} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right] \quad (1)$$

ahol $A^{(e)}$ az (e) elem keresztmetszet, E a Young-modulus, L az (e) elem hossza. Ebből a tagból eredően egy belső erő ébred a $k^{(e)}$ rugalmas tényezővel rendelkező elemekben (Hooke-törvény):

$$P_k^{(e)} = k^{(e)} \cdot \delta^{(e)} [\text{N}] \quad (2)$$

ahol $\delta^{(e)}$ az (e) elem hosszváltozását, a megnyúlás mértékét jelenti (méter), $P_k^{(e)}$ pedig a rugalmas tagból eredő belső erőt, melynek iránya a terhelő külső erővel ellentétes.

A csillapítási vagy csillapító tag ennél kis mértékben összetettebb, hiszen az elem alakváltozási sebessége, annak időbeli lezajlása (az elmozdulás idő szerinti deriváltja) és az elemekben ébredő belső erő között teremt kapcsolatot. A jelképi jelölése egy dugattyú, ami a 4. ábrán már a rugós taggal összevonva látható; betűjele: „c” (*dampingfactor*). A csillapító tag megakadályozza a végtelen gyors alakváltozás kialakulását. Minél gyorsabb, minél intenzívebb az alakváltozás, azaz minél gyorsabb a terhelő külső erő változása, annál nagyobb belső erő ébred a csillapítási tagból eredően:

$$P_c^{(e)} = c^{(e)} \cdot \dot{\delta}^{(e)} [\text{N}] \quad (3)$$

ahol $\dot{\delta}^{(e)}$ a rúdelem hosszváltozásának sebességét jelöli. A csillapítási tag kifejezése anyagi

jellemzőkkel nem olyan evidens, mint a rugalmas tagnál. Ami azonban megállapítható, hogy különböző hosszúságú, de azonos anyagú elemeknél hasonló viselkedést feltételezve (arányos megnyúlás) a csillapítási tagnak is fordítottan arányosnak kell lennie az elem hosszával.

A 4. ábrán látható egy tetszőleges rúdelem jelképi jelölése, ilyenekből épül fel az 5. ábra kerékmodellje. A rugalmas és csillapító tagot azért érdemes párhuzamosan kapcsolni, mert így hosszuk és megnyúlásuk is azonos lesz, és így egy változóval felírható a rúdelem differenciálegyenlete, a (4) egyenlet szerint (az alakváltozásnál a megnyúlás sebessége a megnyúlás mértékének idő szerinti deriváltja).

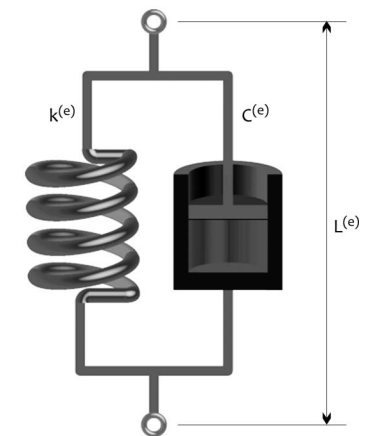
A síkbeli kerékmodell jelenlegi formája az 5. ábra bal oldalán látható, a jobb oldali részlet pedig a tervezett térbeli modell kialakítását szemlélteti. E cikk csak a sík kerékmodell részletezi.

A rácsostartókra igaz még – ahogy a kerékmodellre is –, hogy minden elemekben csupán rúdirányú és a rudak szimmetriatengelyén áthaladó hatásvonalú belső erő ébredhet. E belső erők az alakváltozásból (δ), és az alakváltozás sebességéből ($\dot{\delta}$) erednek, és e két hatás összege adja a vizsgált elemekben ébredő teljes belső erőt ($P^{(e)}$) (felsőindex: egy elemre vonatkoztatva). Így a (2) és (3) egyenlet összegéből következik:

$$P^{(e)} = k^{(e)} \cdot \delta^{(e)} + c^{(e)} \cdot \dot{\delta}^{(e)} \quad (4)$$

A modellt alkotó rúdelemeknek nem szükséges ismert vastagsággal rendelkezniük, azonban az (1) egyenlet alapján minden rúd rendelkezik keresztmetszettel és Young-mo-

¹ Ezáltal rúdelemekben csak húzó-, illetve nyomóerők ébredhetnek a szerkezeten belül, azaz nincs nyíró, csavaró és hajlító igénybevétel, valamint a kerékmodell eltekint a kihajlás jelenségétől.

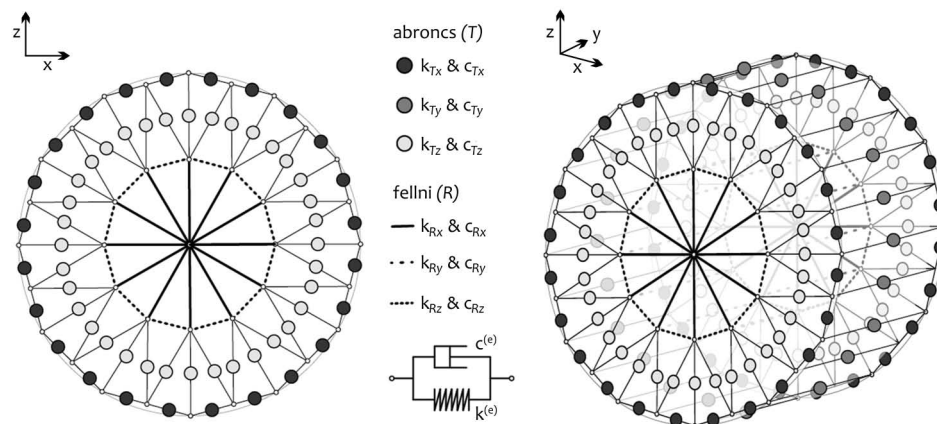


4. ábra • Párhuzamosan kapcsolt rugalmas és csillapító tag

dulussal (húzó rugalmassági modulus). Ezek pontos ismerete a modell számára nem lényeges, ugyanis a k és c paraméterek illeszthetők. A tényezők szempontjából lényeges tulajdonságok egy adott méretű kerékre ismertek, melyek a geometriai jellemzők (a fellni és az abroncs sugara) és a modell finomságától (N szögeosztástól) függő $L^{(e)}$ elemek hossza.

A dinamikai viselkedés szempontjából elengedhetetlen, hogy a rendszer rendelkezzen tömeggel. Terhelésnél értelemszerűen a keréktengelyre helyezett tömeg a domináns, azonban a csomópontokba helyezett kis tömegekkel a kerék súlya is figyelembe vehető. A jármű súlyához viszonyítva e kicsi tömegek a rendszer dinamikáját gyakorlatilag nem befolyásolják, így akár el is hanyagolhatók.

Belátható, hogy egy eredetileg terheletlen, majd a 0. időpillanatban terhelő erővel rendelkező szerkezet esetén a kezdeti időpontban minden erő a szerkezet tömegének gyorsítására fordítódik. A folyamat kezdetekor az elemekben ébredő belső erők lényeges része az alakváltozás sebességéből ered, hiszen ekkor még az elemek nem rendelkeznek számotte-



5. ábra • A síkbeli és a kiterjesztés után tervezett térbeli kerékmodell képe. Különböző árnyalattal a különböző tulajdonságú tagok. R: felni (rim); T: abroncs (tire)

vő megnyúlással. Ezt követően fokozatosan az alakváltozásból eredő belső erő veszi át a meghatározó szerepet, és a folyamat egészen addig tart, amíg az alakváltozás megáll, a kerék felveszi végső alakját, amikor is a csomópontok gyorsulása és elmozdulási sebessége nulla lesz. Ez az eset természetesen akkor áll fenn, ha a kerék állandósult állapotában álló helyzetben marad, például sík talajon az álló jármű súlyának negyede terheli az egyik kereket, vagy gyorsítás után, fékezés hatására a kerék megáll. Ha az állandósult állapotban a kerék egyenletes szögsebességű forgómozgást végez, a modell alkotó elemekben periodikus folyamatok zajlanak le.

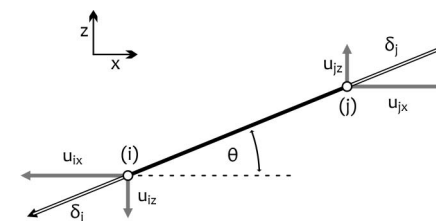
A korábbi gondolatmenetet folytatva, a kerék szerkezete teljes egészében modellezhető ilyen rugalmas és csillapítási tagokkal felruházott elemekkel. Az 5. ábrán a különböző árnyalatú pöttyök és vonaltípusok különböző rugalmas és csillapítási tagokat jelölnek. A jelölés megválasztása csupán a szemléltetést szolgálja. Fontos megjegyezni: a felni és a gumibroncs eltérő szilárdsága is kezelhető ilyen elemekkel úgy, hogy két-három nagyság-

renddel merevebb jellemzőkkel rendelkeznek a felni alkotó elemek. A rugalmas és csillapítási tagok segítségével a gumibroncs és a felni anyagának eltérő viselkedése is leírható; például ha a két anyag rugalmas és csillapítási tagjainak arányai eltérnek, más dinamikájúak lesznek: gyors és minimális deformáció, vagy lassú, de jelentős alakváltozás. Ha az abroncs kerületi (az 5. ábrán sötét pöttyök) és sugárirányú (világosabb pöttyök) elemeinek anyaga azonos, a hosszúságuk eltérősége miatt – akár csak a különböző hosszúságú, de azonos anyagú rugóknál, az (1) egyenlet alapján – a rugalmas és csillapítási tényezőjük különbözni fog (az ábrán más árnyalattal vagy vonaltípussal jelölve). Emellett egyes abroncs-kerületi pontokhoz nem egy, hanem két darab abroncs sugárirányú elem (későbbiekben: belső elem) csatlakozik (5. ábra). A duplázott elemek rugalmas és csillapítási tulajdonsága nagy N szögosztásértékekre megközelítően a fele a szimpla elemek rugalmas és csillapítási tényezőinek, amivel a kerékmodell számol, de az 5. ábrán az átláthatóság érdekében ez nincs külön megjelölve.

A kerékmodellt alkotó szerkezeti elemek nem rendelkeznek önsúllyal, mert a kerületi elemek dinamikai tulajdonságának megőrzése érdekében, ahogy a rugalmas tag is fordítottan arányosan nő a hossz csökkenésével, úgy a tömeg is ezt tenné. A rúdelemek önsúlyának elhanyagolásából származó számolási hiba elhanyagolhatóan kicsi – a kerék és a jármű tömege közti nagyságrendbeli eltérés miatt –, azonban magasabb haladási sebességeken valószínű, hogy a felni tömegének, tömegeloszlásának szerepe jelentőssé fog válni. Ebben az esetben a korábban említett módon a tömeg nélküli csomópontokhoz – őket átalakítva tömegközéppontokká – tömeg rendelhető.

Megvalósítás

A kerékmodell tárolja az elemek és csomópontok kapcsolódási viszonyait, a kerék kezdeti geometriáját (5. ábra), illetve az aktuális megtámasztásokat (kényszereket), azaz hogy mely csomópontok érintik a talajt, és e pontoknál milyen deformációk jöttek létre a talaj anyagában. Ezek alapján minden időpillanatban számolja a kerékmodellt a csomópontok gyorsulásait, sebességeit és elmozdulásait, majd ezekből az elemekben ébredő belső erőket, valamint a talaj és gumibroncsrészek között létrejövő érintő- és merőleges irányú erőket.



6. ábra • Az i és j tetszőleges csomópontok által közrefogott rúdelem

A számítási algoritmus maga a kerékmodell lelke, lényegében az elmozdulás módszer van átszabva és kibővíve az aktuális mechanikai problémára. A kerékmodell minden egyes csomópontra egyensúlyi egyenleteket ír fel, amelyeket „összegezve” megkapja a teljes szerkezet differenciál-egyenletrendszerét. Ehhez szükség van a rúdelemek lokális koordináta-rendszeréből (minden rúdelemnél egyéni, és időben változó) való áttérésre a kerékmodell globális koordináta-rendszerébe (az 5. ábra és a 6. ábra koordináta-rendszere). Az elemek lokális koordináta-rendszerében a megnyúlás egy dimenzióban történik, mindig a rúd hatásvonalán. E hatásvonal Θ állásszöge azonban változhat, így célszerű a rúdelemet közrefogó csomópontok elmozdulását tekinteni, és ezeket függőleges és vízszintes irányú komponensekre bontani. Így bármely rúd megnyúlása felírható a közrefogó csomópont négy elmozduláskomponensével. Az (5) egyenletben a két tetszőleges i és j csomópontok által közrefogott elem megnyúlása látható:

$$\delta^{(e)} = -u_{ix}c\Theta - u_{iz}s\Theta + u_{jx}c\Theta + u_{jz}s\Theta \quad (5)$$

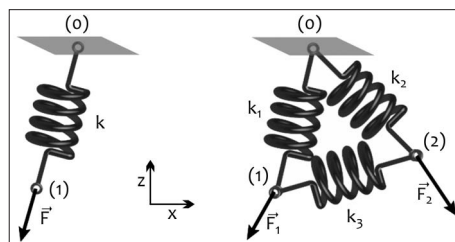
ahol $c\Theta$ a koszinusza, $s\Theta$ pedig a szinusza a Θ állásszöggel rendelkező rúdelemnek (6. ábra). Az (5) egyenletet deriválva a megnyúlás sebessége is megkapható, majd ezeket a (4) egyenletbe beírva, és a szögfüggvényeket az elem anyagi tulajdonságaival együtt két mátrixba foglalva:

$$\underline{f}^{(e)} = \underline{K}^{(e)} \cdot \underline{u}^{(e)} + \underline{C}^{(e)} \cdot \underline{\dot{u}}^{(e)} \quad (6)$$

Az összes elemre felírható ezen egyenletrendszer, majd ezeket csomópontonként összegezve a csomóponti egyensúlyi egyenletrendszerek is, melyeket egységes formába rendezve a teljes rendszer egyenletrendszere is megalkotható.

Erre egy egyszerű példa (a 7. ábra bal oldali részlete), ha egy rugót felfüggesztve, majd F erővel terhelve a rugóban csupán rugóirányú erők ébredhetnek, így a rugó szimmetriatengelye egybe fog esni a terhelő erővel. Ekkor nem szükséges a lokális-globális koordináta-rendszerek használata, elég, ha az erő hatásvonalának egyenese van csupán figyelembe véve, és az ébredő belső erő nagysága megegyező a terhelő erővel.

Ha azonban három rugót a végeiknél összekapcsolunk (a 7. ábra jobb oldali részlete), e kapcsolódási pontokból egyet felfüggesztve és így terhelve a másik két kapcsolódási pontot, már nem lehetséges a problémát az előző esetben tapasztalt evidens módon megoldani, csak részekre bontással, csomóponti egyensúlyi egyenletekkel. Eszerint minden – a példában a (0), (1) és (2) – csomópontra fel kell írni a vektoriális erőegyensúlyt, ahol a belső erők tovább bonthatók a (2) egyenlet szerint. Ezután (síkbeli esetet feltételezve) minden erő felbontható függőleges, z-irányú és vízszintes, x-irányú komponensekre – a (6) egyenlet szerint, csak a csillapítás tagot elhagyva –, így minden csomópont esetén két egyensúlyi egyenlet lesz, a két komponensnek megfelelően. Az összes csomópont mindkét irányú komponensét tartalmazza az $\underline{f}$ külső erők vektora és az $\underline{u}$ csomóponti elmozdulások vektora a (7) egyenlet szerint.



7. ábra • Egyetlen rugó és háromszögbe kapcsolt rugók terhelése

$$\underline{F} = \underline{K} \cdot \underline{u} \quad (7)$$

A 7. ábra jobb oldali példáját tekintve a vektorok hossza 6, a K mátrix mérete pedig 6×6 , amely nem csak az elemek rugalmas tényezőjét, hanem az elemek helyzetét is magába foglalja. Tehát globálisan szemlélve a problémát, nemcsak az elemek merevségétől (rugós tag), azaz az anyagi jellemzőiktől függ, hanem az elemek helyzetétől, a globális koordináta-rendszerben vett állászhözgeiktől is.

A folyamatot nem részletezve, a kerékmodell elemeire nézve, kiegészítve a (6) egyenletet a csomópontokban elhelyezkedő tömegekkel, a csomóponti erők szerint az alábbi mátrixos formába rendezhető a teljes rendszer egyensúlyi egyenletrendszer:

$$\underline{\ddot{f}} = \underline{K} \cdot \underline{u} + \underline{C} \cdot \underline{\dot{u}} + \underline{M} \cdot \underline{\ddot{u}} \quad (8)$$

ahol $\underline{f}$, $\underline{u}$ és deriváltjainak vektorai már a rendszer összes csomópontjának függőleges és vízszintes komponenseit magukba foglalják. Tehát a (7) és (8) egyenletekben már nincs (e) felsőindex, hiszen ezek nem egy-egy elemre, hanem a teljes szerkezetre vonatkoznak. Természetesen, ha egyedül a kerék középpontjába helyezett terhelés (mint tömeg) van figyelembe véve, akkor az M tömegmátrix csupán két elemet tartalmaz (x és z irányú komponense a kerékközépponthoz kapcsolódóan).

Egy másik példában két rugót párhuzamosan felfüggesztve, végpontjaikat egy elemmel összekötve, és így erővel terhelve a rugók azonos megnyúlást szenvednek. E két rugót függőlegesen szimmetrikusan, a kapcsolódási pontnál hegyesszöget bezárva és így felfüggesztve, valamint az előző esethez használt erővel terhelve, az előző esethez képest a megnyúlás eltérő, nagyobb lesz, mert a két elem így nagyobb belső erő ébred. A modell finomságát kifejező, részben szabadon állítha-

tó paraméter (csupán 4-nél nagyobb páros szám) a szögosztás, amely a fellni belső eleminek számát jelenti. Ezt N -nel jelölve a modell

$$3N + 1 \quad (9)$$

csomópontot, és

$$7N \quad (10)$$

darab elemet tartalmaz. Természetesen az N érték növelésével egy iteráció futási ideje fokozatosan növekszik, ami néhány szögosztásnál az 1. táblázatban olvasható.

N szögosztás (db)	egy iteráció futási ideje (ms)
4	5,1
10	13
20	20,7
50	56
100	135
200	460

1. táblázat

A kerékmodell a Matlab-forráskód (M-code) felületén került implementálásra, mely a C programozási nyelvhez hasonló programnyelvet használ. A Matlab használatának fő oka a vektor- és mátrixműveletek széles körű és gyors kezelése. A kerékmodell forráskódja számos olyan programozástechnikai megoldást tartalmaz, amellyel a futási idő még tovább csökkenthető. Ilyen például az egyes rúdelemek lokális koordináta-rendszereiből a teljes modell globális koordináta-rendszerébe történő váltás során használatos – az (5) egyenletben látható – szögfüggvények kiküszöbölése. Ugyanis elméletben ismertnek kell lennie minden egyes rúdelem szögének, majd ezek megfelelő szögfüggvényeinek kombinációjából egy „átkonvertáló” mátrixot kell

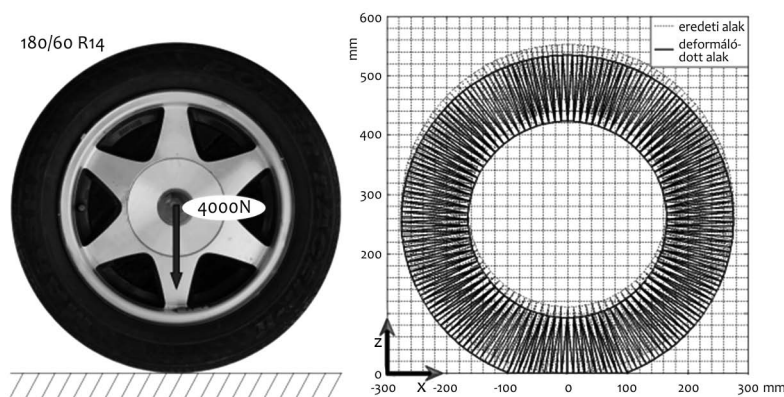
képezni minden rúdelemre (e mátrix már összevonva látható az anyagi jellemzőkkel a (6), (7), és (8) egyenletekben). Itt a köztes lépések helyett a kerékmodell egy egyszerűbb és gyorsabb módszert alkalmaz.

Az idő szerepe kiemelten fontos a diszkrét idejű kerékmodell-számításában. A numerikus számítások elvégzéséhez szükséges megfelelő futási idő és pontosság biztosításához az algoritmus változó lépésközzel dolgozik. A talajérintési pontok minél pontosabb meghatározását a mintavételezési idő növelésével, míg a megfelelő futásidőt az állandósult állapot körüli mintavételezési idő csökkentésével biztosítja.

A modell tehát megszámlálhatóan sok elemre bontja a kereket; a kerékmodell ezen elemek alakváltozásait képes számolni, majd ezeket összegezve képes meghatározni a kerék alakját és az ébredő erőket a kerék anyagán belül, valamint a talaj és kerék érintkezési felületén.

Pontok talajérintése

A kényszerek vagy más néven megátmasztások a kerékmodell egyik leglényegesebb pontját képezik. A kezdeti időpillanat egy idealizált eset, amikor is a deformálódástól mentes kerék egyetlen pontban érinti a talajt – hiszen a kerék önsúlya zérusnak van véve –, ilyen formában látható a modell az 5. ábrán. A modell jelen állapotában a forgómozgást végző kereket még nem képes megfelelően leírni, így az álló helyzetben terhelt kerék alakváltozásának bemutatására kerül a fő hangsúly. A külső és belső erőktől mentes kerékmodellnél a jármű súlyának megközelítően a negyedét a keréktengelyre helyezve egy csak függőleges irányú erőkomponens terheli a modellt, megindul az alakváltozás. E folyamat a függőleges tengelyre ideális



8. ábra • 180/60R14-es kerék valóságbeli alakja, modellbeli képe 4000N-s terheléssel a deformálódás előtt és utáni alakkal

esetben szimmetrikus, és az első érintkezési ponttól a kerületen két irányban haladva az abroncs kerületi pontjai párosával érkezik le a talajra. A deformálódás során a kerületi pontok lefelé és a z tengelytől távolodva haladnak. A leérkezés pillanatában a kerületi pontok „hozzáragadnak” a talajhoz, új függőleges (a talaj anyagának összenyomása) és vízszintes (csúszás-tapadás) kényszerek jelennek meg. A kerékmodell a talaj anyagát is a kerék anyagához hasonlóan paraméterezi, ezek a talaj szilárdságát reprezentálják. Az értékeket a felni anyagát megközelítő nagyságrendűre választva, a talaj deformációja μm nagyságrendbe esik. Ennél lágyabb anyagú talaj esetén a talajrészek deformációja egyre látványosabb, akár összemérhetővé is tehető az abroncsnál tapasztaltakkal (például homok vagy hó esetén). A kerékmodell tehát képes a talaj anyagában létrejövő alakváltozásokat is kezelni.

Álló kerék alakváltozása

A kerék középpontját terhelő nehézségi erő hatására a kerékmodell alkotó elemekben belső erők ébrednek, a helyzetük, a hozzájuk

tartozó anyagi jellemzők és a külső erő(k) függvényében. Forgómozgást nem végző kerék esetén az alakváltozás a függőleges tengelyre szimmetrikus alakot eredményez.

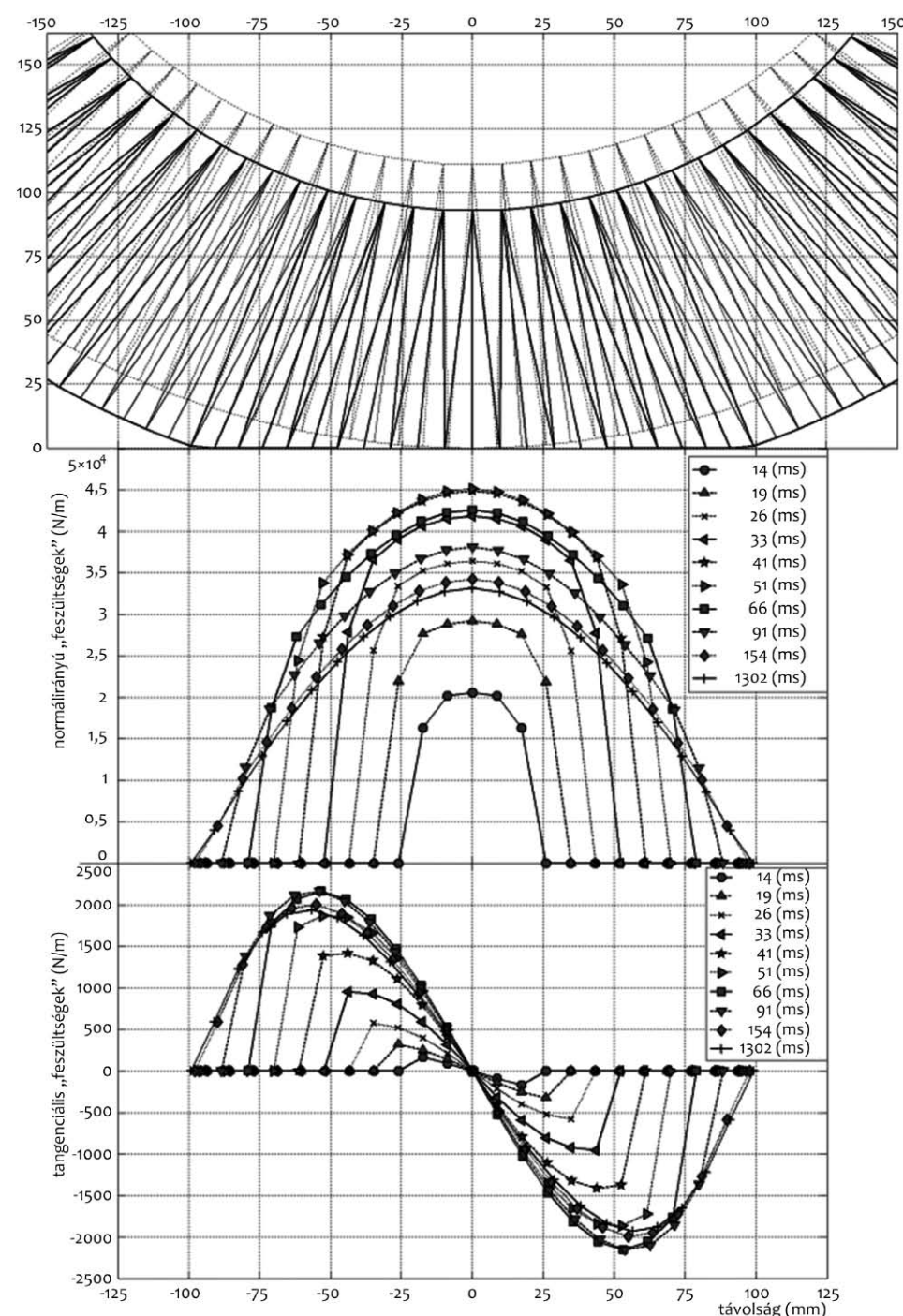
ζ_{KT}	ζ_{CT}	ζ_{KR}	ζ_{CR}
10^3	10^2	10^6	10^2

2. táblázat • A példában használt paraméterek²

A 8. ábrán jobb oldalon egy 180/60R14-es kerék síkbeli modell szerinti képe látható (a kerék nyugalmi sugara: 276,1 mm, a felnié pedig 165,1 mm), a kiindulási és a deformálódott alakjával. A példában használt szögosztás: $N = 100$. Az origó a deformálódástól mentes kerék talajérintési pontja.

A 9. ábrán legfelül a talajjal való érintkezési szakaszra közelítve látható a deformálódott alak. Térbeli kerékmodell esetén minden talajt érintő ponthoz rendelhető egy kis felületrész, amelyen a pontot terhelő erő megoszlik, amelyet a két anyag határán ébredő fe-

² Sűrűségek, amelyek N-től függetlenek, és amelyekből a k és c paraméterek származtathatók. Jelentése: a kerék-nél egy fok mekkora merevséget, csillapítást képvisel.



9. ábra • A kerék talajérintési szakasza (fent); a normál- és a tangenciális feszültségek (lent).

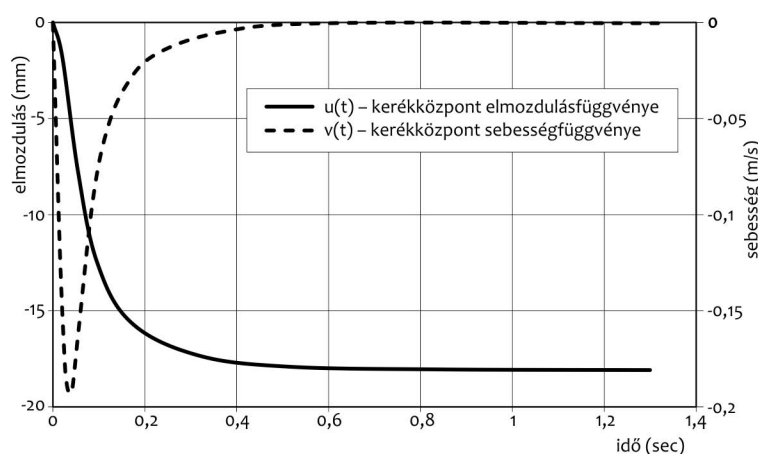
szültségnek nevezzük. Síkbeli modell esetén a keréknek nincs vastagsága, ezáltal csupán kis szakaszok rendelkeznek a pontokhoz, így mennyiségileg nem feszültséget ad a modell, hanem vonal mentén megoszló terhelést (N/m), ezért van a 9. ábrán idézőjelben az elnevezés, illetve továbbiakban feszültségként van említve a mennyiség. A 9. ábrán középen távolsághelyesen a felületre merőleges, és alul a felületre nézve érintő irányú „feszültségek” időbeli alakulása látható, amelyek a kerékre visszahatnak.

A negatív tartományban lévő feszültségek a koordinátatengellyel ellentétes irányba mutatnak, így a tangenciális feszültségek az origó felé irányulnak, a kerék csomópontjai a talajon az origótól távolodni „próbálnak”. A teljes talajérintési hosszra integrálva a normálirányú feszültségeket, megkapható a talajon ébredő erők eredője, melynek hatásvonala a szimmetria miatt az origón áthalad (a kerék középpontjára nem fejt ki forgatónyomatékokat), nagysága pedig állandósult helyzetben a nehézségi erővel egyezik meg. A tangenciális feszültségek függvénye szintén szimmetrikus, így a talajon ébredő oldalirányú erők eredője zérus,

a kerék álló helyzetben marad. A kilenc különböző időpontban felvett – a kerékmodell a közös időpontokban is számolta a feszültségeket – görbéből látható, hogy a vizsgált 1,3 másodperces időintervallum első tizedében (154 ms) zajlik le a változás zöme; a két utolsó időpontbeli görbe csupán abban tér el, hogy a talajt érintő pontok enyhén kifelé csúsztak.

A 10. ábrán látható a kerék középpontjának elmozdulás-idő és sebesség-idő függvénye, melyekről felismerhető, hogy a megadott paraméterekkel ebben a példában egy túlszilapított másodfokú rendszert ad a kerékmodell. A kerék középpontjába helyezett tömeg miatt a rendszernek van tehetetlensége, így a talajérintési ponton a normál feszültségek ~51 ms-ig (pontvonal és jobbra mutató háromszög), a tangenciális feszültségek ~91 ms-ig (szaggatott vonal és lefelé mutató háromszög) fokozatosan növekednek, majd „szétterülve” csökkennek. Az utóbbi három ábrát összevetve látható, hogy a kerék 1,8 cm-t mozdult el a ~400 kg-os terhelés (4000 N) hatására, és így a talajérintési szakasz nagysága 20 cm.

A deformációk lezajlásával kapott állandósult állapotra vonatkozó feszültséggörbék



10. ábra • A kerékközéppont elmozdulás- és sebességfüggvénye

jó egyezést mutatnak más síkbeli kerékmodelleknél kapott görbékkel.

Fejlesztési irányok

A következő sarkalatos lépés nyilvánvalóan a kerék megforgatása lesz. Ehhez elkerülhetetlen a pontos meghatározása azoknak az időpontoknak, amikor a talajt érintő pontok elengedik a megtámasztásukat. E számítást már tartalmazza a modell, azonban a talajon való csúszás – a korábban említett adhéziós és deformációs állapotok – folyamatának pontosítása még hátra van.

A kerék megforgatása nem hajtott kerék esetén egy vízszintes erőkomponens segítségével történhet, vagy hajtott kerék esetén a motor által leadott és a keréktengelyre átszármasztott nyomatékkal ekvivalens erőpárok

segítségével. Az előbbi egyetlen erőt a keréktengelyre, míg az utóbbi esetben az erőpárokat a fellni kerületi pontjaira érdemes helyezni, hiszen ennek anyaga minimális alakváltozást szenvedhet csak.

A már forgásban lévő keréknél a modell képes lesz a talajon eredő erőket, a 9. ábrához hasonlóan a feszültségeket és eredő görbületi ellenállást számolni, illetve közelítést adni arra, hogy a kerék milyen fokú csúszási állapotban van, mellyel később a jármű mozgásállapotának szabályozásához is hozzá tud majd járulni.

Kulcsszavak: járműdinamika, egynyomvonalú, ún. biciklimodell, kerék, gumibroncs, menetdinamika, rugalmas és csillapító tag, végelelemzési módszer

IRODALOM

- Lacombe, J. (2000): Tire Model for Simulations of Vehicle Motion on High and Low Friction Road Surfaces. In: *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. Hanover, NH, USA.
- Lundquist, C. – Schön, T. B. (2009): *Recursive Identification of Cornering Stiffness Parameters for an Enhanced Single Track Model*. Saint-Malo, France
- Pálfi L. (2010): *A súrlódás hiszterézis komponensének végelelem modellezése gumi-éres felület csúszó pár esetén (Phd-értekezés)*. Budapest
- Powers, W. F. – Nicastrì, P. R. (2000): *Automotive Vehicle Control Challenges in the 21st Century*. Elsevier

- Ramajani, R. (2006): *Vehicle Dynamics and Control*. University of Minnesota, USA–Springer ISBN 0-387-26396-9, e-ISBN 0-387-28823-6.
- Ray, L. R. (1997): Nonlinear Tire Force Estimation and Road Friction Identification: Simulation and Experiments. *Automatica*. 33,
- Roylance, D. (2000): *Trusses*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA Vable, Madhukar (2002): *Mechanics of Materials*. : Oxford University Press (Michigan Technological University), NY
- Yung-Hsiand, J. H. – Gerdes, C. J. A (2006): *Feel for the Road: A Method to Estimate Tire Parameters Using Steering Torque*. AVEC '06, Stanford, California, USA
- Zomotor Á. (2006): *Gépjármű menetdinamika*.: Maróti, Budapest

MEGÚJULÓ ENERGIAFORRÁSOK KOMPLEX INTEGRÁCIÓJA KISFESZÜLTSGŰ NEMLINEÁRIS TORZÍTOTT HÁLÓZATOKBAN

Görbe Péter Magyar Attila

tanszéki mérnök,
Pannon Egyetem Villamosmérnöki
és Információs Rendszerek Tanszék
gorbe.peter@virt.uni-pannon.hu

egyetemi docens,
Pannon Egyetem
magyar.attila@virt.uni-pannon.hu

Hangos Katalin

egyetemi tanár,
Pannon Egyetem
hangos.katalin@virt.uni-pannon.hu

A fukushimai nukleáris baleset óta az EU radikálisan megváltoztatta eddigi energiapolitikáját, ennek következtében sok atomerőműnek felfüggesztették a működését, és sok erőmű fejezi be működését a következő években. Ezek a változások radikálisan átrendezik az energiatermelési struktúrát a közeljövőben: a nukleáris energiatermelés jelentős csökkentése vagy leállítása miatt kieső termeléskapacitást minél nagyobb részben megújuló energiaforrásokból kívánják fedezni, elsődlegesen szél- és napenergia-hasznosítás – szélgenerátorok, illetve napelemek révén. A cél eléréséhez viszont nem elegendő nagykapacitású központosított erőművek létesítése, ezért jelentős szerep jut a jövőben nagy számban megjelenő háztartási (1–5 kW teljesítményű) kiserőműveknek is. A megújuló energiaforrások előre nehezen tervezhető jellege nagymértékben megnehezíti az így megtermelt

villamos teljesítmény integrálását a jelenlegi villamos teherelosztó rendszerbe, ha a megújuló forrásból termelt energia eléri vagy meghaladja a teljes termelés 10%-át (Battaglini et al., 2009). A háztartási kiserőművek integrálása egy európai szintű intelligens hálózatba (smart grid) azonban ígéretes lehetőségnek tűnik (Purvins et al., 2011).

Másrészről a jelentősen emelkedő olajárak és a klímaváltozás lassítása érdekében kitűzött CO₂-kibocsátáscsökkentés jelentősen érinti a közlekedési infrastruktúrát is. A lehetséges járműhajtási alternatívák között egyre gyakrabban merül fel a teljesen elektromos hajtású járművek (EV) elterjedése, aminek elsődleges akadálya a lítium-ion (Li) akkumulátorok jelentős tömege és ára, valamint még nem teljesen megoldott a lemerült akkumulátorok gyorsított elhasználódása. További probléma a szélsőséges időjárási viszonyoknak (–30°C– +80°C) kitett

akkumulátorok pillanatnyi kapacitásának és az adott hőmérsékleten még hasznosítható tárolt töltésének meghatározása. Az elektromos járművek elterjedésével szükség lesz hőmérsékletfüggő gyorsított elhasználódási módokra, melyek hőmérsékletfüggő akkumulátormodelleket igényelnének, mivel a töltési, kisütési és kapacitást megadó paraméterek erősen függenek a cellák hőmérsékletétől (Bandhauer et al., 2011; Gölle et al., 2012; Johnson et al., 2000), ezért korrekt jellemzésükhöz a hőmérsékletet is figyelembe kell venni.

A fotovoltaiikus panelek és szélgenerátorok optimális munkapontban történő üzemeltetését a költséghatékonyság és a csökkenő megtérülési idő, míg a költséges Li-akkumulátorok optimális működtetését az élettartamuk meghosszabbításának igénye teszi szükségessé. Szerencsére a két szabályozási feladat (a megújuló energiát villamos energiává alakító kiserőművek optimális üzemeltetése, és a Li-akkumulátorok optimális töltő/kisütő áramának pontos szabályozása) együttesen is kezelhető (Görbe et al., 2012).

A háztartási kiserőmű által megtermelt, de el nem fogyasztott villamos energia a transzformátorkörzet egyéb fogyasztói által felhasználásra kerül, illetve ha erre nincs igény, a transzformátoron keresztül bekerülhet a közép- és nagyfeszültségű villamos hálózatba is. A kiserőművek csatlakoztatására felépített szinkronüzemű inverterek alkalmasak lehetnek a kisfeszültségű hálózat kondicionálására, azaz üzemi paramétereinek (vesztesség, teljesítménytényező, teljes harmonikus torzítás) javítására is. Fontos, hogy ez a kondicionálás az egyszerű hálózati betápláláshoz képest nem igényel költséges elemeket, csupán csak az inverter szabályozási struktúrájának szoftveres átalakítását.

1. Háttér és motiváció

A megújuló energiaforrások hatékony felhasználásának kritikus feltétele az időben változó források maximális hatásfokú kihasználása mind technológiai, mind pedig gazdasági értelemben (Battaglini et al., 2009). Ehhez olyan intelligens energetikai rendszerek (*smart grid*) (Blumsack – Fernandez, 2012) szükségesek, amelyek befolyásolni tudják a pillanatnyi termelést, a pillanatnyi energiafelhasználást, valamint az energiátárolást is. A problémát elsősorban a jelentős kapacitású és gyorsan szabályozható energiátároló egységek jelentik, egyrészt a jelentős beruházási költség miatt, másrészt komplex jogi és környezetvédelmi problémákkal járnak (például a szivattyús-tárolós vízierőművek esetében), harmadrészt pedig sok esetben a földrajzi adottságok sem teszik lehetővé létesítésüket. Az elektromos járművek elterjedésével alternatív megoldásként jöhet szóba jelentős számú elektromos jármű csatlakoztatása a helyi hálózathoz, így tekintélyes és ugyanakkor gyorsan felhasználható tárolókapacitás lenne felhasználható (Purvins et al., 2011).

A jelenlegi kisfeszültségű hálózatok okos hálózat, vagyis smart grid alapú megközelítésének egy másik jelentős feladata a villamos energia minőségének folyamatos felügyelete és szabályozása. A háztartásokban használt mobiltelefon-töltők, notebook-tápegységek, kis teljesítményű motorvezérlők, híradástechnikai berendezések és számítástechnikai hálózati berendezések száma folyamatosan növekszik, ezzel együtt a bennük alkalmazott kisfogyasztású, egyszerű kapcsoló üzemi tápegységek száma is, ami káros hatással van a villamos energia minőségére. Ezek az egyszerű kapacitív bemeneti fokozatok jelentős magasabb rendű harmonikus komponens

hoznak létre a hálózaton, ami az eredendően szinuszos feszültség jelalaktorzulásához vezet. A felharmonikus komponensek közül a 3. és az 5. felharmonikusok rendelkeznek jelentősebb amplitúdóval. Ezek a torzító felharmonikus komponensek nem kompenzálhatók egyszerű sönt kapacitásokkal (kompenzátorokkal), és több nemkívánatos hatást is okoznak a kisfeszültségű hálózat működésében, melyek a hálózati veszteség növekedéséhez, és bizonyos amplitúdóarány felett a hálózat hibás működéséhez is vezethetnek.

A feszültség torzulásának mérőszáma a teljes harmonikus torzítás (THD), ami a következőképpen definiálható:

$$THD = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \frac{|U_k|^2}{|U_1|^2}}$$

ahol U_k a feszültség alapharmonikus komponensének effektív értéke, és U_n a feszültség n -edik magasabb rendű harmonikus komponensének effektív értéke. Az esetünkben vizsgált kapacitív bemeneti fokozatú alkalmazásokban $THD > 0$ a jellemző. Ez a torzítás már jelenleg is kimutathatóan jelen van a kisfeszültségű hálózatokban, és a kiserőművel kapcsoló üzemi háztartási tápegységek számának emelkedésével (kompakt fénycsövek, LED-világítás stb.) folyamatosan növekszik. A nemlineáris torzított (nem szinuszos) feszültség és áram időfüggvényekkel rendelkező kisfeszültségű hálózatokban korábban is alkalmaztak aktív teljesítményszűrőket a hálózatban jelen levő áram felharmonikusok csökkentésére (Limongi et al., 2009).

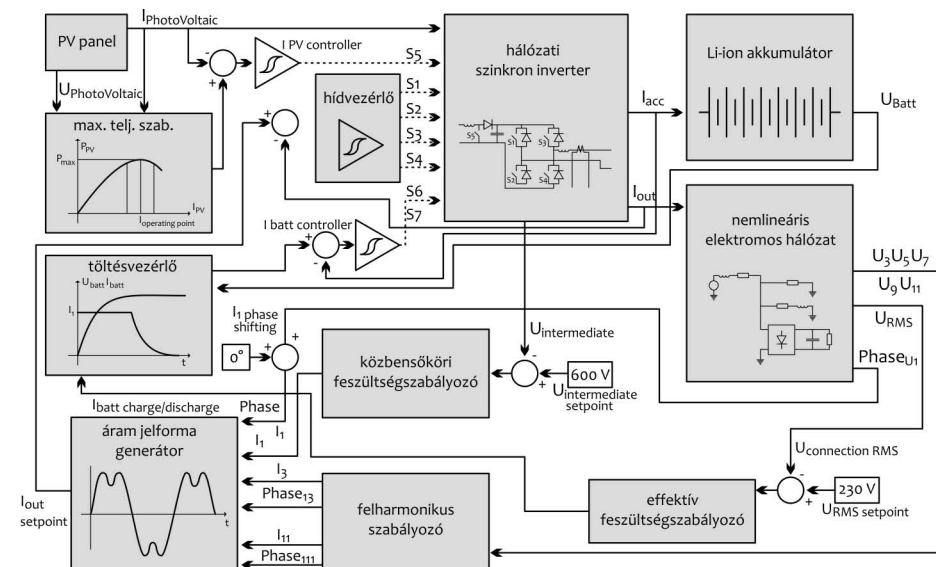
2. Teljes szabályozási struktúra

A korábban felvázolt egységes szabályozási cél megvalósítása egy összetett szabályozási struktúrával érhető el, ami egyszerre alkalmas a

kisfeszültségű nemlineáris hálózatban tapasztalt feszültségtorzítás csökkentésére a beinjektált felharmonikus áramkomponensek meghatározásával, a hálózatba beinjektált áram szabályozására, az akkumulátor töltő és kisütő áramának szabályozására, a közbenső kör pufferekapacitás feszültségének tartására és a hálózatbarát működési mód keretében a csatlakozási pont feszültsége effektív értékének szabályozására (1. ábra).

2.1 Maximális teljesítmény-szabályozó • Célja az adott időpillanatban rendelkezésre álló megújuló energia költségkímélő kinyerése a beruházás megtérülési idejének csökkentése érdekében.

2.2 Felharmonikus szabályozó • A komplex szabályozási struktúra legfontosabb eleme. Az irodalomban fellelhető megoldásokkal ellentétben a torzított áram időfüggvénymérése nem alkalmazható, mivel a háztartási kiserőmű jellemző módon a fogyasztásmérési pont után csatlakozik a kisfeszültségű hálózatra. Így a kompenzálni kívánt áram mérése csak külső árammérő eszköz csatlakoztatásával lenne megoldható, ami jelentősen megnövelné a telepítési költségeket. Másrészt a kompenzálni kívánt áram kívül esik az adott háztartáson, hiszen a felharmonikus szabályozó nemcsak az adott háztartás által hozzáadott nemlineáris torzítást, hanem a kisfeszültségű transzformátorkörzet adott fázisvezetőjén lévő egyéb torzító nemlineáris háztartási és ipari fogyasztók által létrehozott felharmonikus áramkomponenseket is kompenzálja. A szabályozó a csatlakozási ponton mérhető feszültséget vizsgálja a frekvenciatartományban, és a felharmonikus komponensek amplitúdójából képez egy – a torzítást jellemző – kvadratikusság hibafüggvényét, ami szigorúan monoton összefüggésben van a harmonikus torzítással. A felharmonikus szabályozó



1. ábra • A teljes szabályozási struktúra

működése során adaptív (változó lépésközü) gradiens módszert használ.

2.3 Töltésvezérlő • Feladata a Li-akkumulátor adott értékű töltő/kisütő áramának szabályozása.

2.4 Közbső körű feszültség-szabályozó • A közbenső körű feszültség-szabályozó felügyeli az inverter belső pufferekapacitásának feszültségét, és azt az előre beállított referenciaértéken (600 V) tartja.

2.5 Effektív feszültség-szabályozó • Az áramminőség javításának érdekében a jelen rendszer hiányában is lehetőséget ad a hálózat termelés/fogyasztás egyensúlyának fenntartására időben változó források és fogyasztók esetében is. Mivel a hálózat egészének fogyasztási/termelési viszonyairól így nincs információ, az áramminőség javításánál a kisfeszültségű transzformátorkörzet fogyasztási egyensúlyával foglalkozik. A transzformátor alul-, illetve túlterheléséről a beépítési pontban a

feszültség effektív értékének mérésével tájékozódik. Alapjele a hálózati feszültség effektív értékének szabványos értéke (230 V).

3. Modellelés és szimuláció

A nemlineáris torzított hálózat modellje Matlab Simulink környezetben került implementálásra az 1. ábra irányítástechnikai struktúrájának megfelelően.

3.1 Nemlineáris hálózat modellje • A nemlineáris hálózat modellje tartalmazza a transzformátor és a továbbító villamos vezetékek modellje mellett a különböző terhelések elemeit: tisztán ohmos terhelés, ami a hagyományos izzókat és fűtőszálakat, és az aktív teljesítménytényező-javítással ellátott berendezéseket, induktív ohmos terhelés, ami a kisteljesítményű egyfázisú motorokkal ellátott terheléseket (mosógép, fűnyíró, porszívó stb.), kapacitív nemlineáris ohmos terhelés, ami az egyszerű nemlineáris kapcsolóüzemi terheléseket reprezentálja.

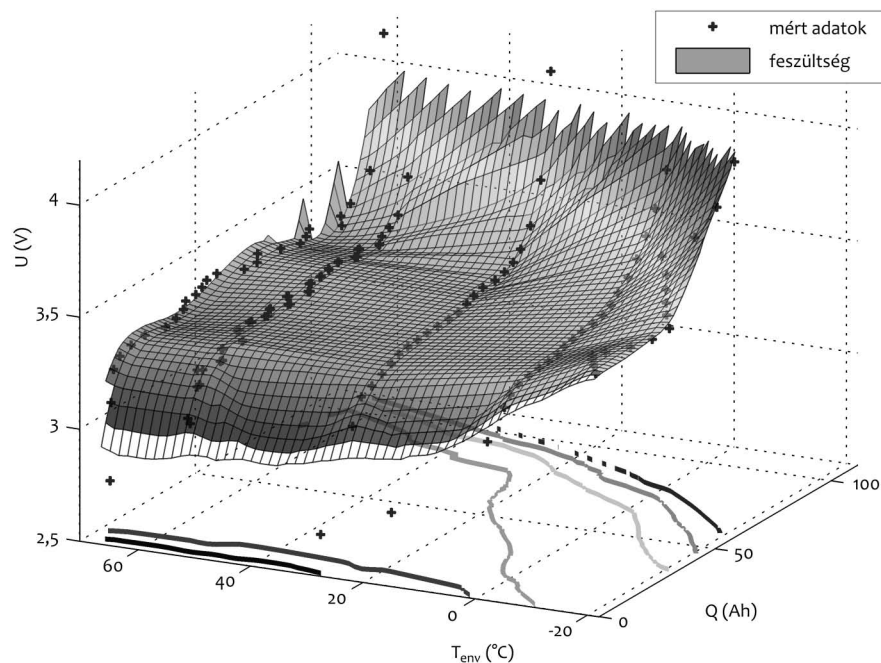
3.2 Villamosjármű-akkumulátor hőmérsékletfüggő modellje • Alapvető cél az akkumulátor modellezése a hőmérsékletfüggés figyelembe vételével (Göllei et al., 2012). A hőmérsékletfüggés különösen fontos az elektromos autókban alkalmazott akkumulátoroknál, mivel széles hőmérsékleti tartományban üzemeltetik őket.

Az akkumulátorfeszültség, a töltöttségi állapot és a környezeti hőmérséklet közötti összefüggés egy polinomiális függvénnyel közelíthető. Mivel a polinomiális összefüggés mögött nincs fizikai jelentés, a modell adott fokszámú becslés segítségével alkalmazható bármilyen más elektromos (lineáris és nemlineáris) energiatárolóra is. A kapocsfeszültség 95%-os konfidenciaszint melletti polinomiális közelítését a 2. ábra mutatja. Az akkumulátor hőmérsékletváltozása és a töltés, illetve a kör-

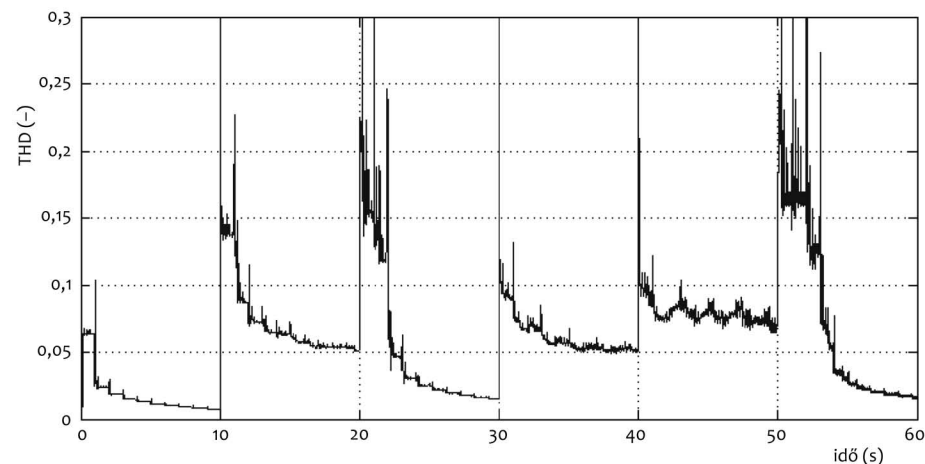
nyezeti hőmérséklet közti összefüggés egy negyedfokú polinomiális függvénnyel közelíthető. A közelítésnek természetesen a fizikailag értelmes környezeti hőmérséklet-, illetve töltéstartományon van értelme. A modell validálása a mérési körülményekkel teljesen egyező szimulációs példakörnyezetben történt.

3.3 Szimulációs eredmények • Első lépésben a modell ellenőrzésére került sor, a maximális teljesítmény-szabályozó és a közbensőkori feszültség-szabályozó működésének tesztelése céljából. A kapott eredmények a későbbi szimulációk összehasonlításakor referenciaként kerültek felhasználásra.

Következő lépés az inverternek az előzőleg szimulált hálózathoz való csatlakoztatása. Az akkumulátortöltő alapjelét nullára állítva, a felharmonikus szabályozót kikapcsolva a



2. ábra • Akkumulátor kapocsfeszültsége a töltöttségi szint és a környezeti hőmérséklet függvényében



3. ábra • A teljes harmonikus torzítás (THD) értéke a szabályozóalgorithmus működése közben

rendszer gyakorlatilag egy egyszerű hálózati szinkronüzemű háztartási kiserőműként működik. A feszültség esetén jelentős eltérés a referenciához képest nem nagyon tapasztalható, az inverter szintén kapcsoló üzemű működtetése a jelalak kismértékű zajosodását eredményezte. Az áram természetesen jelentősen változott, mivel az inverter áramot táplál vissza a hálózatba.

A bekapcsolt felharmonikus szabályozóval futtatott szimuláció végeredményeképpen a torzult jelalakok sokkal inkább szinuszos jellegűek, mint a felharmonikus szabályozó nélküli szimulációk esetén (Görbe et al., 2012).

A szimuláció során a felharmonikus szabályozó működése az idő- és a frekvenciatartományban is nyomon követhető, ahogy az adaptívgradiens-szabályozó az időszelvényekben

adott sorrendben változtatta a komponensek amplitúdó- és fázisértékeit (3., 5., 7., 9. és 11. felharmonikus), valamint ez komoly hatással volt a hibafüggvényre és a csatlakozási ponton mért THD-ra (3. ábra). Az eredményeket az 1. táblázat összesíti. A felharmonikus szabályozó működtetésével a teljes harmonikus torzítás 14,7%-ról 5,04%-ra csökkent, míg az alkalmazott hibafüggvény értéke 47,03 V²-ről 3,87 V²-re csökkent. Az akkumulátortöltés/kisütés bekapcsolása e szimulációs eredményekre nem volt hatással.

4. Diskusszió

A bemutatott eredmények alapján az elkészített multifunkcionális szabályozó alkalmas az energia optimális irányítására a megújuló energiaforrás, az elektromos hajtású jármű

üzemmód	I _{RMS}	hiba	THD
inverter ki	n. a.	39,63 V ²	14,26%
felharmonikus szabályozó ki	11,58 A	47,03 V ²	14,75%
felharmonikus szabályozó be	5,65 A	3,87 V ²	5,04%

1. táblázat • Futtatási eredmények – felharmonikus szabályozó hatása

akkumulátor és a kisfeszültségű teherelosztó hálózat között. Alkalmazásával a villamosenergia-igény lokálisan szabályozott formában előállítható, illetve a rendszer alkalmas a villamos energia minőségének javítására is. Ezen funkciók segítségével villamosenergia-megtakarítást, és ha a villamos energia egy részét vagy egészét fosszilis energiából állítjuk elő, CO₂-kibocsátáscsökkenést is elérhetünk. Az elosztott energiatermelésből adódó veszteségcsökkenés az elosztó rendszerben lévő transzformátor veszteségének megtakarítását, valamint a nagyfeszültségű és közepfeszültségű távvezetékek veszteségi teljesítményének megtakarítását jelenti, mivel az energiaszükségletet lokálisan a kisfeszültségű transzformátorkörzeten belül állítjuk elő a helyi fogyasztók számára. Magyarországon a transzformátorok és a teherelosztó vezetékek rendszer vesztesége 2008-ban az MVM statisztikai adatai alapján 9,72%-ra tehető, ami azt jelenti, hogy a teljesen elosztott termeléssel elérhető maximális veszteségcsökkenés 9,72%. Konzervatív becsléssel 5%-os megtakarítást vettünk figyelembe. A kialakított szabályozó jelentősen csökkenti a hálózati feszültség teljes harmonikus torzítását, ami a fogyasztók összegzett áramának teljes harmonikus torzítására is hatással van. Feltételezhető, hogy a fogyasztók együttes hatása a szabályozó felharmonikus áram betáplálásával összegezve közel ideális, tisztán valós impedanciájú ohmos fogyasztóvá összegződik, így a feszültség és az áram teljes harmonikus torzítása jó közelítéssel megegyezik (Görbe et al., 2012).

A módszer alkalmazásával létrejövő teljes harmonikus torzítás-csökkenés miatt a fázisvezető veszteségi teljesítménye 1,75%-kal, a nullvezető veszteségi teljesítménye 5,75%-kal (Görbe et al., 2012) csökkent az ideális szinuszos eset veszteségi teljesítményéhez képest.

Az átlagos vezetékvesztési teljesítmény 4%-kal figyelembe véve az átlagos háztartás veszteségi teljesítményének csökkenése mintegy 0,3% a teljes villamos energiafogyasztást tekintve. Az eredmény eléréséhez nem szükséges külön beruházás, elegendő a meglévő komplex inverter szabályozó szoftverének módosítása, azaz a felharmonikus szabályozó implementálása. Egy átlagos háztartás éves fogyasztását 3000 kWh-val számolva 9 kWh veszteségcsökkenés érhető el a THD-csökkentés, és mintegy 150 kWh veszteségcsökkenés érhető el az elosztott termelés következményeként. Figyelembe véve a fosszilis energiaforrások felhasználási arányát a magyarországi viszonyok között (szén 17,3%, gáz 38,3%), illetve a használatukkal járó CO₂-kibocsátást (1000 g/kWh szén, 430 g/kWh gáz esetén), akkor egy átlagos háztartás esetén a nemlineáris torzítás csökkentésével 4376 g/év, az elosztott termelés eredményeképpen pedig 73 000 g/év CO₂-kibocsátáscsökkenés érhető el.

Konklúzió

A kutatás során készült egy hőmérsékletfüggő akkumulátormodell, amelynek paraméterei mért adatok alapján kerültek meghatározásra. A modell kialakításához alkalmazott mérési és szimulációs környezet általános, bármilyen más villamos energiaforrás hőmérsékletfüggő modelljének felépítésére alkalmazható. A modell validálása egy komplex energetikai rendszer modelljébe illesztve, szimuláció segítségével történt. A kapott paraméterek illeszkednek az irodalomban található fizikai és kémiai alapú modellek eredményeihez.

További jelentős eredményként egy – a megújuló energiaforrást felhasználó háztartási kiserőmű és EV-akkumulátortöltő integrációjával felépülő – rendszermodell is elkészült. A nagy központi erőművek alkalmazá-

sa helyett elosztott háztartási kiserőművek alkalmazásával csökkenthetőek a villamos energiarendszer szállítási veszteségei. A szabályozó alkalmas a megújuló energiaforrásból kinyerhető maximális teljesítmény kinyerésére, a hálózat teljesítményegyensúlyának fenntartására időben változó megújuló energiaforrások esetén, az EV-akkumulátorok feltöltésére tiszta megújuló energiával, aktív teljesítménytényező kompenzálására és a harmonikus torzítás kompenzálására. A komplex szabályozó szimulációs vizsgálata alapján jelentős javulás érhető el a kisfeszültségű transzformátorkörzet feszültség- és áramjelalakjaiban, ami a THD jelentős csökkentésének volt köszönhető. Emellett az energiaáramlás irányának szabályozásával a szabályozó képes fenntartani a kisfeszültségű hálózat egyensúlyát és a feszültség szint stabilitását. A jelen kutatás során elért teljes harmonikus torzítás-csökkentés megközelíti az irodalomban található értékeket, annak ellenére, hogy a mérési pontban áram-idő függvény a szabályozó

IRODALOM

- Bandhauer, T. M. – Garimella, S. – Fuller, T. F. (2011): A Critical Review of Thermal Issues in Li-Ion. *Journal of Electrochemical Society*. 158, 3, R1–R25.
- Battaglini, A. – Lilliestam, J. – Haas, A. – Patt, A. (2009): Development of SuperSmart Grids for a More Efficient Utilisation of Electricity from Renewable Sources. *Journal of Cleaner Production*. 17, 911–918.
- Blumsack, S. – Fernandez, A. (2012): Ready or Not, Here Comes the Smart Grid! *Energy*. 37, 61–68.
- Göllei A. – Görbe P. – Magyar A. (2012): Modeling and Optimization of Electrical Vehicle Batteries in Complex Clean Energy Systems. *Journal of Cleaner Production*. in print

működtetésénél nem került felhasználásra, mivel ebben az esetben erre nincs is technikai lehetőség. A szabályozó a feszültségjelalak torzításának csökkentését minimalizálja, amivel nemcsak az adott háztartás, hanem a teljes transzformátorkörzet áramminőségét javítja, és ezzel a villamos veszteségi teljesítményt és áttételesen a CO₂-kibocsátást is csökkenti. Az energiamegtakarítás és az emissziócsökkentés számításánál a magyar villamosenergia-hálózat statisztikai adatai kerültek felhasználásra. Az elosztott energiatermelésből származó becsült energiamegtakarítás egy átlagos magyar háztartás esetén elérheti az 5%-ot, ami 73 000 g/év CO₂-kibocsátáscsökkenésnek felel meg. A THD-kompenzációból származó becsült energiamegtakarítás 0,3%, míg a CO₂-kibocsátáscsökkenés 476 g/év.

Kulcsszavak: megújuló energiaforrások, hálózati integráció, villamos hálózat, teljes harmonikus torzítás, optimális szabályozás, elektromos jármű, akkumulátor, modellezés, energiatárolás

- Görbe P. – Magyar A. – Hangos K. M. (2012): Reduction of Power Losses with Smart Grids Fuelled with Renewable Sources and Applying EV Batteries. *Journal of Cleaner Production*. in print.
- Johnson, V. – Pesaran, A. – Sack, T. (2000): *Temperature-Dependent Battery Models for High-Power Li-Ion Batteries*. NREL, Montreal, Canada
- Limongi, L. – Bojoi, R. – Griva, G. – Tenconi, A. (2009): Comparing the Performance of Digital Signal. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 3, 1, 20–31.
- Purvis, A. et al. (2011): A European Supergrid for Renewable Energy: Local Impacts and Far-reaching Challenges. *Journal of Cleaner Production*. 19, 1909–1916.

PETRI-HÁLÓ MODELLEKEN ALAPULÓ JÁRMŰIPARI DIAGNOSZTIKAI MÓDSZEREK

Hangos Katalin

DSc, Pannon Egyetem
Műszaki Informatikai Kar, Villamosmérnöki
és Információs Rendszerek Tanszék, Veszprém
hangos.katalin@virt.uni-pannon.hu

Gerzson Miklós

CSc, Pannon Egyetem
Műszaki Informatikai Kar, Villamosmérnöki
és Információs Rendszerek Tanszék, Veszprém
gerzson.miklos@virt.uni-pannon.hu

Leitold Adrien

PhD, Pannon Egyetem
Műszaki Informatikai Kar
Matematika Tanszék, Veszprém
leitolda@almos.vein.hu

Starkné Werner Ágnes

PhD, Pannon Egyetem
Műszaki Informatikai Kar Villamosmérnöki
és Információs Rendszerek Tanszék, Veszprém
werner.agnes@virt.uni-pannon.hu

Dulai Tibor

egyetemi tanársegéd, Pannon Egyetem Műszaki Informatikai Kar
Villamosmérnöki és Információs Rendszerek Tanszék, Veszprém
dulai.tibor@virt.uni-pannon.hu

Munkánk célja, hogy bemutassuk a Petri-háló felhasználási lehetőségeit a modellezés és diagnosztika területén. Bemutatjuk technológiai rendszerek egy lehetséges modellezési formáját normál és hibás működésnél, hierarchikus színezett Petri-hálókat felhasználva. Bemutatjuk a folyamat modellje és a napló-fájlban tárolt tracek összehasonlítása alapján a hiba feltárásának folyamatát. Javaslatot teszünk a folyamat hibamentes működését leíró referenciamodell és egy tényleges működés alapján származtatott modell összehasonlításának módszerére gráfelméleti alapokon.

Bevezetés

A technológiai rendszerek diagnosztikai vizsgálata során a modellalapú módszerek igen

népszerűek és széles körben alkalmazottak kedvező tulajdonságaik miatt (lásd van der Aalst et al., 2004; Hangos – Cameron, 2001). A diszkrét eseményű rendszerek területén kifejlesztett eszközöket és módszereket alkalmazva, a kapott modell jól használható a vizsgált rendszer működésének és rendszertulajdonságainak vizsgálatára (lásd Hangos et al., 2001; Werner et al, 2011; Werner et al, 2012). Ezeknek a modelleknek egyik népszerű formája a Petri-háló (lásd Jensen, 1994; Murata, 1989). Közleményünk célja, hogy új megközelítésekben mutassuk be a Petri-háló felhasználási lehetőségeit a modellezés és diagnosztika területén.

A diagnosztikai vizsgálatokhoz elkészítjük a folyamat működését leíró Petri-háló alapú

modellt, mely a vizsgált folyamatban lejátszódó eseményeket és azok előfeltételeit, illetve következményeit emeli ki. A másik fontos kiindulási eszköz a rendszer működéséről adatokat tartalmazó eseménynapló (naplófájl). Az általunk vizsgált diagnosztikai módszerek ezeknek a modelleknek és napló-fájloknak a különböző módon történő összehasonlítását végzik el.

Modellezés Petri-háló segítségével

A Petri-háló diszkrét állapotú és diszkrét idejű rendszerek leírására alkalmas eszköz, melyet Carl Adam Petri német matematikus fejlesztett ki soros automaták kommunikációjának modellezésére az 1960-as évek elején. A módszer kidolgozása óta a Petri-hálókat számos formában fogalmazták meg, és modellezési képességeik bővítése érdekében sokféle irányban fejlesztették tovább.

Kutatásaink során elsősorban az eredeti definíciónak megfelelő, ún. alacsony szintű hálókat, illetve a hierarchikus, színezett hálókat alkalmaztuk, így a következőkben ezek definícióját ismertetjük vázlatosan (Murata, 1989); Jensen, 1994 alapján.)

Egy alacsony szintű Petri-háló a következő ötessel adható meg: $PN = (P, T, A, w, m)$, ahol

- P : helyek halmaza;
- T : átmenetek halmaza;
- $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ az élek halmaza;
- $w : A \rightarrow \mathbb{N}^+$ az élek súlyait megadó függvény;
- $m : P \rightarrow \mathbb{N}$ a jelzőpontok eloszlását megadó függvény.

A modellezés során a rendszerből a lejátszódó eseményeket vagy műveleteket, és ezek előfeltételeit és következményeit emeljük ki. A Petri-hálóban az eseményeknek az átmenetek, az előfeltételeknek, következmények-

nek a helyek felelnek meg, míg a köztük lévő kapcsolatot az élek adják meg. A hálót nagyon gyakran gráfként jelenítik meg, ahol az átmeneteket téglalappal, a helyeket körökkel, az éleket pedig nyilakkal szimbolizálják. A vizsgált rendszer működését a háló szimulációjával vizsgálhatjuk. Az átmenetek lejátszódásához, a valós rendszerhez hasonlóan, az előfeltételeiknek teljesülniük kell, melyeket jelzőpontok, ún. tokenek hozzárendelésével lehet szimbolizálni. A modellezett rendszertől függően szükség lehet arra, hogy egy átmenet lejátszódásához az előfeltételi helyén kettő vagy több token (például munkadarab) legyen. A w élfüggvény ezeknek a helyzeteknek a kezelésére alkalmas, míg az m jelzőpont-eloszlás-függvény a tokenek aktuális eloszlását adja meg.

Míg az alacsony szintű Petri-hálóban a jelzőpontok megkülönböztethetetlenek, addig az ún. színezett Petri-hálóban a jelzőpontokhoz színeket, vagyis a tokenek által reprezentált diszkrét értékű adatoknak megfelelő típusokat rendelhetünk. E módosítás miatt további fogalmakat, így a jelzőpontok színeinek kiértékelését elvégző, élekhez rendelt *ívkifejezéseket*, valamint az átmenetekhez tartozó *örvfüggvényeket* is be kell vezetni. A színezett Petri-háló definíciója Kurt Jensen művében (1994) található meg részletesen. A színezett Petri-háló segítségével a modellek szerkezete sokkal egyszerűbb, átláthatóbb lesz, a pontos értelmezhetőséghez azonban szükség van az ívkifejezések és az örfüggvények ismeretére is.

Az ún. hierarchikus hálóban lehetőség van alháló beépítésére, ami egyrészt egyszerűsíti a modellezési munkát és a főháló szerkezetét, másrészt viszont nehezíti a modell részletes értelmezését. Petri-hálóban az időkezelés általában az átmenetek és helyek sorren-

diszkrétben jelenik meg, de létezik a hálónak olyan továbbfejlesztése, melyben az idő közvetlenül is megjelenik.

A leírtakból látható, hogy a különböző típusú Petri-háló kiválóan alkalmasak diszkrét eseményű és idejű technológiai rendszerek működésének elemzésére, mind szimuláció, mind a felsorolt rendszertulajdonságok vizsgálata alapján.

Technológiai rendszerek

normál és hibás működésének modellezése

Petri-háló segítségével

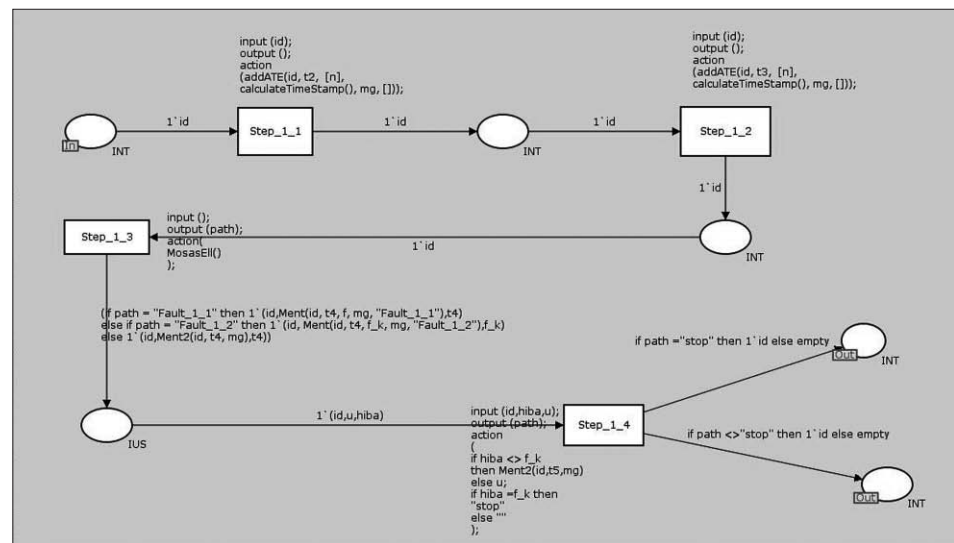
Kutatásunk egyik célja egy olyan, diszkrét eseményű technológiai rendszerek állapotainak széles körű feltárására alkalmas Petri-háló alapú modellezési eljárás megalkotása volt, amely egyaránt lehetővé teszi a normál üzemelés, valamint különböző hibalehetőségeket tartalmazó hibás működés lejárásának leírását is.

Első lépésként, a műveletek helyes lejátszódási sorrendjének és a köztük lévő kapcsolatoknak ismerete alapján elkészítjük a vizsgált rendszer ún. *normál referenciamodelljét*, mely a vizsgált rendszer hibamentes működésének felel meg. Összetett, nagy technológiai rendszerek modellezése esetén segíti az elkészült modell áttekinthetőségét, ha a szorosabban összetartozó technológiai lépéseket alhálóba szervezzük, azaz hierarchikus hálót alakítunk ki.

Következő lépésként különböző, ismert hibák rendszerbe történő integrálását végeztük el, melynek eredményképpen különféle hibás működési módok vizsgálata válik lehetségessé. A hibalehetőségeknek Petri-háló alapú modellben való figyelembe vételét általában hibahelyek és/vagy hibaátmenetek hálóbba történő beépítésével szokták elvégezni (Blanke et al., 2006), ez azonban jelentősen

növelheti a háló méretét és bonyolultságát. Ezt elkerülendő, a hibáknak a modellbe történő integrálását egy új, egyedi ötlet alapján hajtottuk végre (Márcki et al., 2011, Márcki et al., 2012). Ennek lényege, hogy a hibáknak a referenciamodellbe történő integrálását a színezett Petri-háló elemeihez rendelhető függvények és utasítások segítségével oldottuk meg. Az átmenetekhez rendelt ellenőrző függvények a felhasználó által előre definiált valószínűséggel térnek vissza hibás vagy hibamentes működésre utaló értékkel. Az átmenetek és helyek között lévő irányított élekhez tartozó feltételes utasításokba kódoltuk be, hogy mi játszódjon le hibás működés esetén. Az, hogy melyik feltételes utasítás játszódik le, az a megelőző átmenethez rendelt ellenőrző függvény visszatérési értékétől, vagyis a token színétől függ. A beépített függvények felelnek azért is, hogy egy rendszerleállást eredményező hiba esetén a háló token-eloszlása a kezdeti tokenelosztással egyezzen meg, vagyis inicializációs állapotba kerüljön a rendszer. A hibák bekövetkezése tehát, a rendszer valós működéséhez hasonlóan véletlenszerű, előfordulásukat pedig egy, a felhasználó által paraméterezett valószínűségi függvény szabályozza. A gyakoriságok beállításánál, a gyártórendszer működése során előálló naplófájlokból adatbányászati elemzések révén kapott hibastatisztikák lehetnek segítségünkre. Azt a modellt, amely már a különféle hibás működéseket is tartalmazza, *kiterjesztett referenciamodellnek* hívjuk.

Az 1. ábrán egy olyan technológiai rendszer Petri-háló alapú normál referenciamodelljének felső szintje látható, mely négy alhálóba összevont technológiai lépésből áll. A 2. ábrán az egyik alháló látható a hibalehetőségek integrálása után.

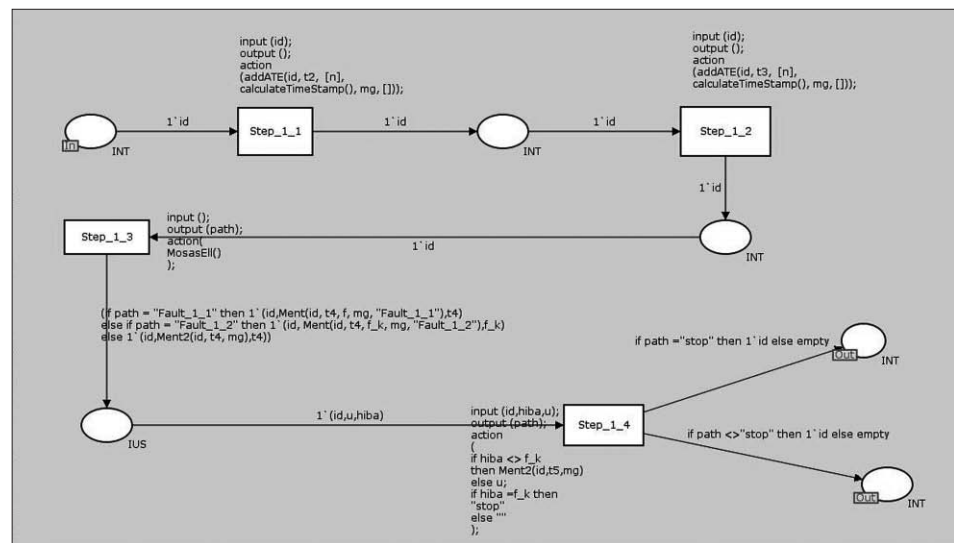


1. ábra • A technológiai rendszer kiterjesztett referenciamodelljének felső szintje

Diszkrét eseményű modellstruktúra-identifikáció

A Petri-háló segítségével megadott diszkrét eseményű rendszerek struktúra-identifikáció-

jához modellalapú diagnosztika céljából felhasználhatjuk a folyamatbányászat (van der Aalst et al., 2007; van Dongen et al., 2005) fogalmait és eszközeit. Ehhez szükséges a lehetséges hibamódok feltárása, majd a normál



2. ábra • A technológiai rendszer egy, hibalehetőségeket is tartalmazó alhálója

működési mód és a hibás működési mód(ok) modellezése (Werner et al., 2011), amelyre utaltunk a 3. fejezetben. A folyamatbányászat (lásd ProM-rendszer [van Dongen et al., 2005]) lehetőséget biztosít arra, hogy folyamat adatokból (naplófájl) állítsunk elő Petri-háló modelleket (van der Aalst et al., 2004). Az adatok a naplófájlban speciális formátumban (MXML-formátum) kell, hogy rendelkezésre álljanak. Egy eseménynapló tartalmazza eseménysorozatok egy halmazát (trace), amelyek mindegyike speciális viselkedést ír le, amelyek között hibás eseményvégrehajtás is lehet. A modellek előállítására számos algoritmus létezik, mint például az alfa-algoritmus, a genetikus algoritmus vagy a heurisztikus eljárás stb. (van Dongen et al., 2005).

A valamely algoritmus által létrehozott folyamat modelleket ezek után összehasonlítható a referenciamodellel. Kérdés, hogy az előállított modell (lehet normál vagy hibás működést leíró) algráfja-e a referenciamodelleknek. Ha ez igaz, akkor meg tudjuk mondani, hogy vajon a rendszer normális feltételek mellett zajlik-e, vagy izolálni tudjuk a hibát. Ha ez nem igaz, akkor új, lehetséges hibát fedeztünk fel.

Folyamatinformációk alapján generált Petri-háló modellek felhasználása diagnosztikai vizsgálatokhoz

A gyártórendszer működése során fellépő hibák súlyosságukat tekintve alapvetően háromfélék voltak:

- azonnali leállást eredményező súlyos hiba,
- selejtet eredményező hiba,
- leállást nem eredményező kisebb hiba.

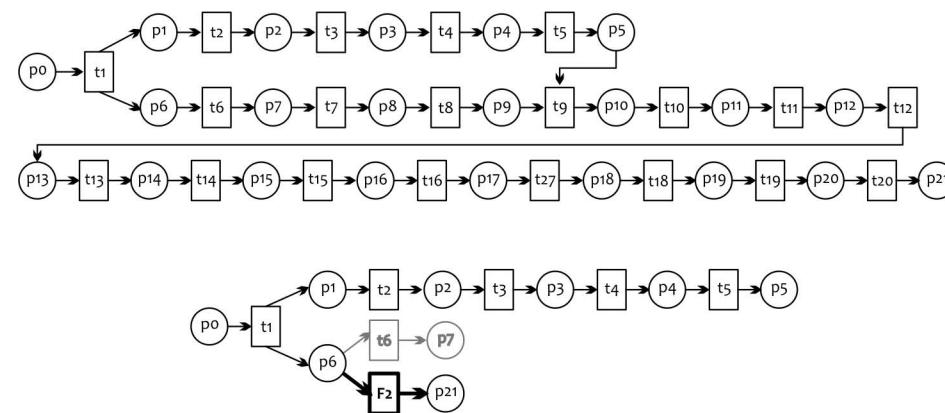
Diagnosztikai vizsgálataink célja, hogy a vizsgált rendszer működése során szerzett információkból visszaállított hálót összehasonlítva az előzetes információk alapján felállított

helyes és különböző hibás működéseket leíró hálókkal, következtessünk a technológiai rendszer működésének helyességére. Ezt a vizsgálatot kutatásaink során a Petri-hálók terében végeztük el, azaz a tényleges (esetleg ismert vagy ismeretlen hibát tartalmazó) működést leíró Petri-hálót összehasonlítjuk a rendszer normál referenciamodelljével, és a Petri-hálók gráftávolságát meghatározva következtetünk a normál működéstől való eltérés mértékére, azaz a hiba súlyosságára (Gerzson et al., 2011). Gráfok távolságának meghatározása legnagyobb közös részgráfjuk ismeretében az alábbi képlettel történhet (Bunke – Shearer, 1998):

$$d(G_1, G_2) = 1 - \frac{|mcs(G_1, G_2)|}{\max(|G_1|, |G_2|)} \quad (1)$$

ahol $|G|$ a G gráf csúcsainak számát, $mcs(G_1, G_2)$ a G_1 és G_2 gráfok maximális közös részgráfját, míg $d(G_1, G_2)$ a G_1 és G_2 gráfok távolságát jelöli. A maximális közös részgráf megkeresése általában algoritmikusan nehéz feladat, de az általunk összehasonlítani kívánt Petri-hálók csúcscímkezett gráfoknak tekinthetők és az alkalmazott hibamodellzés miatt speciális szerkezetűek, így a gráftávolság számolása ebben az esetben algoritmikusan lényegesen egyszerűbb probléma.

Míg a gyártórendszerek különböző modelljeiként a komplex rendszerek esetén is jól átlátható hierarchikus, színezett Petri-hálókat célszerű használni, addig a gráfok szerkezeti analíziséhez, így a gráfösszehasonlításához is egyszerű (nem hierarchikus) és alacsonyszintű (nem színezett) hálókat kell alkalmazni. A hierarchikus és színezett hálóként felépített alapmodellt egy általunk fejlesztett Converter szoftver (Márczi et al., 2011) felhasználásával alakítjuk át ProM (van Dongen et al., 2005)



3. ábra • A referenciamodell és a hibás működés alacsony szintű hálója

szoftverrel megjeleníthető alacsonyszintű, egyszerű hálóra, ahogy azt a 4. fejezetben már említettük.

Munkánk jelen szakaszában a technológiai rendszer működését a CPN-Tools-ban végzett szimulációval vizsgáltuk. A háló végrehajtása során a program lehetőséget ad a valós rendszerek működéséhez hasonló naplófájlok generálására. Ezek a naplófájlok időbélyeggel ellátva tartalmazzák a technológiai rendszerben vagy az azt szimuláló hálóban bekövetkező eseményeket, azok végrehajtóit. Ezeknek az adatoknak a segítségével lehet az adott működésnek megfelelő hálót visszaállítani, majd azt a normál referenciamóddal összehasonlítva a rendszer működési állapotát meghatározni. A vizsgált rendszerünk referenciamodellje és egy tényleges, a

folyamat elején leállást okozó hibás működéshez tartozó modell alacsonyszintű hálója a 3. ábrán látható.

A két gráf távolsága a legnagyobb közös részgráf alapján meghatározva $d_1 = 0.69$ értéknek adódik. Összehasonlításképpen az 1. táblázat két további esetben (leállást nem eredményező kis hiba, illetve leállást nem eredményező kis hiba, majd a folyamat végén leállást eredményező hiba) is mutatja a számolt gráftávolságok értékét.

Megállapítható, hogy ha a technológiai folyamatban csak egy kicsi, kezelhető hiba következik be, akkor a kapott gráftávolság értéke kicsi. Leállást eredményező hiba esetén annál közelebb lesz a kapott távolságérték 1-hez, minél korábban következett be a leállást eredményező hiba.

előforduló hibatípus	számolt érték
azonnali leállást eredményező hiba a folyamat elején	$d_1 = 0.69$
leállást nem eredményező kis hiba	$d_2 = 0.024$
leállást nem eredményező, majd egy leállást eredményező hiba a folyamat végén	$d_2 < 0.143 < d_1$

1. táblázat • A technológiai rendszerben előforduló hibás működések és számolt gráftávolság-értékek

Konklúzió

Munkánkban összefoglaltuk azokat a lehetőségeket, amelyek felhasználhatóak lehetnek járműipari diagnosztikai területen. A folyamatok elemzéséhez egyrészt modelleket – itt a Petri-hálók kerültek alkalmazásra –, másrészt a folyamatok során rögzített naplófájlokat használtunk fel. Megmutattuk, hogy a diagnosztikai elemzésekhez normál referenciamodellt szükséges készíteni, ami célszerűen hierarchikus felépítésű, másrészt kiterjesztett referenciamodelleket, amelyek a lehetséges hibákat is megjelenítik. Vizsgáltuk, hogy diszkrét eseményű rendszerek struktúra-identifikációjához hogyan használhatók a folyamatbányászat eszközei. Bemutattunk egy

módszert a referenciamodel és a naplófájlból előállított helyes és hibás működéseket leíró modellek összehasonlítására. A bemutatott módszereket járműipari területen vizsgáltuk, és megállapítottuk, hogy ezen speciális területeken is van létjogosultsága a modellezési, naplófájl-feldolgozási, az összehasonlítási műveleteknek, ha azokat elsődlegesen hibadiagnosztikára akarjuk használni.

Ez a munka a Magyar Állam és az Európai Unió pénzügyi támogatásával valósult meg a TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KONV-2010-0003 projekt keretén belül.

Kulcsszavak: *folymat, modellezés, Petri-háló, hibadiagnosztika, járműipar*

IRODALOM

- Blanke, M. – Kinnaert, M. – Lunze, J. – Staroswiecki, M. (2006): *Diagnosis and Fault-tolerant Control*. Springer-Verlag
- Bunke, H. – Shearer, K. (1998): A Graph Distance Metric Based on Maximal Common Subgraph. *Pattern Recognition Letters*. 19, 255–259.
- Gerzson M. – Leitold A. – Hangos K. M. (2011): *Model Based Process Diagnosis Using Graph Methods*. Factory Automation 2011 Conference, Győr, Hungary, 62–70.
- Hangos K. M. – Cameron, I. T. (2001): *Process Modelling and Model Analysis*. Academic Press, London
- Hangos K. M. – Lakner R. – Gerzson M. (2001): *Intelligent Control Systems: An Introduction with Examples*. Kluwer Academic Publisher, New York
- Jensen, K. (1994): *Coloured Petri Nets*. Springer-Verlag
- Márczi, B. – Gerzson, M. – Leitold, A. (2011): Diagnostic Investigations Based on the Petri Net Model Generated from the Process Information. *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*. 39, 1, 133–139.
- Márczi B. – Leitold A. – Gerzson M. (2012): Diagnosis of Technological Systems Based on Their Colored Petri Net Model. 7th Vienna Symposium on Mathematical Modelling, Wien, Austria, *ARGESIM Report S38*.
- Murata, T. (1989): Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. *Proceedings of the IEEE*. 77, 4, 541–580.
- van der Aalst, W. M. P. et al. (2007): Business Process Mining: An Industrial Application. *Information Systems*, 32, 5, 713–732.
- van der Aalst, W. M. P. – Weijters, A. J. M. M. – Maruster, L. (2004): Workflow Mining: Discovering Process Models from Event Logs. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 16(9): 1128–1142 2004.
- van Dongen, B. F. et al. (2005): The ProM Framework: A New Era in Process Mining Tool Support. *ICATPN*. 444–454.
- Werner-Stark A. – Gerzson M. – Hangos K. M. (2011): *Discrete Event Model Structure Identification Using Process Mining*. Proceedings of the IASTED International Conference Modelling, Identification, and Control (MIC 2011), Innsbruck, Austria, 228–233, ISBN 978-0-88986-863-2
- Werner-Stark A. – Dulai T. (2012): *Agent-based Analysis and Detection of Functional Faults of Vehicle Industry Processes: A Process Mining Approach*. 6th International KES Conference on Agents and Multi-agent Systems, Technologies and Applications KES-AMSTA 2012, Dubrovnik, Croatia, 25–27. 06. 2012.

BELŐÉGÉSŰ MOTOROK KORSZERŰ, CSEPPFOLYÓS ÜZEMANYAGAI

Hancsók Jenő

az MTA doktora,
Pannon Egyetem Mérnöki Kar Vegyészmérnöki- és Folyamatmérnöki Intézet
MOL Ásványolaj- és Széntechnológiai Intézeti Tanszék
hancsokj@almos.uni-pannon.hu

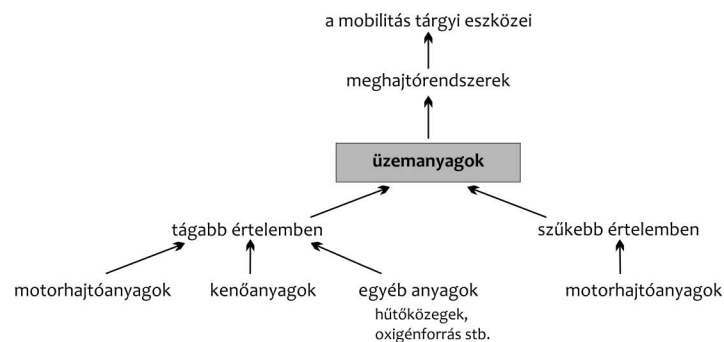
A fenntartható fejlődés egyik alappillére a mobilitás. Ennek megvalósításához jelentős energiára van szükség. A szárazföldi mobilitás biztosítására, így a közúti közlekedés és szállítás céljaira szolgáló gépjárművek mozgási energiájának forrásai legalább 80%-ban a belsőégésű (Otto- és Diesel-) motorok lesznek 2030–2040-ben is (Lindemann, 2012; Adolf, 2012). E motorok üzemanyagai szűkebb értelemben a motorhatóanyagok, tágabb értelemben azonban az üzemanyagok közé tartoznak a kenőanyagok (például motorolajok) és az egyéb anyagok is, mint például a hűtőközegek (például hűtőfolyadékok), oxigénforrás stb. (1. ábra) (Hancsók 2011a). Ez érthető is, hiszen ezen anyagok nélkül szintén lehetetlen lenne a belsőégésű motorok működtetése.

Az előbbi értelmezés nagyon fontos, mert a környezetbarát és nagy energiatartalmú motorhajtóanyagok és a nagyteljesítményű (korszerű) kenőanyagok rendszerszemléletű fejlesztése csak a gépjárműfejlesztéssel összhangban történhet, figyelembe véve a nyersanyagkészletek rendelkezésre állását, a környezetvédelmi elvárásokat, a fogyasztói igényeket stb. (2. ábra). Ezek között számos és nagyon szoros kapcsolat van (Lindemann, 2012; Hancsók et al., 2005a).

Csak az előzőeknek megfelelő fejlesztések eredményeképpen létrehozott új, értékteremtő gyártási láncolattal csökkenthető jelentősen a szárazföldi mobilitás által okozott környezetszennyezés, alapanyag- és energiatakarékos, valamint gazdaságos módon és a lehető legkisebb környezeti terhelést okozva.

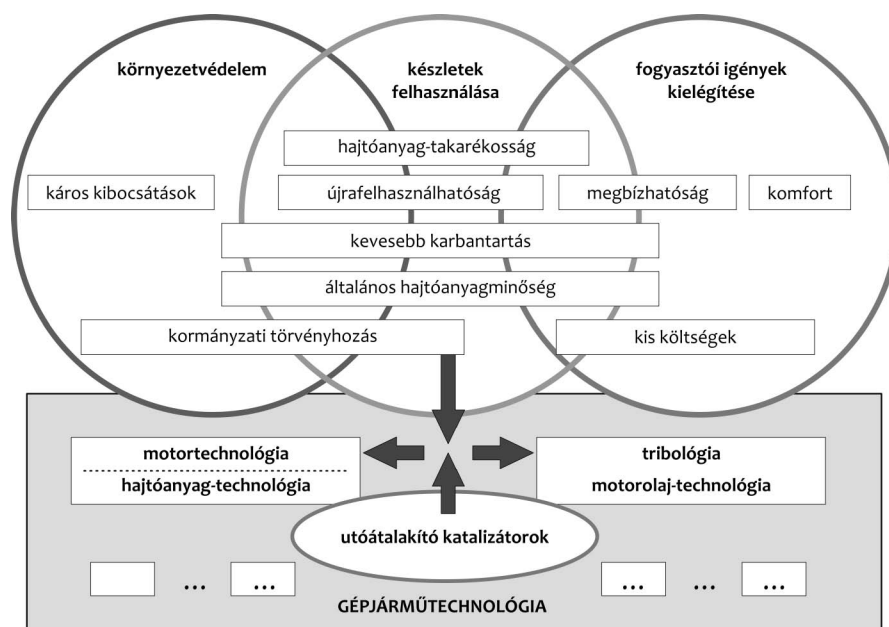
A belsőégésű motorok károsanyag-kibocsátásának befolyásolhatósága – a rendszerszemléletű gépjárműfejlesztést figyelembe véve – a motorral 50–60%, az üzemanyagokkal 25–30% és egyéb módon 10–20%. Ezek közül jelen közleményben csak a motorhajtóanyagok használatakor keletkező károsanyag-kibocsátás által közvetlenül vagy közvetve okozott emisszió csökkentési lehetőségeihez kívánunk hozzájárulni. Természetesen a javasolt megoldásoknak olyanoknak kell lenniük, hogy a hajtóanyagok energiatartalma és speciális alkalmazástechnikai tulajdonságai, továbbá a motorolajok teljesítményszintjei megfeleljenek a korszerű motorkonstrukciók által támasztott követelményeknek.

Először röviden tekintsük át a motorhajtóanyagokkal szemben támasztott főbb, általánosan összefoglalt követelményeket. Ezek a következők (Röj, 2009; Szalkowska, 2009; Harms, 2011; Hancsók et al., 2008):



1. ábra • Belsőégésű motorok üzemanyagainak rendszerszemléletű osztályozása

- rendelkezésre állás elegendő mennyiségben és minőségben az egész világon, hosszú időtartamon át
- jó égési jellemzők
 - nagy oktánszám (motorbenzinek)
 - nagy cetánszám (dízeltárolajok)
 - nem túl magas lánghőmérséklet (kisebb mértékű NO_x-keletkezés; szerkezeti anyagok kisebb mértékű igénybevétele)
- kisebb összes károsanyag-kibocsátás stb.
- nagyon kis kén tartalom ($\leq 10 \text{ mg/kg}$)
- csökkentett aromastartalom
 - motorbenzinek (benzoltartalom $\leq 1,0 \text{ v/v\%}$; összes aromastartalom $\leq 35 \text{ v/v\%}$)
 - dízelgázolajok (többgyűrűs aromastartalom $\leq 8\%$)
- csökkentett olefintartalom
 - motorbenzinek ($\leq 18 \text{ v/v\%}$)



2. ábra • Az üzemanyagok fejlesztését meghatározó tényezők kapcsolatrendszere

- keverhetőség alternatív komponensekkel (nemcsak szénhidrogénnel, hanem például oxigéntartalmú vegyületekkel is)
- jó adalékérzékenység és adalékoltathatóság (például: fűvóka-, szelep- és égéstisztaság)
- összeférhetőség motorolajokkal
- környezetet kevésbé terhelő károsanyagok a kipufogógázban
- felhasználóbarát
- biztonságtechnikailag megbízható alkalmazhatóság
- könnyű biológiai lebonthatóság
- élőlénybarát (nem mérgező)
- kis bekerülési költség stb.

Közismert, hogy az Otto- és Diesel-motorok legnagyobb részarányban (>90%) alkalmazott motorhajtóanyagai a különböző szénhidrogének elegyei. Az ezen motorhajtóanyagok előzőekben felsorolt minőségi jellemzőinek egyes konkrét értékeit közép- és hosszú távra (tervezhető módon) irányelvekkel (direktívák) (Az Európai Parlament és a Tanács, 2003, 2009; Európai Községek Bizottsága, 2006, 2007), rövid távra az adott időpontban érvényes szabványokkal és rendeletekkel írják elő. Ezen kívül a motorhajtóanyagok gyártásakor figyelembe veszik a motor- és autógyártók ajánlásait (WWFC – World Wide Fuel Char-

jellemzők	Európai Unió				USA		WWFC
	EN 228 „Euro 2” (1993)	EN 228 „Euro 3” MSZ EN 228 (2000)	EN 228 „Euro 4” MSZ EN 228 (2005)	EN 228 „Euro 5” MSZ EN 228 (2009)	RFG Phase 3 (2009)	CARB Phase 3 (2009)	4. kategória (2006)
kéntartalom, mgS/kg, legfeljebb	500	150	50 / 10 ²	10	10/30	30/20 ¹	10
aromastartalom, v/v%, legfeljebb	—	42	35	35	<50	35	35
olefintartalom, v/v%, legfeljebb	—	18	18	18	—	10	10
benzoltartalom, v/v%, legfeljebb	5,0	1,0	1,0	1,0	1,0/0,6 ³	0,7/0,62 ³	1,0
oxigéntartalom, %, legfeljebb	—	2,7	2,7	2,7	1,5-3,5/2,1	1,8-3,5	2,7
Reid gőznyomás, kPa, legfeljebb	35-100	60/70 ⁴	60/70 ⁴	45-105 ⁴	44-69	41-50	45-105 ⁵

1. táblázat • Motorbenzinek minőségi előírásainak változása (RFG: Reformulated fuel gasoline; új összetételű motorbenzin)

ter, ACEA – European Automobile Manufacturers Association, EMA – Engine Manufacturers Association, Alliance of Automobile Manufacturers, JAMA – Japan Automobile Manufacturers Association stb.), továbbá a környezetvédelmi hatóságok (például: CARB – California Air Research Board, CONCAWE: Oil Companies' European Association for Environment, Health and Safety in Refining and Distribution) javaslatait és elvárásait is.

A bemutatott szempontok és eljárás mód szerint a szabványalkotás sokrétű és összetett folyamatában alakítják ki a motorhajtóanyagok minőségét alapvetően meghatározó fizikai és kémiai, valamint alkalmazástechnikai jellemzők konkrét értékeit. Ezt a tevékenységet a szabványügyi testületek (pl. ASTM – American Society for Testing and Materials, CEN – European Committee for Standardization, MSZT – Magyar Szabványügyi Testület) irányításával végzik. E testületek feladata a létrehozott új szabványok kiadása, szükség esetén azok időközi részleges módosítása és az elavultak visszavonása.

A motorbenzinek és dízelgázolajok termékszabványok által rögzített főbb minőségi jellemzőinek időbeli változását az 1. és 2. táblázat tartalmazza (Hancsók et al., 2011a; MSZ EN 228:2010; MSZ EN 590+A1:2010).

A XXI. század második évtizedének első éveiben az előzőek alapján rendszerszemléletben a belsőégésű motorok korszerű hajtóanyagával kapcsolatban a következő összefoglaló megállapítások tehetők: az általános és konkrét minőségi előírások csak a paraffin szénhidrogének mennyiségét nem korlátozzák. Ezek lehetnek normál- és izoparaffinok, valamint cikloalkánok (cikloparaffinok, naftének). Az utóbbi szénhidrogéncsoportok alkalmazhatósága motorbenzinekben és dízelgázolajokban azonban erősen korlátozott, rendelkezés-

re állásuk (kőolajokban alacsony koncentráció $\leq 5\text{--}10\%$) és viszonylag költséges előállításuk miatt (például a motorbenzin forráspontrányban lévő cikloparaffinokra még nincs iparilag bevált, gazdaságos technológia).

Ugyancsak korlátozott a normál paraffinok koncentrációja is a belsőégésű motorok cseppfolyós hajtóanyagaiban. Motorbenzinek esetében ennek oka ezen szénhidrogének kis oktánszáma a motorbenzinek forráspontrányában, amit jól tükröz a 3. ábra. Ezen kitűnik, hogy a különböző szénhidrogének közül az aromás szénhidrogének oktánszáma a legnagyobb. Közismert azonban erős mérgező hatásuk (közülük legrákkeltőbb a benzol), és nagy szenzibilitásuk (kísérleti- és motoroktánszámuk különbsége általában kb. 10). Annak ellenére, hogy a kb. 70°C alatti olefinek oktánszáma viszonylag nagy (kb. 80–110), azok mégsem kívánatos komponensek nagy (atomszférikus) reaktivitásuk és talajközeli ózonképző hatásuk, továbbá gyantaképző hajlamuk miatt. Ezen kívül szenzibilitásuk is 12–14. A cikloparaffinok oktánszáma kb. 80 és 110 egység között változik hét szénatomszámgig; efelett azonban jelentős mértékben csökken. Mint már kiemeltük, a motorbenzinekben a nyíltláncú paraffinokon kívül csak a cikloparaffinok részarányát (koncentrációját) nem korlátozzák a különböző szabványok. Ugyanakkor a benzinekben a naftén szénhidrogének mennyisége esetleg csak néhány, általában $<5\%$; szintetikus vegyipari előállításuk pedig nagyon költséges. Legjobb komponensek tehát az izoparaffin-szénhidrogének, amelyek oktánszáma nagy (kb. 85–110), különösen a többszörös elágazású izoparaffinoké (3. ábra) (Hancsók et al., 2000, 2011a).

A dízelgázolajok (forráspontrány kb. $240\text{--}360^\circ\text{C}$) esetében az n-paraffinok szintén nem tartoznak az előnyös kompon-

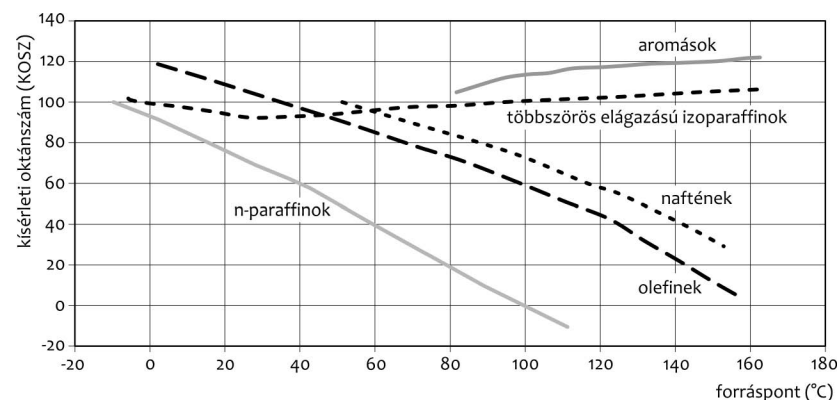
jellemzők	Európai Unió				USA		Japán	WWFC
	EN 590:1999	EN 590:2000	EN 590:2005	EN 590:2009 +A1:2010	ULSD (2007)	CARB (2008)	JIS K 2204: 2008	4. kategória (2006)
cetánszám, legalább	48	51	51	51	41	53	50	55
sűrűség, 15°C -on, kg/m ³ , legfeljebb	820–860	820–845	820–845	820–845	< 876	—	< 860	820–840
összes aromastartalom, %, legfeljebb	—	—	—	—	15	10	—	10
többszörös aromastartalom, %, legfeljebb	—	11	11	8	—	3,5	—	2,0
95 ftf%-ig átdesztillált, $^\circ\text{C}$, legfeljebb	370	360	360	360	—	—	360 ¹	340
kéntartalom, mgS/kg, legfeljebb	500	350	50,0 (10,0)	10,0	15	15	10	10,0

2. táblázat • Dízelgázolajok minőségi előírásainak változása (ULSD: *ultra low sulphur diesel* – nagyon kis kéntartalmú dízelgázolaj)

sek közé; bár cetánszámuk (gyulladás hajlamra ad felvilágosítást) nagy (4. és 5. ábra) (Hancsók, 1999), fagyáspontjuk azonban magas (például a n-hexadékan cetánszáma 100, fagyáspontja $+18^\circ\text{C}$), tehát alacsony hőmérsékleten nem használhatók motorhajtóanyag komponenseként. Ezt jól szemlélteti a 6. ábra is, amelyen az is látható, hogy a megfelelő szénatomszámú izoparaffinok fagyáspontja lényegesen kisebb, különösen az 5-metil elágazásúaké (Hancsók, 1999, Krár et al., 2010).

Az előzőekből és további elméleti megfontolásokból arra következtettünk, hogy a

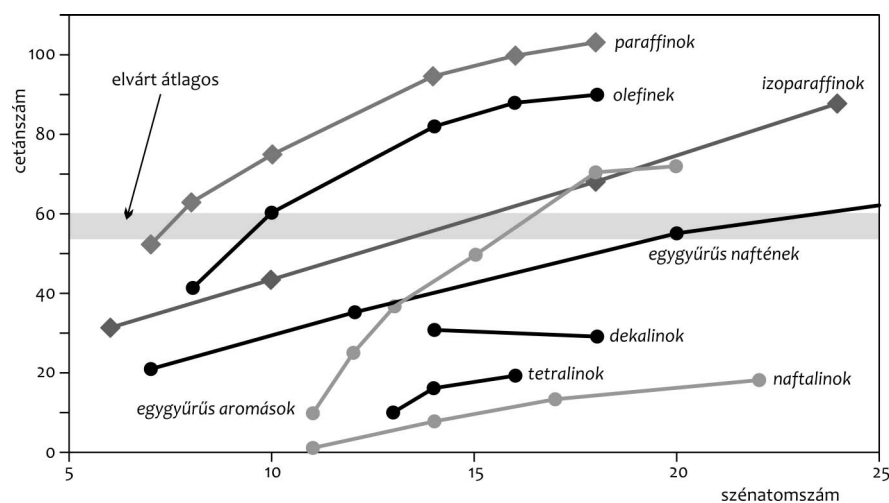
motorbenzinek és dízelgázolajok legjobb összetevői az izoparaffin szénhidrogének, mert ezek a legnagyobb hidrogéntartalmú cseppfolyós szénhidrogének, amelyek ennek következtében nagy energiatartalommal és kiváló alkalmazástechnikai tulajdonságokkal (nagy oktánszám, illetve cetánszám) rendelkeznek, viszonylag „tisztán” égnek, kevésbé mérgezőek, biológiailag könnyebben lebonthatóak, mint például az aromás szénhidrogének. Az izoparaffinok, mint cseppfolyós motorhajtóanyag-komponensek, a meglévő logisztikai rendszerben forgalmazhatóak, mert



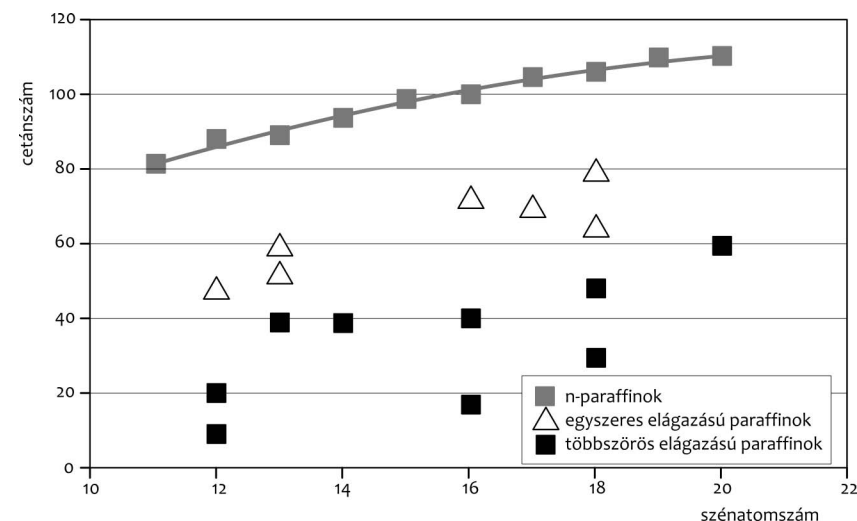
3. ábra • Különböző szénhidrogének oktánszámának és forrásponttartományának összefüggése

a folyékony hajtóanyagok kezelésével és szállításával kapcsolatban már kellő tapasztalat van, és a megfelelő biztonságtechnika is kialakult. Ezen kívül az izoparaffinok a legkisebb sűrűségű szénhidrogének adott (azonos) szénatomszám esetén. Tehát például azonos tömegű benzin vagy gázolaj esetén ezek térfogata a legnagyobb. Ez jelentős nyereség forrása, mert a cseppfolyós motorhajtóanyagokat térfogategységre vonatkoztatva értékesítik (Hancsók et al., 2011a).

Az előző megfontolások miatt az utóbbi kb. húsz évben megkülönböztetett (kitüntetett) figyelemmel és hangsúllyal végeztük a nagy izoparaffin-tartalmú motorhajtóanyagok kutatását-fejlesztését mind hagyományos (például kőolaj), mind pedig alternatív nyersanyagokból (például: biomassza: természetes trigliceridek). A következőkben röviden csak az utóbbi néhány évben elért eredményeinket mutatjuk be összefoglaló jelleggel, és természetesen a teljesség igénye nélkül.



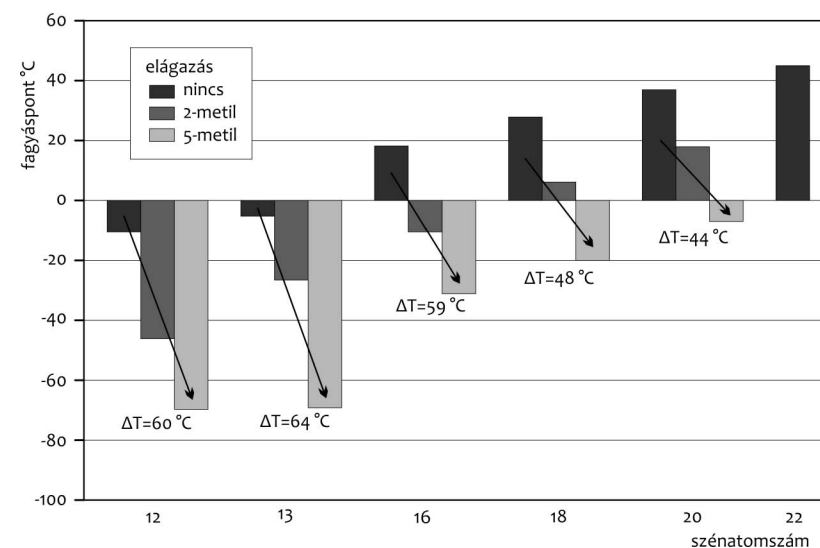
4. ábra • Cetánszám a szénhidrogének szénatomszáma és szerkezete függvényében



5. ábra • Cetánszám a paraffinok szénatomszáma és szerkezete függvényében

Célzott alapkutatási eredményeinkre alapoztuk alkalmazott kutatásainkat és a kísérleti fejlesztéseket (kísérleti üzemi megvalósításokat). Tudományos kutató tevékenységünk fő célkitűzései új termékek felismerésére és előállítására, vagy meglévők továbbfejlesztésére irányultak, továbbá olyan új katalitikus rendszerek (reaktáns[ok], katalizátor[ok], reaktorok és belső szerkezetük, reakcióparaméterek – hőmérséklet, nyomás, folyadékterhelés, H₂/szénhidrogénarány, közbenső- és végtermékek) felismerésére és kifejlesztésére

tésére irányultak, továbbá olyan új katalitikus rendszerek (reaktáns[ok], katalizátor[ok], reaktorok és belső szerkezetük, reakcióparaméterek – hőmérséklet, nyomás, folyadékterhelés, H₂/szénhidrogénarány, közbenső- és végtermékek) felismerésére és kifejlesztésére



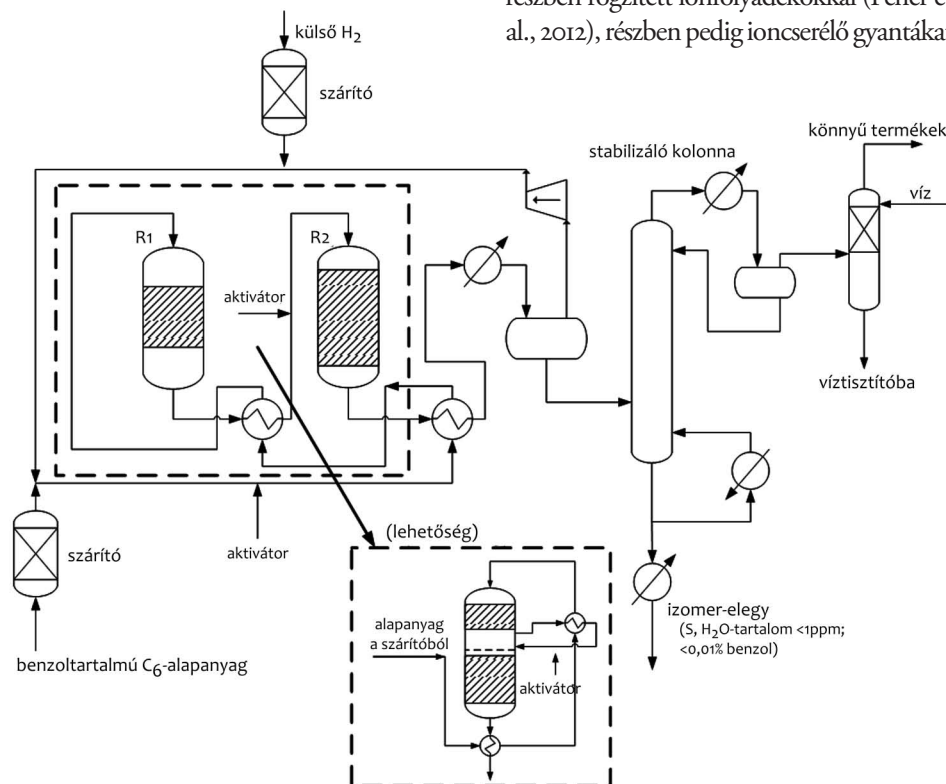
6. ábra • Fagyáspont a szénhidrogének szénatomszáma és szerkezetének függvényében

fókuszáltunk, amelyek izoparaffinokban dús motorhajtóanyagok alapanyag- és energiatakarékos, környezetbarát és gazdaságos előállítását, azaz új értékek létrehozását szolgálják.

A korszerű (nagy energiataartalmú, nagy oktánszámú, környezetbarát) motorbenzinek esetében a benzoltartalmú (1–5%) hexánfrakciók (könnyűbenzin-frakciók) minőségjavítására katalitikus rendszereket fejlesztettünk ki. Ezek egyetlen katalitikus lépésben alkalmasak a benzol gyakorlatilag teljes mértékű hidrogénezésére (ciklohexánná, majd izomerizációval részben metil-ciklopentánná) és a normál-paraffinok vázátrendezésére. Erre a célra alkalmasnak találtuk a megnövelt Pt-tartalmú

H-mordenit (Hancsók et al., 2005b), a Pt-szulfátózott fém-oxid (Szoboszlai et al., 2007, 2011) és a speciális klórozási technikával készített, 6–11% klórtartalmú Pt/Al₂O₃ katalizátort tartalmazó katalitikus rendszereket (7. ábra) (Hancsók et al., 2007a). A nyert, gyakorlatilag benzolmentes termékelegyet oktánszáma 25–35 egységgel nagyobb az alapanyagénál.

A kőolaj- és petrokémiai iparban melléktermékként keletkező könnyű olefinek (például: propilén, butilének) dimerizációjával, majd azt követő hidrogénezésével szintén nagy izoparaffin-tartalmú szénhidrogénelegyet szintetizáltunk részben ionfolyadék és ionfolyadék-elegekkel (Kriván et al., 2010a), részben rögzített ionfolyadékokkal (Fehér et al., 2012), részben pedig ioncserélő gyantákat



7. ábra • Benzoltartalmú könnyűbenzin-frakciók új, alacsony hőmérsékletű, benzoltelítő és izomerizáló eljárásának elvi vázlata (120–160°C)

tartalmazó katalitikus egységekben (Kriván et al., 2010b), majd a keletkező izoolefin elegyek katalitikus hidrogénezésével. A kapott izoparaffindús termékelegyek oktánszáma – nagy butiléntartalmú alapanyag esetén – megközelíti a 96–100 egységet.

Nagy n-paraffintartalmú, tehát (nem megfelelő folyási tulajdonságú) gázolajok minőségjavítására olyan Pt/SAPO-11 katalizátort tartalmazó katalitikus rendszert ismertünk fel és alakítottunk ki, amely alacsony hőmérsékleten (mérsékelt égővi téli időjárási viszonyok mellett –22°C-ig) felhasználható termékelegyek előállítására alkalmas (Hancsók et al., 2011).

A kőolaj nehézpárlatainak termikus vagy fluidkatalitikus krakkolásakor és a szénhidrogének vízgőzös pirolízisekor melléktermékként keletkező C₃–C₅ olefináramokból – az olefinek dimerizációjánál említett katalitikus rendszerekben – sikerült olyan katalizátort, ill. katalizátorkombinációkat és műveleti paramétertartományokat meghatározni, amelyek alkalmasak nagy szelektivitással C₁₂ és annál nagyobb szénatomszámú olefinelegyek előállítására. E közbenső termékek hidrogéne-

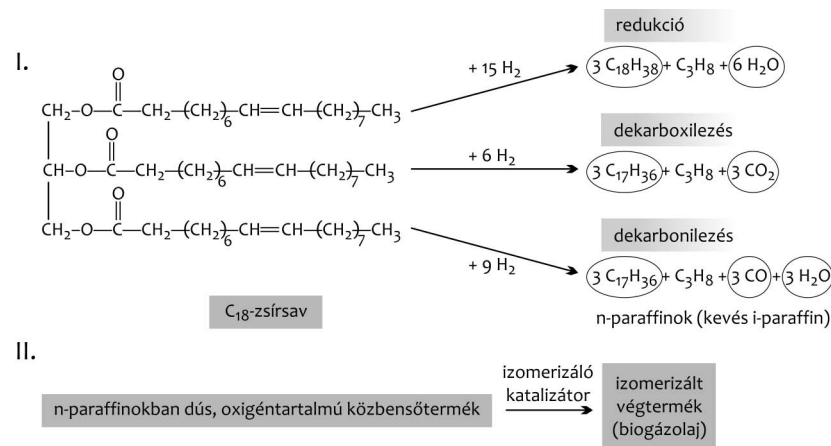
zése után nagy cetánszámú (>55–60) és alacsony hőmérsékleten is jó folyási tulajdonságú (alacsony hidegszűrhetőségi határhőmérsékletű) gázolajkomponensek nyerhetők (Kriván et al., 2010a, 2010b; Fehér et al., 2012). Rámutattunk arra is, hogy a katalitikus rendszer egyes elemeinek (pl. technológiai paraméterek) célirányos változtatásával vagy a benzin forrásponttartományába eső termékelegyet részaránya lesz nagyobb a gázolajkomponensekhez képest, vagy fordítva. Tehát egy végtermékre rugalmas technológia kialakítására alkalmas katalitikus rendszert ismertünk fel. Ezzel a mindenkori piaci igényekhez lehet illeszteni a céltermék mennyiségét. A motorbenzin/dízelgázolaj-rugalmasság jelentős nyereség forrása lehet egy kőolajfinomítónak (Kriván et al., 2010a, 2010b; Fehér et al., 2012).

Alternatív nyersanyagokból kiindulva szintén több lehetőség van nagy izoparaffinkoncentrációjú motorbenzin-, illetőleg dízelgázolaj-komponens előállítására, amelyet a 3. táblázatban foglaltuk össze (Hancsók et al., 2007b, 2012).

Jelen közleményünkben csak a biogázolajok és szintetikus biogázolajok előállítására

GENERÁCIÓK			
első	második	harmadik	negyedik
• bioetanol • növényolajok • biodízelek • előzőek + kőolaj-alapanyagú hajtóanyagok elegyei	• biogázolajok, bioJET (trigliceridek hidrogénezése és izomerizálása) • bioetanol lignocellulózsból • biobutanol • biokomponensek molekula-alkotóként • biometén (biogáz)	• szintetikus (bio)benzin és gázolaj szintézisgázból • szintetikus benzin és gázolaj (lepárlási bioolajok hidrokrakkolása) • bioparaffinok cellulózsból, szénhidrátból • dimetil-éter (DME)	• (bio)hidrogén • szintetikus (bio)metán • (bio)metanol • (bio)elektromos áram (közvetett módon energiatelepekhez) • γ-valero-lakton • még nem ismertek

3. táblázat • Motorhajtóanyag-komponensek alternatív forrásokból



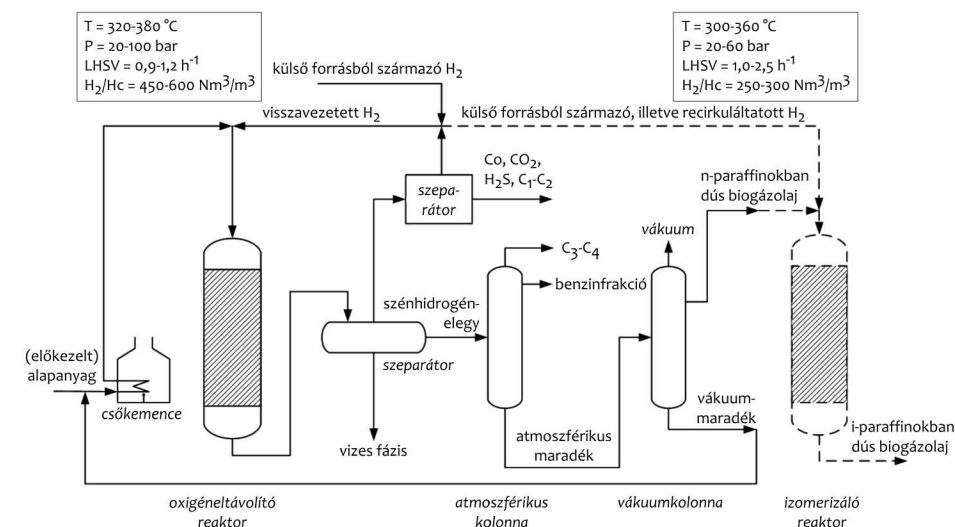
8. ábra • A trigliceridek szelektív hidrokrakkolásának reakcióesémája

végzett kísérleteink eredményeit mutatjuk be. A biogázolajok normál- és izoparaffinok elemei, amelyeket valamilyen természetes trigliceridekből (például növényolajokból, használt sütőolajokból és zsíradékokból, hulladék vágóhídi és fehérjefeldolgozó üzemi zsíradékokból, szennyvíztisztítók „barnazsíradékából”, algaolajokból stb.) speciális hidrokrakkolással (trigliceridek zsírsavláncában lévő olefin kettőskötések hidrogénezése, oxigéneltávolítása – hidrogénezés, dekarboxilezés, dekarbonilezés – és izomerizációval) állítunk elő (8. ábra) (Krár et al. 2010; Kovács et al., 2010; Kovács et al., 2011).

Az ezen motorhajtóanyagok felismerése a szintén trigliceridekből előállított és elterjedten felhasznált biodízelek (zsírsav-metil-észterek) számos hátrányos tulajdonságának (rossz hő- és oxidációs stabilitás az olefin kettőskötések miatt, az észterkötések hidrolízis-érzékenysége, kedvezőtlen folyási tulajdonságok alacsony hőmérsékleten, kisebb energiatartalom a gázolajokénál, foszfor- és alkálifém-tartalom stb.) kiküszöbölésére irányuló kutatások eredménye (Hancsók et al. 2007b, Hancsók et al., 2012, Krár et al.,

2012, Kovács et al., 2010, Kovács et al., 2011; Solymosi et al., 2011)

Kutatómunkánk során a MOL NyRt. szakembereivel közösen olyan katalitikus rendszert és eljárást (9. ábra) fejlesztettünk ki, amely szelektív hidrokrakkolással alkalmas a trigliceridek (kb. 11% oxigéntartalom) gyakorlatilag teljes konverziójára túlnyomórészt n-paraffinokká és kismértékben izoparaffinokká is, az alkalmazott katalizátor(ok) és műveleti paraméterkombinációk függvényében (Hancsók et al., 2011a). Meghatároztuk a szelektív hidrokrakkolásra alkalmas katalizátorokat (CoMo/Al₂O₃; NiMo/Al₂O₃; NiCoMo/Al₂O₃ stb.) és reakciófeltételeket (320–360°C hőmérsékleten, 20–80 bar nyomáson és 1,0–1,5 m³/m³h folyadékterhelés, valamint 450–600 Nm³/m³ hidrogén/triglicerid mólarány) (Hancsók et al., 2007b; Hancsók, 2012; Krár et al., 2010; Kovács et al., 2010; Kovács et al., 2011; Solymosi et al., 2011; Krár et al., 2011; Thernes et al., 2010a, 2010b; Hancsók et al., 2011b). Ha szükséges, az így nyert termék alacsony hőmérsékletű folyási tulajdonságainak javítása egy külön reaktor alkalmazásával lehetséges, amelyben egy nagy



9. ábra • Biogázolajok előállításának elvi vázlata természetes trigliceridekből

izomerizáló aktivitással rendelkező katalizátor (például Pt/SAPO-11; Pt/ZSM-22 katalizátor) az első lépésben keletkező bioparaffin-elegyet nagy izoparaffin-tartalmú (≥kb. 70%) végtermékké alakítja (Hancsók et al., 2007b; 2007c; Kasza et al., 2010a, 2010b, 2011a, 2011b).

A kedvezőnek talált katalitikus rendszer és technológiai elrendezés esetében az előállított bioparaffin-elegy hozama 96–98%-ra megközelíti az elméletileg elérhető értéket; cetánszáma (≥70–80 egység) és hidegsűrhetőségi határhőmérséklete (<10 °C) is kiváló. Egy lehetséges eljárásváltozatot a 9. ábra szemléltet (Hancsók et al., 2011c).

Az fentebb tárgyalt biogázolajok szintetikus úton történő előállítási lehetőségeinek tanulmányozásakor biomassa elgázosításával nyert szintézisgázból célirányos Fischer-Tropsch-szintézissel előállított, nehéz (nagy szénatomszámú) n-paraffin elegy gázolajjává és alapolajjává (kenőanyagok komponensei 85–95%-ban) való átalakíthatóságát vizsgáltuk izomerizáló hidrokrakkolással. A különböző

katalizátorokon (például Pt/zeolit, Pt/MCM-41, Pt/AISBA-15, Pt/SAPO-11 stb.) végzett nagyszámú, szisztematikus kísérlet sorozataink eredményeképpen találtunk olyan speciális összetételű katalizátort, amely alkalmas nagy izoparaffintartalmú gázolaj- és alapolaj-frakció előállítására a kedvezőnek talált reakciófeltételek (330–350°C és 50–60 bar) és technológiai elrendezés esetén (Pölcsmann et al., 2010, Pölcsmann et al., 2011).

A nyert alapolaj kiváló kenéstechnikai és folyási tulajdonságokkal (például viszkozitási index: 130–145; dermedéspont: <10 °C) rendelkezik, így a legkiválóbb alapolajok közé sorolható a korszerű motorolajok gyártásakor. A nagy hozammal keletkező gázolajfrakció minőségi jellemzői lényegesen meghaladják a magyar és európai uniós szabvány által előírt értékeket. A 4. táblázatban összefoglaltuk a szintetikus biogázolajok néhány főbb minőségi adatát a biogázolajok, a biodízelek és a kőolaj-eredetű gázolajjal összehasonlításban (Hancsók et al., 2011a).

Fontos kiemelni, hogy a biogázolajok előállításának bármely bemutatott változata esetén értékes kísérőtermékként nagy izoparaffin-tartalmú benzin keletkezik (4–9%) mint kiváló benzinkeverő komponens.

A főleg 10–14 szénatomszámú zsírsavakat tartalmazó trigliceridekből (például kókuszolaj), de a hosszabb szénhidrogénláncokat tartalmazókból is célirányosan kiválasztott katalizátorokon és reakciófeltételek mellett sugárhajtómű üzemanyag kiváló komponenseit lehet előállítani (Eller et al., 2011a, Eller et al., 2011b).

Az előzőekben bemutatott trigliceridekből történő biogázolaj előállításához új üzem létesítésére van szükség, ami jelentős beruházási költséggel jár. Ennek elkerülésére vizsgáltuk a különböző középpárlatok (petróleumok/gázolajok) és a természetes trigliceridek együttes átalakíthatóságának lehetőségét egy katalitikus lépésben. Ugyanis a gázolajok kéntartalmát (10 000–15 000 mg/kg) hasonló katalitikus rendszerben lehet az érvényes

szabvány által előírt 10 mg/kg érték alá csökkenteni, mint ami a trigliceridek speciális hidrokrakkolására alkalmas. Az eddig lefolytatott kísérletsorozataink eredményei alapján sikerült olyan katalizátor(ok)at (CoMo/Al₂O₃; NiMo/Al₂O₃; NiCoMo/Al₂O₃ stb.), reaktort és kedvező műveleti paraméter-kombinációkat (T: 340–370°C és P: 65–80 bar) találnunk, amelyek alkalmazásakor a triglicerid-tartalmú (5–30%) gázolaj-alapanyagokból jó minőségű bioparaffin-tartalmú termékelemek állíthatók elő (Tóth et al., 2010, Hancsók et al., 2011d). Megállapítottuk, hogy az együttes feldolgozás kedvező feltételei mellett végbement az alapanyag triglicerid részének teljes mértékű átalakulása paraffinokká, továbbá a gázolajrész nagymértékű kéntelenítése (10 mg/kg érték alá) és aromástartalmának részleges (kb. 20–35%-os) hidrogénezése is (Tóth et al., 2011a, Tóth et al., 2011b). Az alacsony hőmérsékletű folyási tulajdonságok javítására ebben az esetben is szükséges egy külön reaktorban végzett katalitikus izomeri-

záció. Tehát egy katalitikus rendszerben lehetséges biokomponens-tartalmú gázolaj előállítása.

Megjegyezzük, hogy a természetes trigliceridek önmagukban való speciális hidrokrakkolását vagy gázolajpárlattal alkotott elegyekben való katalitikus átalakítás megvalósítását számos tényező határozza meg. Így például a rendelkezésre álló természetes trigliceridek mennyisége, a rugalmas bekeverési koncentráció biztosításának igénye, a meglévő kéntelenítő üzem esetleges kapacitásfeleslege, az új technológia integrálhatósága a kőolaj-finomítóba, a rendelkezésre álló beruházási összeg stb.

Az előzőekben vázolt alternatív forrásból származó izoparaffinokat nagy részarányban tartalmazó motorhajtóanyag keverőkomponens-áramok előállítási lehetőségeinek ismerete és kutatása-fejlesztése alapanyag- és energiatakarékos, környezetbarát, valamint gazdaságos módon rendkívül fontos a fenntartható mobilitás biztosítása érdekében. Ezt alátámasztja az Európai Unió 2020-ra bejelentett elvárásának azon kötelező teljesítése, hogy a közlekedési célú motorhajtóanyagoknak legalább 10% részarányban megújítható forrásokból származó komponenseket kell tartalmazniuk. Ugyanakkor például az eddig használt zsírsav-metil-észtereket (biodízeleket) dízelgázolajokba keverni csak 7,0 v/v%-ban lehet az érvényes EN 590:2009+A1 2010 szabvány értelmében. Tehát további, megújítható forrásból származó gázolajkomponensek előállítására alkalmas üzemek létesítésére van szükség.

Következtetések

A következő huszonöt-harminc évben a vezető szerepet továbbra is a belsőégésű motorok

fogják betölteni a szárazföldi mobilitás megvalósításában. Az ezen motorokkal működő benzin- és dízelgázolaj-üzemű gépjárművek hajtóanyaga döntő részarányban továbbra is a cseppfolyós szénhidrogének maradnak. Ezek összetételében egyre fontosabb szerepet játszanak már napjainkban is, és fognak játszani a jövőben az izoparaffin szénhidrogének (legnagyobb hidrogéntartalmú cseppfolyós szénhidrogének a n-paraffinokkal együtt; kiváló alkalmazástechnikai tulajdonságok az egyes hajtóanyagok jellemző forráspont-tartományában, jó biológiai lebonthatóság, kis sűrűségből eredő nagy térfogat stb.). A motorbenzinek esetében a többszörösen elágazóak, míg a dízelgázolajok esetében a molekula belsejében lévő egy metilelágazásuk (például 5-metil-heptadekán) a legjobb keverőkomponensek. Az izoparaffinok kis sűrűségéből adódóan az egységnyi tömegű kőolajból a legnagyobb térfogatú termékmennyiség állítható elő megfelelő energiatartalommal, ami jelentős nyereség forrása, mert a motorhajtóanyagokat térfogatra értékesítik. A növekvő kőolajárak ellenére a motorhajtóanyagok továbbra is jövedéki adóval terhelhető termékek maradhatnak. Ezt a sikeres kutató-fejlesztő-innovációs tevékenységek eredményeképpen az önköltségcsökkentésük teszi lehetővé, amihez jelentős mértékben hozzájárulnak a fentebb bemutatott kutatási eredmények is.

Jelen cikk a TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KONV-2010-projekt keretében készült. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Kulcsszavak: *mobilitás, paraffinok, izomerizáció, oligomerizáció, biogázolaj, motorhajtóanyag*

jellemző	szintetikus (bio)gázolaj*	biogázolaj	MSZ EN 14214:2008–I:2010 biodízel (téli minőség)	MSZ EN 590:2009 dízelgázolaj (téli minőség)
sűrűség (kg/m ³)	770–785	0,775–0,785	0,860–0,900	0,820–0,845
cetánszám	66–81	75–90	kb. 51	min. 51
zavarosodáspont (CFPP), °C	kb. 0–(-25)	kb. (-15)–(-25)	<-5	<-20
fűtőérték, MJ/kg	kb. 43	kb. 44	kb. 38	kb. 43
fűtőérték, MJ/dm ³	kb. 34	kb. 34	kb. 34	kb. 36
többgyűrűs aromástartalom, %	0	0	0	max. 8
kéntartalom, mg/kg	<10	<1	<10	<10

4. táblázat • A biogázolajok, szintetikus biogázolajok, a biodízelek és kőolaj-eredetű gázolajok főbb minőségi jellemzői

IRODALOM

- Adolf, J. (2012): *Auto-Mobility – What's Next? Shell Passenger Car Scenarios and Shell Truck Study 2030*. Mineral Oil Technology Congress, Stuttgart, 20–21. 03. 2012.
- Az Európai Parlament és a Tanács 2003/30/EK irányelve (2003. május 8.) a közlekedési ágazatban a bioüzemanyagok, illetve más megújuló üzemanyagok használatának előmozdításáról. *Az Európai Unió Hivatalos Lapja*. 13, 31, 188–192.
- Az Európai Közöségek Bizottsága (2006): *A bioüzemanyagokra vonatkozó uniós stratégia*. COM(2006) 34 végleges, Brüsszel, 2006. február 8.
- Az Európai Közöségek Bizottsága (2007): *Európai energiapolitika*. COM(2007) 1, végleges, Brüsszel, 2007. január 10.
- Az Európai Parlament és a Tanács 2009/28/EK irányelve (2009): A megújuló energiaforrásból előállított energia támogatásáról, valamint a 2001/77/EK és a 2003/30/EK irányelv módosításáról és azt követő hatályon kívül helyezéséről. *Az Európai Unió Hivatalos Lapja*. 2009. április 23. 140, 16–62.
- Eller Z. – Hancsók J. (2011a): Reduced Aromatic Jet Fuel. 8th International Colloquium Fuels 2011. Stuttgart/Ostfildern, Germany, 19–20. 01. 2011. In: *Proceedings* (ISBN 3-924813-75-2), 475–481.
- Eller Z. – Solymosi P. – Kasza T. – Varga Z. – Hancsók J. (2011b): Production of Biocomponent Containing Jet Fuels. 2nd European Conference of Chemical Engineering (ECCE'11). 10–12. 12. 2011. Puerto de La Cruz, Tenerife, Spain. In: *Proceedings* (ISBN 978-1-61804-057-2) 166–174.
- Fehér Cs. – Kriván E. – Hancsók J. – Skoda-Földes R. (2012): Oligomerization of Isobutene with Silica Supported Ionic Liquid Catalysts. *Green Chemistry*. 14, 403–409.
- Hancsók J. (1999): *Korszerű motor- és sugárhajtómű üzemanyagok II. Dízelgázolajok*. Tankönyv. Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém (ISBN 963 9220 27 2)
- Hancsók J. – Holló A. – Forstner J. – Gergely J. – Perger J. (2000): Production of Environmentally Friendly Engine Gasolines with Increased Isoparaffin Content. *Petroleum and Coal*. 3–4, 166–170.
- Hancsók J. – Auer J. – Baladincz J. – Kocsis Z. – Barttha L. – Bubálik M. – Molnár I. (2005a): Interactions between Modern Engine Oils and Reformulated Fuels. *Petroleum and Coal*. 47, 2, 55–64.
- Hancsók J. – Magyar Sz. – Nguyen, K. V. S. – Szoboszlai Zs. – Kalló D. – Holló A. – Szauer Gy. (2005b): Simultaneous Desulfurization, Isomerization and Benzene Saturation of N-Hexane Fraction on Pt-H/MOR. *Studies in Surface Science and Catalysis – Molecular Sieves: From Basic Research to Industrial Applications*. Elsevier Science B. V., Amsterdam (ISBN 0 444 52083 X), 158, 1717–1724.
- Hancsók J. – Magyar Sz. – Szoboszlai Zs. – Kalló D. (2007a): Investigation of Energy and Feedstock Saving Production of Gasoline Blending Components Free of Benzene. *Fuel Processing Technology*. 88, 4, 393–399.
- Hancsók J. – Krár M. – Magyar Sz. – Boda L. – Holló A. – Kalló D. (2007b): Investigation of the Production of High Cetane Number Biogasol from Pre-Hydrogenated Vegetable Oils over Pt/HZSM-22/Al₂O₃. *Microporous and Mesoporous Materials*. 101, 1–2, 148–152.
- Hancsók J. – Krár M. – Magyar Sz. – Boda L. – Holló A. – Kalló D. (2007c) Investigation of the production of high quality biogasol from pre-hydrogenated vegetable oils over Pt/SAPO-11/Al₂O₃. *Studies in Surface Science and Catalysis 170 B – From Zeolites to porous MOF Materials*, Elsevier Science B.V., Amsterdam, (ISBN 0 444 53186-5), 2007, 170, 1605–1610.
- Hancsók J. – Baladincz J. – Magyar J. (eds.) (2008): *Mobilitás és környezet. Gyűjteményes kiadvány*. Pannon Egyetemi Kiadó, Veszprém
- Hancsók J. – Kasza T. (2011a): The Importance of Isoparaffins at the Modern Engine Fuel Production. 8th International Colloquium Fuels 2011, Stuttgart/Ostfildern, Germany, 19–20. 01. 2011. In: *Proceedings* (ISBN 3-924813-75-2), 361–373.
- Hancsók J. – Baladincz P. – Kasza T. – Kovács S. – Tóth Cs. – Varga Z. (2011b): Bio Gas Oil Production from Waste Lard. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*. Article ID 384184, 9 pages, DOI:10.1155/2011/384184
- Hancsók J. – Kovács S. – Pölcmann Gy. – Kasza T. (2011c): Investigation the Effect of Oxygenic Compounds on the Isomerization of Bioparaffins over Pt/SAPO-11. *Topics in Catalysis*. 54, 1094–1101.
- Hancsók J. – Krár M. – Kasza T. – Kovács S. – Tóth Cs. – Varga Z. (2011d): Investigation of Hydrotreating of Vegetable Oil-Gas Oil Mixtures. *Journal of Environmental Science and Engineering*. 5, 500–507.
- Hancsók J. – Kasza T. – Kovács S. – Solymosi P. – Holló A. (2012): Production of Bioparaffins by the Catalytic Hydrogenation of Natural Triglycerides. *Journal of Cleaner Production*. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.01.036
- Hanula B. (2012): *Az elektromobilitás kritikus értékelése. Mobilitás és környezet: Járműipari, energetikai és környezeti kutatások a Közép- és Nyugat-dunántúli régióban*. Magyar Tudományos Akadémia, Budapest
- Harms K. – Raatz T. (2011): *Energy and Fuels for Future Automobiles*. 8th International Colloquium Fuels, Conventional and Future Energy for Automobiles. Technischer Akademie Esslingen, Esslingen-Ostfildern, 19–20. 01. 2011.
- Kasza T. – Hancsók J. (2010a): Production of Depressed Freezing Point Bio Gas Oil from Slaughter House Waste Lard. *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*. 38, 1, 41–45.
- Kasza T. – Holló A. – Thernesz A. – Hancsók J. (2010b): Production of Bio Gas Oil from Bioparaffins over Pt/SAPO-11. *Chemical Engineering Transactions*. 21, 1225–1230.
- Kasza T. – Hancsók J. (2011a): Effects of the Process Parameters and the Composition of the Feedstock on the Catalyst Activity During the Isomerisation of Bioparaffins. 8th International Colloquium Fuels 2011. Stuttgart/Ostfildern, Germany. 19–20. 01. 2011. In: *Proceedings*. 351–357.
- Kasza T. – Solymosi P. – Varga Z. – Wahlné Horváth I. – Hancsók J. (2011b): Investigation of Isoparaffin Rich Alternative Fuel Production. *Chemical Engineering Trans.* 24, 1519–1524. ISBN 978-88-95608-16-7
- Kovács S. – Boda L. – Leveles L. – Thernesz A. – Hancsók J. (2010): Catalytic Hydrotreating of Triglycerides for the Production of Bioparaffin Mixture. *Chemical Engineering Transactions*. 21, 1321–1326.
- Kovács S. – Kasza T. – Thernesz A. – Wahlné Horváth I. – Hancsók J. (2011): Fuel Production by Hydrotreating of Triglycerides on NiMo/Al₂O₃/F Catalyst. *Chemical Engineering Journal*. 176–177, 237–243.
- Krár M. – Kovács S. – Kalló D. – Hancsók J. (2010a): Fuel Purpose Hydrotreating of Sunflower Oil on CoMo/Al₂O₃ Catalyst. *Bioresources Technology*. 101, 23, 9287–9293.
- Krár M. – Thernesz A. – Tóth Cs. – Kasza T. – Hancsók J. (2010b): Investigation of Catalytic Conversion of Vegetable Oil/Gas Oil Mixtures. In: Halász I. (ed.): *Silica and Silicates in Modern Catalysis*. Transworld Research Network, Kerala, India, ISBN 978-81-7895-455-4, 435–455.
- Krár M. – Kasza T. – Kovács S. – Kalló D. – Hancsók J. (2011): Bio Gas Oils with Improved Low Temperature Properties. *Fuel Processing Technology*. 92, 5, 886–892.
- Kriván E. – Marsi G. – Hancsók J. (2010a): Investigation of the Oligomerization of Light Olefins on Ion Exchange Resin Catalyst. *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*. 38, 1, 53–57.
- Kriván E. – Marsi G. – Hancsók J. (2010b): *Investigation of the Oligomerization of Olefin Mixtures in the Presence of Ionic Liquids*. 2nd International Symposium on Air Pollution Abatement Catalysis, Cracow, Poland, 8–11. 09. 2010. In: *Book of Extended Abstracts*. 497–499.
- Lindemann, L. (2012): The Impact of the Global Raw Material Landscape on the Worldwide Lubricants Market – or Vice-Versa? 18th International Colloquium Tribology. Industrial and Automotive Lubrication, Technische Akademie Esslingen, Esslingen-Ostfildern, 10–12. 01. 2012. *Proceedings – Suppl.* 21. MSZ EN 228:2010
- MSZ EN 590+A1:2010
- Pölcmann Gy. – Szegedi Á. – Valyon J. – Wollmann A. – Hancsók J. (2010): Catalytic Conversion of Fischer-Tropsch Waxes. *Chemical Engineering Transactions*. 21, 1315–1320.
- Pölcmann Gy. – Valyon J. – Szegedi Á. – Mihályi R.M. – Hancsók J. (2011): Hydroisomerization of Fischer-Tropsch wax on Pt/AlSBA-15 and Pt/SAPO-11 catalysts. *Topics in Catalysis*. 54, 1079–1083.
- Röj, A (2009): *Biofuels in Europe from an Automotive Industry Perspective – Present Situation and Future Trends*. 7th International Colloquium Fuels, Technischer Akademie, Esslingen-Ostfildern, 14–15. 01. 2009.
- Solymosi P. – Kasza T. – Hancsók J. (2011): Investigation of Conventional and High Oleic Acid Content Rapeseed Or Sunflower Oils. *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*. 39, 1, 85–90.
- Szalkowska, U. (2009): *Fuel Quality – Global Overview*. 7th International Colloquium Fuels, Technischer Akademie, Esslingen-Ostfildern, 14–15. 01. 2009.
- Szoboszlai Zs. – Hancsók J. – Magyar Sz. (2007): Upgrading of Benzene Containing Hexane Feeds by Simultaneous Isomerization at Low Temperature and Saturation of Benzene. 6th International Colloquium, Fuels 2007, Esslingen, Germany, 10–11. 01. 2007. In: *Proceedings*. (ISBN 3-924813-67-1) 293–302.
- Szoboszlai Zs. – Hancsók J. (2011): Development of Environmentally Friendly Engine Gasoline. 8th International Colloquium Fuels 2011, Stuttgart/Ostfildern, Germany, 19–20. 01. 2011. In: *Proceedings*. (ISBN 3-924813-75-2), 375–382.
- Thernesz A. – Hancsók J. – Varga Z. (2010a): *Belsőégésű motoroknál használható hajtóanyagok és hajtóanyag-adalékok, valamint eljárás ezek előállítására*. P0900623 sz. magyar szabadalmi bejelentés,
- Thernesz A. – Hancsók J. – Varga Z. (2010b): Fuel and Fuel Additives Capable for Use for International Combustion Engines and Process for the Production of Thereof. EP 10179216.6, európai szab. bejelentés
- Tóth Cs. – Baladincz P. – Kovács S. – Hancsók J. (2010): Producing Diesel Fuel by Co-Hydrogenation of Vegetable Oil with Gas Oil. *Chemical Engineering Transactions*. 21, 1219–1224.
- Tóth Cs. – Baladincz P. – Hancsók J. (2011a): Production of Biocomponent Containing Gas Oil with the Coprocessing of Vegetable Oil–Gas Oil Mixture. *Topics in Catalysis*. 54, 1084–1093.
- Tóth Cs. – Baladincz P. – Kovács S. – Hancsók J. (2011b): Producing Clean Diesel Fuel by Co-Hydrogenation of Vegetable Oil with Gas Oil. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 13, 4, 581–585.

MOTORBENZIN- ÉS GÁZOLAJ- KEVERŐKOMPONENSEK ELŐÁLLÍTÁSA, IZOBUTÉN OLIGOMERIZÁCIÓJÁNAK VIZSGÁLATA

Skodáné Földes Rita

az MTA doktora, egyetemi tanár,
Pannon Egyetem Kémia Intézet
Szerves Kémia Intézeti Tanszék, Veszprém
skodane@almos.uni-pannon.hu

Fehér Csaba

tanszéki mérnök,
Pannon Egyetem Kémia Intézet
Szerves Kémia Intézeti Tanszék, Veszprém

Hancsók Jenő

az MTA doktora, egyetemi tanár,
Pannon Egyetem Vegyészmérnöki
és Folyamatmérnöki Intézet MOL Ásványolaj-
és Széntechnológiai Intézeti Tanszék, Veszprém

Kriván Eszter

PhD-hallgató, Pannon Egyetem Vegyészmérnöki
és Folyamatmérnöki Intézet MOL Ásványolaj-
és Széntechnológiai Intézeti Tanszék, Veszprém

Tóth Csaba

egyetemi tanárhelyettes, Pannon Egyetem Vegyészmérnöki és Folyamatmérnöki Intézet
MOL Ásványolaj- és Széntechnológiai Intézeti Tanszék, Veszprém

A motorhajtóanyagok összetételére és minőségére vonatkozóan egyre szigorodó környezetvédelmi előírások jelennek meg. Az EU jelenlegi szabályozása szerint a motorhajtóanyagok emisszióját, különösen az üvegházhatást okozó gázok kibocsátását csökkenteni kell. A környezetvédelmi szabályok – számos egyéb adat mellett – előírják a motorbenzin maximális kéntartalmát, valamint olefin-, benzol- és aromás-tartalmát (1. táblázat).

A megfelelő minőségű motorbenzineket a kőolaj feldolgozása során nyert alapbenzin további feldolgozásával – az oktánszám növelése és a káros anyagok mennyiségének csökkentése érdekében – előállított benzin-keverőkomponensek, valamint konverziós tech-

nológiákból származó benzinek különböző arányú keverésével állítják elő.

A motorbenzinek legértékesebb keverőkomponensei az izoparaffinok (vagyis elágazó láncú paraffinok), melyek viszonylag tisztán égnek, nagy az oktánszámuk, és jobbak az égési tulajdonságaik, mint az aromás- vagy olefin szénhidrogéneknek. Ezek az elágazó láncú vegyületek előállíthatók izobután (i-C₄) C₃-C₅ olefinekkel történő alkilezésével, C₅-C₆ normál (vagyis egyenesláncú) paraffinok oligomerizációjával, vagy könnyű olefinek oligomerizációjával keletkező telítetlen vegyületek hidrogénezésével (1. ábra).

A kőolajfeldolgozás során nyerhető motorhajtóanyagok mennyiségének növelésére

jellemzők	Európai Unió				Amerikai Egyesült Államok			WWFC
	EN 228 „Euro3” MSZ EN 228 (2000)	EN 228 „Euro4” MSZ EN 228 (2005)	EN 228 „Euro5” MSZ EN 228 (2009)	EN 228 „Euro5” MSZ EN 228 (2009)	RFG Phase 3 (2004/2006)	CARB Phase 3 (2004/2006)	CARB Phase 3 (2009)	
kéntart., mg/kg max.	500	150	50 / 10 ³	10	300 / 80	60 / 30	30 / 20 ¹	10
aromástart. v/v% max.	–	42	35	35	–	35	35	35
olefintart., v/v% max.	–	18	18	18	–	10	10	10
benzoltart., v/v% max.	5,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	0,7	1,0
oxigéntart., % max.	–	2,7	2,7	2,7	1,5 – 3,5 / 2,1	1,8 – 3,5	1,8 – 3,5	2,7
Reid-gőznyomás, kPa, max.	35 – 100	60 – 70 ³	60 – 70 ³	45 – 105 ⁴	44 – 69	44 – 50	41 – 50	45 – 105 ⁴

1. táblázat • Motorbenzinek minőségi előírásainak változása

(¹ 30 mg/kg az átlagra vonatkozó előírás (averaging limit); 80 mg/kg legfeljebb (cap limit); 15 mg/kg az átlagra vonatkozó előírás; 2004-től 60 mg/kg, 2006-től 30 mg/kg, 2011-től 20 mg/kg cap limit)

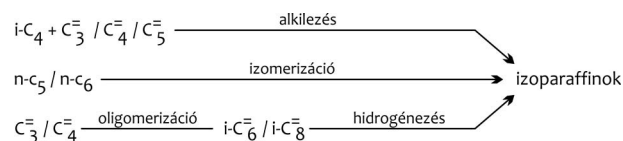
² a szabvány legfeljebb 50 mg/kg kéntartalmat ír elő, de meghatározott területi eloszlásban hozzáférhetővé kell tenni a 10 mg/kg-nál kisebb kéntartalmú hajtóanyagokat is

³ nyári minőség/téli minőség

⁴ földrajzi fekvéstől, átlaghőmérséklettől függően

– nincs előírás

RFG: Reformulated gasoline; CARB: California Air Resources Board; WWFC: World Wide Fuel Charter (Világérvényű Motorhajtóanyag Kart)



1. ábra • Izoparaffinok előállítása

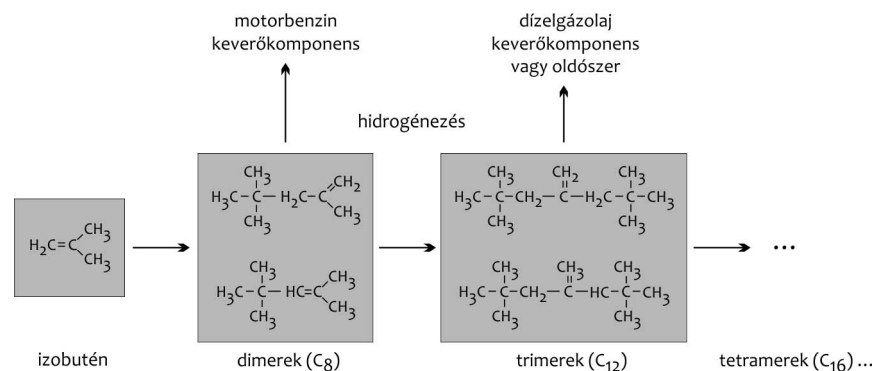
a hosszú szénláncú szénhidrogéneket tartalmazó frakciókat fluid katalitikus krakkolással (*fluid catalytic cracking – FCC*) alakítják értékesebb, kisebb szénatomszámú termékeké. Az FCC benzin keverőkomponensként történő közvetlen felhasználását a nagy olefin-tartalom és a magas gőznyomás korlátozza, ezért célszerű a további feldolgozása.

Az FCC-katalizátorok használatával a termékben a könnyű olefinek részaránya növekszik a paraffinokhoz képest, az elágazó láncú telítetlen vegyületek pedig nagyobb mennyiségben keletkeznek az egyenesláncúakhoz képest. Ezért a könnyű FCC-benzin-frakció nagyon alkalmas kiindulási anyag az oligomerizációval, majd ezt követő hidrogénezéssel megvalósítható keverőkomponens-előállításához. Bár az olefinek oligomerizációja régóta kutatott terület, az igények növekedése miatt az elmúlt években a könnyű olefinek, elsősorban az izobutén oligomerizációjának

(2. ábra) vizsgálata különösen intenzívvé vált.

Kezdetben a fő cél az izobutén dimerek szelektív előállítása volt, hiszen a C₈ termékek hidrogénezésével kívántak a megfelelő benzin-keverőkomponenshez jutni. A tetramerek hidrogénezésével keletkező termékek kívül esnek a benzinfrakció forrásponttartományán, a C₁₂ termékek nagy mennyisége sem kívánatos a benzinben. Mivel azonban a sugárhajtómű-üzemanyag (JET), illetve dízelgázolaj keverőkomponenseiként éppen a magasabb forráspontú termékek használhatóak, akár a C₈-, akár a C₁₂-vegyületek előállítása szempontjából szelektív katalizátorok kifejlesztése elsődleges kérdés. A triizobutén (C₁₂-termékek) nem csupán motorhajtóanyag komponenseként szolgálhat, hasznosítható oldószerként vagy nagy értékű finomvegyszerek kiindulási anyagaként is.

Az olefinek oligomerizációja savkatalizált reakció, mely Brønsted- vagy Lewis-savak



2. ábra • Izobutén oligomerizációja

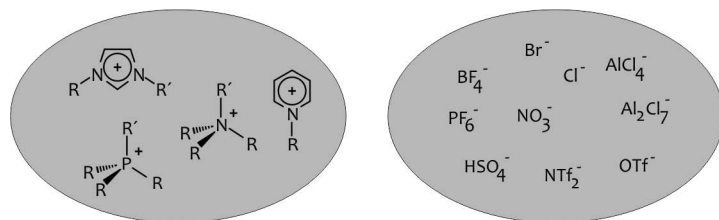
jelenlétében mind homogén-, mind heterogén fázisban kivitelezhető (Olah – Molnár, 2003). A folyadékfázisban sav katalizátor jelenlétében lejátszódó reakciók esetén nehéz a hőmérséklet megfelelő szabályozása, ezért a dimerek mellett magasabb szénatomszámú oligomerek elegye keletkezik számottevő mennyiségben. Szilárd hordozóra vitt foszorsavtartalmú katalizátorokat az 1930-as évek óta alkalmaznak már (Coetzee et al., 2006). Az első, butének dimerizációjára vonatkozó ipari eljárást 1935-ben vezették be (Universal Oil Products – UOP), a Vlagyimir Nyikolajevics Ipatyev (Vladimir Ipatieff) nevéhez fűződő felfedezés nagymértékben elősegítette a gépkocsik elterjedését. A szilárd foszorsav-katalizátor sokáig megőrizte vezető szerepét, az utóbbi időben azonban környezetvédelmi szempontból kedvezőbb, katalizátorként savas karakterű ioncserélő gyantákat alkalmazó eljárások terjedtek el (Pujadó – Ward, 2008). A reakciókörülmények megfelelő megválasztásával (alacsonyabb hőmérséklet, folyadékfázisú reakció) a korábbi foszorsavas eljárásához képest a C₈-szelektivitás lényegesen növelhető. Míg foszorsav katalizátor esetén a dimerek mennyisége 55% körül volt, addig az ioncserélő gyantát alkalmazó eljárásokban akár a 85–90%-ot is elérheti. A megfelelő szelektivitás víz vagy alkohol hozzáadásával érhető el. Mivel ezek a poláris komponensek protonakceptorként működnek, akadályozzák a dimerek további reakcióját, és a magasabb szénatomszámú oligomerek képződését.

Az ioncserélő gyanták mellett a zeolitok is jól ismert, savas karakterű, szilárd katalizátorok. A kationcserélő gyantákkal szembeni előnyük, hogy kalcinálással könnyen regenerálhatók és lényegesen magasabb hőmérsékletáig stabilak. ZSM-5-öt és más hasonló

zeolitokat már az 1970-es és 80-as évektől használnak a MOGD- (*Mobil olefin to gasoline and distillate*) eljárásban. (Olah – Molnár, 2003). A reakciókörülményektől függően akár dimerek, akár magasabb szénatomszámú oligomerek is előállíthatóak. Viszonylag alacsony hőmérsékleten és nagy nyomáson (200–300 °C, 20–105 bar) nagy molekulatömegű olefinek képződnek, melyek hidrogénezés után dízelgázolaj vagy JET-hajtóanyag komponensei lehetnek. Magasabb hőmérséklet és alacsonyabb nyomás alkalmazásával kisebb molekulású termékeket állítanak elő, melyek hidrogénezésével motorbenzin-keverőkomponenshez jutnak.

Az előzőekkel szemben a Dimersol-eljárás – melyet az Institut Français du Pétrole (IFP) fejlesztett ki – nikkelsóból és alkil-alumínium vegyületből képződő fémorganikus katalizátor használatán alapul (Pujadó – Ward, 2008). Ez volt a kőolajfinomításban az egyik első, homogén katalitikus módszert alkalmazó eljárás; az első üzem 1977-ben létesítették. Többféle változata is létezik, propén (Dimersol G), etén és propén (Dimersol E) vagy propén és butén elegyek (Dimersol X) oligomerizációjára adaptálható. A konverzió (a kiindulási olefin átalakulásának mértéke) és a szelektivitás (a dimerek, illetve nagyobb szénatomszámú oligomerek aránya) a tartózkodási időtől és a katalizátor koncentrációjától függ. A konverzió növelését általában több reaktor összekapcsolásával oldják meg. A katalizátor a kiindulási anyaggal és a termékekkel homogén fázist alkot, a reakció végén megsemmisítik, így nem lehet újra felhasználni.

E hátrány kiküszöbölésére Yves Chauvin és az IFP munkatársai egy módosított eljárást dolgoztak ki, amelyben a katalizátort ionos folyadékban oldották (Centi – Perathoner, 2009).



3. ábra • Az ionos folyadékok leggyakoribb kationjai és anionjai

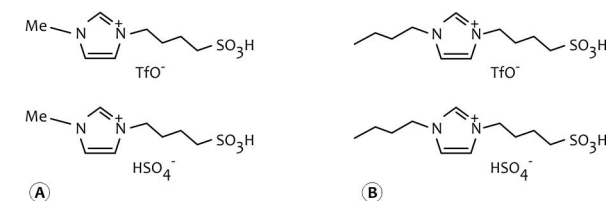
Az ionos folyadékok olyan, viszonylag alacsony hőmérsékleten folyékony halmazállapotú anyagok, amelyeket teljes egészében ionok építenek fel. A klasszikus sóoldadékoktól különlegesen alacsony olvadáspontjuk (100–150 °C alatt) különbözteti meg őket. Általában lényegesen kevésbé korrozívak, mint magas olvadáspontú társaik. Vonzóvá teszi őket nagy termikus és kémiai stabilitásuk is. Az általánosan vizsgált, alacsony olvadásponttal rendelkező ionos folyadékok kationjai általában nagy térkitöltésű, alacsony szimmetriával rendelkező szerves foszfónium-, ammónium-, piridinium- vagy imidazoliunionok (3. ábra). Fizikai tulajdonságaikat (például: vízdoldhatóság, viszkozitás stb.) nagyon jelentősen befolyásolják az anionok. Ezek lehetnek egymagvúak (például $[\text{BF}_4]^-$, $[\text{PF}_6]^-$) vagy többmagvúak (például $[\text{Al}_2\text{Cl}_7]^-$) is. Fontos jellemzőjük, hogy rosszul elegyednek apoláris szerves vegyületekkel (pl. szénhidrogénnel), viszont jól oldanak poláris szerves vagy szervetlen anyagokat. Ez lehetővé teszi, hogy különböző reakciók oldószereiként szolgáljanak.

A kationok és anionok megfelelő párosításával az ionos folyadékok tulajdonságai (hidrofil/hidrofób karakter, viszkozitás, polaritás, olvadáspont) jól hangolhatók, így egy adott feladathoz kifejleszthető az optimális paraméterekkel rendelkező ionos folyadék.

Chauvin és munkatársai felfedezték, hogy az 1-butil-metilimidazoliunion-klorid (bmimCl)-

AlCl_3 -Et AlCl_2 terner ionos folyadékegyben a Dimersol-eljárás katalizátor-prekursoraként alkalmazott nikkelsó jól oldódik, és aktív katalizátorként működik (Difasol-eljárás). Az ionos folyadék ráadásul növeli a katalizátor stabilitását is. Ennél a módszernél az oligomerizáció kétfázisú rendszerben atmoszférikus nyomáson, -15 °C – +5 °C hőmérséklettartományban játszódik le. A kétfázisú rendszer azt jelenti, hogy a termék nem oldódik az ionos folyadékban, hanem külön fázist alkot, mely könnyebb az ionos folyadéknál, így attól könnyen elválasztható. A nikkel katalizátor az ionos folyadékfázisban marad oldott állapotban, ez lehetővé teszi az ionos folyadék-katalizátorelegy elkülönítését, visszanyerését és többszöri felhasználását. További előny, hogy az ionos folyadékban a katalizátor aktivitása nagyobb, mint a Dimersol-eljárásban, így a szükséges katalizátormennyiség a tizedére csökkenthető. Emellett jobb a dimerszelektivitás is; nagyobb szénatomszámú oligomerek alig keletkeznek. A jelenséget azzal magyarázták, hogy a dimerek kevésbé oldódnak ionos folyadékban, mint a monomerek, így csökken a trimerekhez vezető reakció sebessége.

Az ionos folyadékok között vannak Lewis-, illetve Brønsted-savak is, melyek a savkatalizált reakciókban helyettesíthetik a szokásos katalizátorokat. Kenneth R. Seddon és munkatársai felfedezték, hogy a bmimCl-ból és AlCl_3 -ból képződő, ún. klóraluminát típusú,



4. ábra • A kísérletek során alkalmazott metil-imidazol (A) és butil-imidazol (B) alapú ionos folyadékok

Lewis-sav-karakterrel rendelkező ionos folyadékok önmagukban is alkalmasak az izobutén oligomerizációjának katalizálására (Abdul-Sada et al., 1995).

További kutatások szerint szintén jó katalizátornak mutatkoztak a szulfonsavcsoportot tartalmazó, Brønsted-sav-ionos folyadékok is (Gu et al., 2003). Deng és munkatársai megállapították, hogy az oligomerizáció szelektivitását alapvetően befolyásolja az imidazoliunion kation oldalláncának hossza: a rövidebb oldallánc alkalmazása egyértelműen a dimerek képződésének kedvezett. Ezt a jelenséget azzal magyarázták, hogy a hosszabb oldalláncot tartalmazó ionos folyadék polaritása kisebb, jobban oldja a termék dimereket, így kedvez ezek további reakciójának: a trimerek és tetramerek képződésének. Víz hozzáadásával a dimer-szelektivitás növelhető volt.

Bár az ionos folyadékokat mint újra felhasználható, környezetkímélő oldószereket egyre elterjedtebben alkalmazzák különféle szintézisekben (Olivier-Bourbigou et al., 2010), ipari alkalmazásuk kevésbé jellemző. Nagy viszkozitásuk miatt kezelésük, elválasztásuk és újrafelhasználásuk gyakran problémát okoz. A kétfázisú rendszerekhez nagy mennyiségű ionos folyadékot kell használni, de ezek ára pillanatnyilag még meglehetősen magas. Megoldást jelenthet az ionos folyadékok rögzítése szilárd hordozón (Rüesager et al., 2006). Ekkor nagyobb felületen érintkez-

het az ionos folyadék a benne nehezen oldódó apoláris komponensekkel, könnyebben kezelhető, a terméktől való elválasztása egyszerűbb, és folyamatos üzemű, átfolyásos reaktorban is könnyen alkalmazható.

A fentiek alapján célul tűztük ki az oligomerizáció katalizálására korábban alkalmasnak talált, SO_3H funkciós csoportot tartalmazó imidazoliunion típusú ionos folyadékok rögzítését szilárd hordozón, valamint az így kapott katalizátorok tesztelését izobutén oligomerizációja során.

Négyféle Brønsted-sav típusú ionos folyadékot készítettünk, és hőkezelt szilikagél-hordozón rögzítettük őket (Fehér et al., 2012). Az ionos folyadékokat a rövidebb oldalláncot tartalmazó metil-imidazollból, és a hosszabb oldalláncú butil-imidazollból, kétféle anion: trifluorometánszulfonát (TfO^-) és hidrogénszulfát (HSO_4^-) felhasználásával készítettük (4. ábra). A hordozóként alkalmazott szilikagélt az ionos folyadék rögzítése előtt 150 °C-on, 250 °C-on vagy 450 °C-on hőkezeltük. A reakciókat saválló autoklávban kiviteleztek. Az autoklávba bemértük a katalizátort, az autoklávot -15 °C-ra hűtöttük, majd bemértük az izobutént. Ezután az autoklávot 20 bar nyomásra töltöttük argon gázzal. A reakcióelegyet az alapreakcióban 100 °C-on kevertük öt órán keresztül. Az autoklávot -15 °C-ra hűtöttük, a szerves fázist elválasztottuk, és a termékelegyet gázkromatográfiás módszerrel

elemeztük. A rögzített katalizátort pentánnal mostuk, vákuumban szárítottuk, majd újra felhasználtuk.

Első lépésként összehasonlítottuk az ionos folyadékok és a belőlük készített rögzített katalizátorok aktivitását és szelektivitását. Az alkalmazott reakciókörülmények között az ionos folyadékok jó (98–99%) átalakulást biztosítottak. A reakció szelektivitása a vártaknak megfelelően alakult: a rövidebb oldalláncot tartalmazó ionos folyadék jelenléte a dimerizációnak kedvezett, míg a másik esetben a trimer volt a fő termék. A rögzített katalizátorok szintén aktívnak bizonyultak. Minden esetben teljes átalakulást tapasztaltunk, annak ellenére, hogy az ionos folyadék/izobutén arány csupán tizede volt a nem rögzített ionos folyadék esetében alkalmazottaknak. Így bebizonyosodott, hogy a rögzítéssel a katalizátor aktivitása valóban növekszik.

A rögzítés hatására ugyanakkor módosult az oligomerizáció szelektivitása. A metil-imidazol tartalmú katalizátor esetén a fő termékek a trimerek voltak, melyek aránya a szilikagél-előkezelés hőmérsékletének növekedésével kis mértékben nőtt. Ezzel ellentétben a hosszabb oldalláncot tartalmazó, rögzített ionos folyadékkal kapott termékegyben csökkent a C_{12} -termékek aránya. A hidrogén-szulfát aniont tartalmazó katalizátorok kitűnő (80% feletti) dimer-szelektivitást mutattak.

A továbbiakban vizsgáltuk a katalizátorok többszöri felhasználásának lehetőségét. Megállapítottuk, hogy trifluormetánszulfonát aniont tartalmazó katalizátorok akár nyolc lépésen keresztül is megőrzik aktivitásukat, és az újrafelhasználás során nem tapasztalható jelentős változás a szelektivitásban sem. Ezzel ellentétben a hidrogén-szulfát anionnal rendelkező ionos folyadékok rögzítésével kapott katalizátorok aktivitása jelentősen csökkent.

Az izobutén átalakulása a metil-imidazol-származék jelenlétében 85%-ról 22%-ra, a butil-imidazol-tartalmú katalizátor esetében 92%-ról 72%-ra, majd 38%-ra csökkent a többszöri felhasználás során. Ezért a jó dimer-szelektivitás ellenére e katalizátorok használatát elvetettük, és csak a trifluormetánszulfonát aniont tartalmazó katalizátorok hatásosságát vizsgáltuk a továbbiakban. Elsősorban a reakciókörülmények (hőmérséklet és reakcióidő) változtatásának hatását tanulmányoztuk.

A metil-imidazol-tartalmú katalizátor használatakor már 1 óra után is teljes átalakulást tapasztaltunk. A hosszabb oldalláncot tartalmazó ionos folyadék jelenlétében ugyan a konverzió 98% felett volt már 1 óra elteltével is, teljes átalakulást csak 5 óra után kapunk. Hosszabb reakcióidő alkalmazásakor mindkét esetben változott kissé a reakció szelektivitása a magasabb szénatomszámú oligomerek javára.

Mindkét katalizátorral teljes átalakulást sikerült elérnünk 100 °C-on 5 óra reakcióidő után, de a butil-imidazol tartalmú rögzített ionos folyadék jelenlétében már 60 °C-on is 90% felett volt a konverzió. Ezen a hőfokon mindkét esetben jó C_8 -szelektivitást tapasztaltunk, a dimerek aránya a butil-imidazol tartalmú katalizátornál volt nagyobb: 88%. A hőmérséklet növekedésével a magasabb szénatomszámú oligomerek aránya nőtt, így a C_{12+} -termékek képződésének a 120 °C reakcióhőmérséklet kedvezett. Ekkor a rövidebb oldalláncot tartalmazó katalizátornál dimerek csupán 14%-ban képződtek, a fő termékek a trimerek (48%) és a tetramerek (36%) voltak.

Az új típusú katalizátorok tehát többféle igényt is kielégíthetnek. A reakciókörülményeknek és a katalizátor minőségének összehangolásával jó szelektivitással állíthatók elő akár a dimerek, akár a $C_{12}+C_{16}$ -termékek.

Végül a katalizátorhordozó szemcseméretét változtattuk. A metil-imidazol tartalmú ionos folyadékot az eddig használt 0,04–0,06 mm helyett 0,2–0,5 mm-es, illetve 3–6 mm-es szilikagélszemcsékre rögzítettük. A közepes mérettartományú hordozóval készített katalizátor tulajdonságai nem tértek el lényegesen az előzőtől. Jó aktivitást és 55% körüli trimer-szelektivitást mutatott. Már 1 óra reakcióidő után is teljes izobutén-átalakulást tapasztaltunk. Az eredmények a katalizátor többszöri felhasználása során sem változtak.

A 3–6 mm mérettartományú hordozóra vitt katalizátor aktivitása már észrevehetően kisebb volt az előzőekhez viszonyítva. 1 óra reakcióidő után az izobutén átalakulása csak 38% volt, de a reakcióidő növelésével (4 óra után) a konverzió itt is teljessé tehető. A katalizátor C_{12} -szelektivitása viszont kitűnőnek bizonyult. A kisebb szemcseméretű katalizátorokkal kapott eredményekhez képest csökkent a C_{16} -termékek aránya, nem változott viszont a dimerek mennyisége. Ennek köszönhetően a C_{12} -szelektivitás 65% körül volt, és ezt az értéket a katalizátor többszöri felhasználás után is megtartotta.

IRODALOM

- Abdul-Sada, A. K. – Ambler, P. W. – Hodgson, P. K. G. – Seddon, K. R. – Stewart, N. J. (1995): *Ionic Liquids*, WO9521871. BP Chemicals Ltd.
- Centi, G. – Perathoner, S. (2009): Methods and Tools of Sustainable Industrial Chemistry: Catalysis. In: Cavani, F. – Perathoner, S. – Trifirò, F. (eds.): *Sustainable Industrial Chemistry*. Wiley, 73–198.
- Coetzee, J. H. – Mashap, T. A. – Prinsloo, N. M. – Rademan, J. D. (2006): An Improved Solid Phosphoric Acid Catalyst for Alkene Oligomerization in a Fischer–Tropsch Refinery. *Applied Catalysis A*, 308, 204–209.
- Fehér C. – Kriván E. – Hancsók J. – Skoda-Földes, R. (2012): Oligomerisation of Isobutene with Silica Supported Ionic Liquid Catalysts. *Green Chemistry*, 14, 403–409.

Az eredmények alapján a szilikagél hordozóhoz rögzített Brønsted-sav típusú ionos folyadékok az izobutén oligomerizációjának alkalmas katalizátorai. A rögzítés következtében a katalizátor kezelése lényegesen egyszerűbb, szükséges mennyisége kisebb.

Az oligomerizáció szelektivitását több tényező is befolyásolja: függ az imidazolium kation N-alkil láncának hosszától, a hordozó szemcseméretétől, a hordozó előkezelésének hőmérsékletétől és az oligomerizáció hőmérsékletétől. A reakciókörülmények és a katalizátorok alkalmas megválasztásával juthatunk a kívánt termékekhez. Mindez azt mutatja, hogy e katalizátorok rugalmasan alkalmazhatók a piaci igényeknek megfelelően.

Jelen cikk a TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KONV-2010 projekt keretében készült. A projekt a magyar állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Kulcsszavak: *oligomerizáció, ionos folyadék, szilikagél hordozó, rögzített katalizátor, újrafelhasználhatóság*

- Gu, Y. – Shi, F. – Deng, Y. (2003): SO_3H -functionalized Ionic Liquid as Efficient, Green and Reusable Acidic Catalyst System for Oligomerization of Olefins. *Catalysis Communications*, 4, 579–601.
- Olah G. A. – Molnár A. (2003): *Oligomerization and polymerization, Hydrocarbon Chemistry* (2nd edition). John Wiley & Sons, 723–806.
- Olivier-Bourbigou, H. – Magna, L. – Morvan, D. (2010): Ionic Liquids and Catalysis: Recent Progress from Knowledge to Applications. *Applied Catalysis A*, 373, 1–56.
- Pujadó, P. R. – Ward, D. J. (2008): Catalytic olefin condensation. Handbook of Jones, D. S. J. – Pujadó, P. R. (eds.): *Petroleum Processing*. Springer, 372–399.
- Risager, A. – Fehrmann, R. – Haumann, M. – Wasserscheid, P. (2006): Supported Ionic Liquids: Versatile Reaction and Separation Media. *Topics in Catalysis*.

GÁZOLAJPÁRLAT MINŐSÉGJAVÍTÁSA KATALITIKUS ÚTON

Varga Zoltán Hancsók Jenő

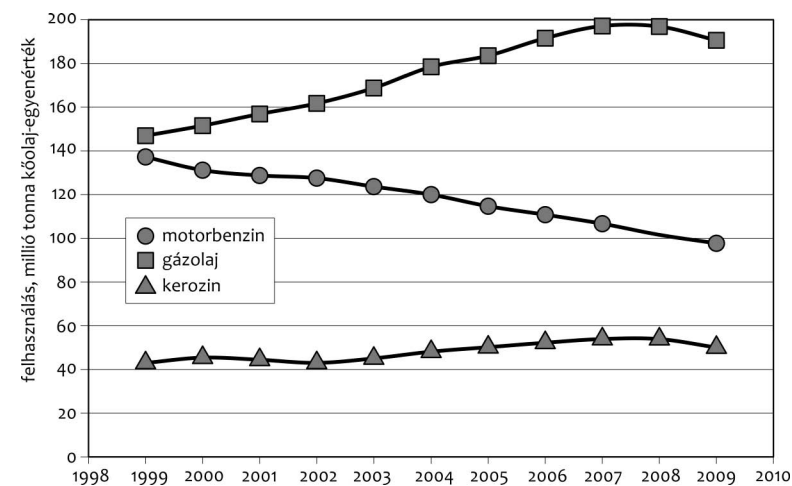
PhD, egyetemi docens
vargaz@almos.uni-pannon.hu

az MTA doktora,
egyetemi tanár, intézeti tanszékvezető

Eller Zoltán

okl. vegyészmérnök, PhD-hallgató

Pannon Egyetem, Vegyészmérnöki és Folyamatmérnöki Intézet,
MOL Ásványolaj- és Széntechnológiai Intézeti Tanszék, Veszprém



1. ábra • A motorhajtóanyag-felhasználás változása az Európai Unióban

Bevezetés

Napjainkban világszerte növekszik az igény a jó minőségű – kis kén-, nitrogén- és csökkentett aromástartalmú, de nagy izoparaffintartalmú – középpárlatok (kerozin, dízelgázolaj) iránt (Stanislaus, 2010; Hancsók–Kasza, 2011). Az 1. ábra jól szemlélteti, hogy az Európai Unióban a 90-es évek végétől a motorbenzin-felhasználás folyamatosan csökkent, míg a keroziné és a dízelgázolajé növekedett, amit csak a 2009-ben bekövetkezett gazdasági válság tört meg (European Commission, 2011; Arora – Mukherjee, 2011).

A mennyiségi növekedésen túl a dízelgázolajok minőségi előírásaiban is jelentős változás következett be (1. táblázat). A táblázatból jól látható, hogy a szabványban (MSZ EN 590) előírt minőségi jellemzők közül a legnagyobb változás a dízelgázolajok legfeljebb megengedett kén tartalmában következett be (350 mg/kg → 10 mg/kg). Ezen kívül, a gázolajok többgyűrűs aromástartalma is korlátozva lett előbb 11, majd 2009-től 8%-ban, és

ez az érték várhatóan tovább fog csökkenni a közeljövőben. Az autógyártók világszövetsége által elvárt minőségi jellemzőket összefoglaló WWFC-ben a fejlett országokra vonatkozó termék előírások aromástartalom tekintetében szigorúbbak, mint a szabványos értékek. A többgyűrűs aromástartalom legfeljebb 2% lehet, míg az összes aromástartalom is 15%-os korlátozás alá esik.

A szigorítások oka, hogy a korszerű, kis emissziójú dízelmotoros gépjárművek hajtásához környezetbarát, nagy energiatartalmú dízelgázolajokra van szükség. A motorhajtóanyag kén tartalmából képződő kén-oxidok mérgezik a kipufogógáz-kezelő rendszerekben alkalmazott katalizátorokat, csökkentve azok aktivitását (Matsumoto, 2004; Nagy – Hancsók, 2007). A gázolajok többgyűrűs aromástartalma hozzájárul a koromrészecske, illetve a kondenzáltgyűrűs szénhidrogének emissziójához. Az aromások magas láng hőmérsékletet okoznak a hajtóanyag égése során, ami az NO_x-emisszió növekedéséhez vezet. Továbbá az aromás vegyületek kis cetánszáma

rossz égési karakterisztikát eredményez a motorban, amely egyenetlen járáshoz, a motorhajtóanyag-fogyasztás és ezzel együtt az emisszió növekedéséhez vezet.

Kísérleti munka

Kutatási tevékenységünk célja volt, hogy meghatározzuk egy nehéz gázolajpárlat kéneltetésének és aromástartalom-csökkentésének előnyös technológiai elrendezését és kedvező műveleti paramétereit (hőmérséklet, nyo-

más, folyadékterhelés). A technológiai elrendezés vizsgálata során mind az egylépéses, mind a kétlépéses katalitikus hidrogénezés lehetőségét vizsgáltuk.

Kísérleti tevékenységünk során a 2. táblázatban megadott minőségi jellemzőkkel rendelkező alapanyagokat alkalmaztuk. A második lépésben felhasznált alapanyagot az első hidrogénezési lépés kedvező műveleti paramétereit mellett állítottuk elő.

jellemző	MSZ EN590 (2000)	MSZ EN590 (2004)	MSZ EN590+A1 (2009)	WWFC* category 4 (2006)
sűrűség 15 °C-on, kg/m ³	820–845	820–845	820–845	820–845
kéntartalom, mg/kg	350	50/10	10	10
többgyűrűs aromások, %	11	11	8	2
összes aromás, %	—	—	—	15
a desztillációs görbe 95 ftf%-os értékéhez tartozó hőmérséklet, °C	360	360	360	340

1. táblázat • A dízelgázolaj minőségi jellemzőinek változása (*WWFC – World Wide Fuel Charter)

jellemző	érték	
	1. lépés	2. lépés
sűrűség 15 °C-on, kg/m ³	860,0	853,1
kéntartalom, mg/kg	9910	187
nitrogéntartalom, mg/kg	286	81
összes aromástartalom, %	35,9	26,7
egygyűrűs aromások, %	21,4	19,1
két- és többgyűrűs aromások, %	14,5	7,6
forrásponttartomány, °C	188 – 376	195 – 368

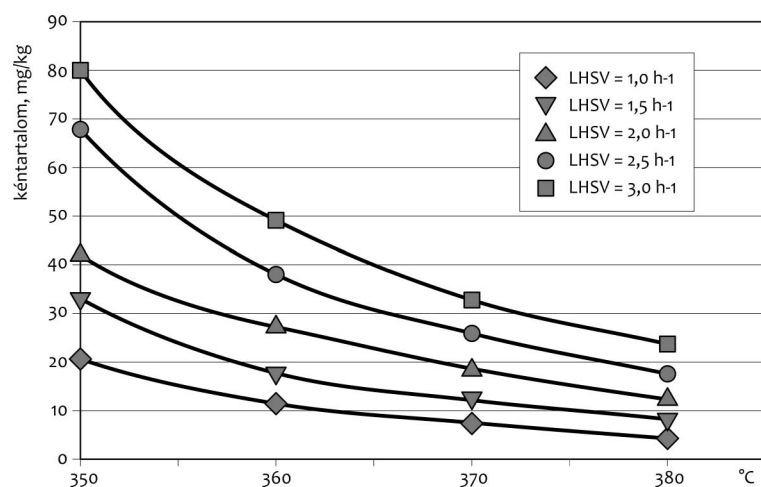
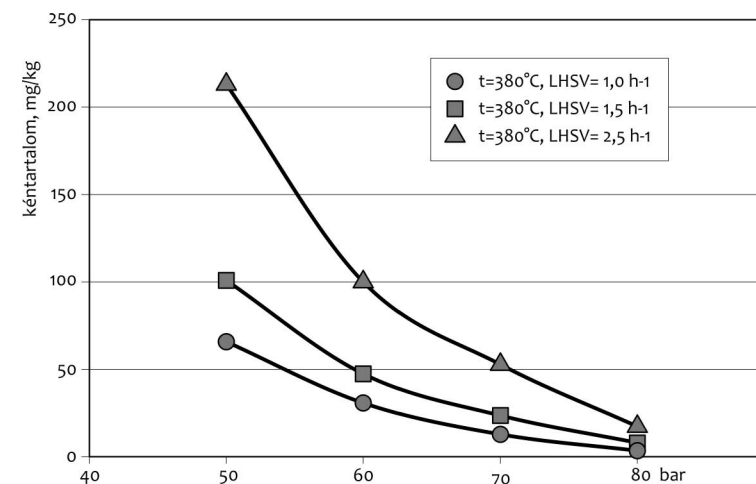
2. táblázat • A felhasznált alapanyagok jellemzői

Az első hidrogénezési lépést NiMo/Al₂O₃, míg a másodikat PtPd/USY-zeolit katalizátoron folytattuk le. A heterogén katalitikus kísérleteket egy 100 cm³ hasznos térfogatú csőreaktort tartalmazó nagynyomású reaktorrendszerben végeztük, amely tartalmazta mindazokat a berendezéseket és eszközöket, amelyek egy ipari hidrogénező üzemben is megtalálhatóak. A vizsgálatokat állandósult katalizátoraktivitás mellett, folyamatos üzem-

módban végeztük. Az alapanyagok és az előállított termékek minőségi jellemzőit szabványos mérési módszerekkel határoztuk meg.

Eredmények és értékelésük

Egylépéses eljárás • A kéntartalom változását a vizsgált NiMo/Al₂O₃ katalizátoron a hőmérséklet és a folyadékterhelés függvényében 80 bar össznyomás esetén a 2. ábra mutatja. Látható, hogy a termékek kéntartalma mind

2. ábra • Kéntartalom változása a hőmérséklet és a folyadékterhelés függvényében (NiMo/Al₂O₃ katalizátor, 80 bar össznyomás)3. ábra • Kéntartalom változása a nyomás és a folyadékterhelés függvényében (NiMo/Al₂O₃ katalizátor, 380 °C)

a hőmérséklet, mind az LHSV,¹ a folyadékterhelés – (cm³_{betáp}/h)/cm³_{katalizátor} → h⁻¹ –, de különösen ezek együttes hatására kisebb lett. Az alapanyag jelentős kéntartalma (9910 mg/kg) 350 °C és 3,0 h⁻¹ folyadékterhelés esetén is már nagymértékben csökkent.

A feltüntetett adatok azt is jól szemléltetik, hogy a további hőmérsékletnövelés hatására a kéntartalom már csak kisebb mértékben változott. Ennek oka az, hogy a maradó kénvegyületek adják, amelyek molekulaszervezetükből adódóan kis reakcióképességűek. Ezek a kénvegyületek elsősorban a dibenzotiofénnek olyan alkilszármazékai, amelyek az aromagyűrűben a kénatom melletti szénatomon tartalmaznak alkilcsoportokat, például a 4,6 dimetil-dibenzotiofén (Ho 2004; Varga et al., 2006; Varga et al., 2007; Stanislaus et al., 2010).

A jelenleg érvényes termékszabványban előírt legfeljebb 10 mg/kg kéntartalomnak

megfelelő termékeket csak magas hőmérsékleten és kis folyadékterhelés mellett tudtuk előállítani (1,0 és 1,5 h⁻¹ folyadékterhelés 380 °C-on, és 1,0 h⁻¹ folyadékterhelés 370 °C-on). A szükséges nagy hőmérséklet kedvezőtlen a katalizátor élettartama, illetve az energiafelhasználás szempontjából. A kis folyadékterhelés pedig csökkenti a termelékenységet, illetve növeli a katalizátorköltséget.

A hőmérséklet hatása mellett vizsgáltuk az össznyomását is. A 3. ábráról látható, hogy az össznyomás növelésével állandó hőmérséklet (380 °C) esetén a nyert termékek kéntartalma rendre kisebb lett. Az össznyomás növelése 50 bar-ról 60 bar-ra nagyobb, míg a további nyomásnövelés kisebb mértékben járult hozzá a kéntartalom csökkenéséhez.

Ezek alapján megállapítottuk, hogy a megfelelően kis kéntartalmú (≤10 mg/kg) termék előállítása csak nagy nyomás (80 bar) és kis folyadékterhelés esetén volt lehetséges. A nagy nyomás alkalmazása a beruházási, míg a jelentős kompressziós munka az üzemeltetési költségeket növeli.

¹ LHSV – Liquid Hourly Space Velocity

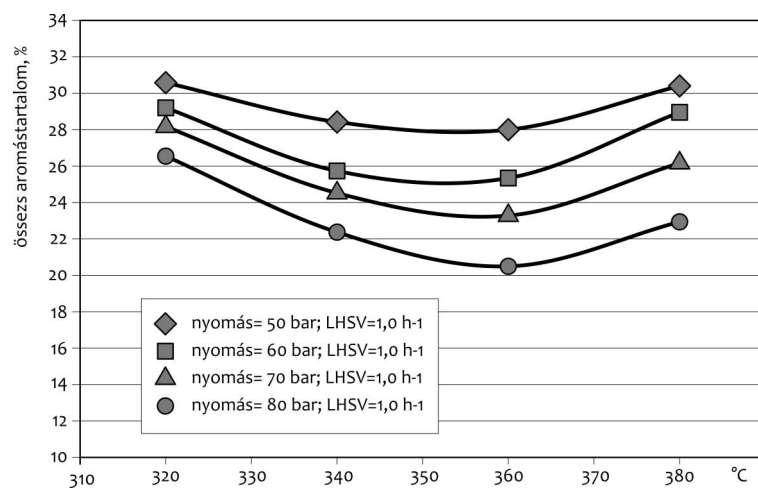
A kéntartalom mellett kísérleti tevékenységünk fontos része volt a műveleti paraméterek hatásának vizsgálata az aromástartalom változására az alkalmazott $\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ katalizátoron.

A 4. ábrán az összes aromástartalom változását tüntettük fel a hőmérséklet és a nyomás függvényében, $1,0 \text{ h}^{-1}$ folyadékterhelés esetén. Látható, hogy a hőmérséklet függvényében az összes aromástartalom minimumgörbe szerint változott. Eszerint a hőmérséklet növelésével a termékek összes aromástartalma a $350\text{--}360^\circ\text{C}$ hőmérséklettartományig csökkent, majd a további hőmérsékletnövelés hatására a csökkenés mértéke kisebb lett. A minimumgörbe szerinti változás oka, hogy az aromások hidrogénezési folyamata egyensúlyi, exoterm reakció. A hőmérséklet növelése egy határérték felett az egyensúlyt a dehidrogénezés irányába tolja el. Azaz, magasabb hőmérsékleteken, amikor is a reakciósebesség megfelelően nagy ahhoz, hogy a termodinamikai egyensúlyi koncentrációk kialakuljanak, a hőmérséklet növelésével az

aromástelítés mértéke csökken (termodinamikailag gátolt tartomány). A minimumpontnál kisebb hőmérsékleteken a kis reakciósebesség miatt a termodinamikai egyensúlyi koncentrációt nem érjük el. Ebben a tartományban a hőmérséklet növelése kedvezően hat az aromás hidrogénezésre (reakció-kinetikailag gátolt tartomány).

A 4. ábra jól tükrözi, hogy minden vizsgált hőmérséklet esetén az össznyomás, ezzel együtt a hidrogén parciálisnyomás-növelése kedvezően hat az aromások telítésére. A nyomás növelésével részben kompenzálni lehet a hőmérsékletemelést kedvezőtlen hatását.

Jelenleg a dízelgázolaj termékszabványban nincs előírás az összes aromástartalomra, az autógyártók világszövetségének ajánlásában azonban legfeljebb 15%-os korlát van. A kísérleti eredmények alapján megállapítottuk, hogy az alkalmazott katalizátoron a vizsgált technológiai paraméterek mellett nem tudunk előállítani olyan terméket, amely az autógyártók világszövetségének ajánlását kielégíti az összes aromástartalom szempontjából.



4. ábra • Az összes aromástartalom változása a hőmérséklet és a nyomás függvényében ($\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ katalizátor, $1,0 \text{ h}^{-1}$ folyadékterhelés)

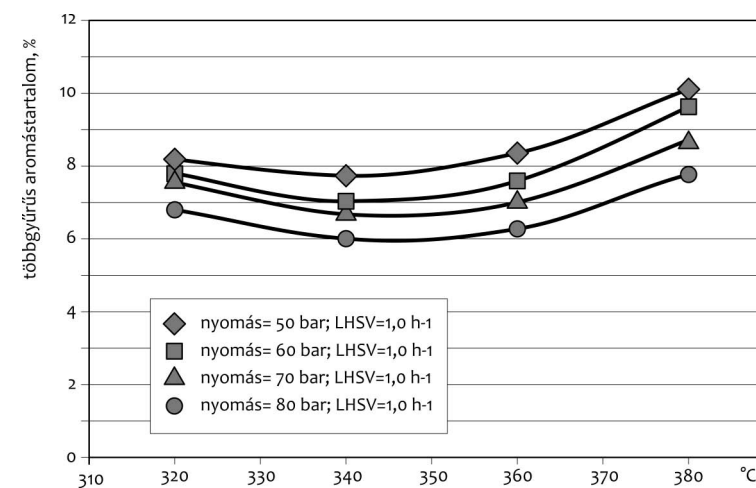
A műveleti paraméterek hatását vizsgálva a kéntelenítésre és az összes aromástartalom csökkentésére, megállapítottuk, hogy a kéntartalom eltávolítása szempontjából kedvező hőmérséklettartományban ($370\text{--}380^\circ\text{C}$) az aromástelítés mértéke meghaladja az elérhető legnagyobb értéket. Ez jól mutatja, hogy az alkalmazott katalizátoron a kéntelenítés és aromástartalom-csökkentés kedvező műveleti paraméterei nem estek egybe.

Az összes aromástartalom mellett vizsgáltuk a többgyűrűs aromástartalom változását is a hőmérséklet és a nyomás függvényében. Az 5. ábrán látható, hogy a vizsgált műveleti paramétertartományban a többgyűrűs aromástartalom az alapanyagéhoz viszonyítva kisebb lett. A termékekben ezen vegyületcsoport koncentrációja is minimumgörbe szerint változott. A többgyűrűs aromástelítés szempontjából a kedvező hőmérsékleti értékek a $340^\circ\text{C}\text{--}350^\circ\text{C}$ tartományba estek. A minimumgörbe szerinti változás oka megegyezik az összes aromástartalom esetén leírtakkal (egyensúlyi, exoterm folyamat). Az eredmé-

nyekből látható, hogy az összes aromástartalom, illetve a többgyűrűs aromástartalom minimuma nem esik egybe. Ennek oka, hogy a többgyűrűs aromások gyűrűtelítése lényegesen nagyobb sebességgel játszódik le, így alacsonyabb hőmérsékleten érhető el az egyensúlyi konverzió, ami viszont a hőmérséklet növekedésével csökken.

A kísérletek során kapott termékek többgyűrűs aromástartalmát a szabványban előírt értékhez (legfeljebb 8%) hasonlítva látható, hogy azok 80 bar nyomás esetén minden esetben, továbbá 340°C -on minden vizsgált nyomáson kisebbek voltak annál. Az adatok azt is jól szemléltetik, hogy a kéntelenítésnek kedvező hőmérsékleteken ($370^\circ\text{C}\text{--}380^\circ\text{C}$) csak 80 bar nyomás esetén lehetett előállítani az előírt minőségű terméket. Ez jól alátámasztja azt az előző megállapításunkat, hogy a vizsgált katalizátoron a kéntelenítés és az aromástartalom-csökkentés kedvező műveleti paraméterei nem esnek egybe.

Az autógyártók világszövetsége ajánlásában megadott többgyűrűs aromástartalmat



5. ábra • A többgyűrűs aromástartalom változása a hőmérséklet és a nyomás függvényében ($\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ katalizátor, $1,0 \text{ h}^{-1}$ folyadékterhelés)

(legfeljebb 2%) a vizsgált technológiai feltételek esetén nem tudtuk elérni.

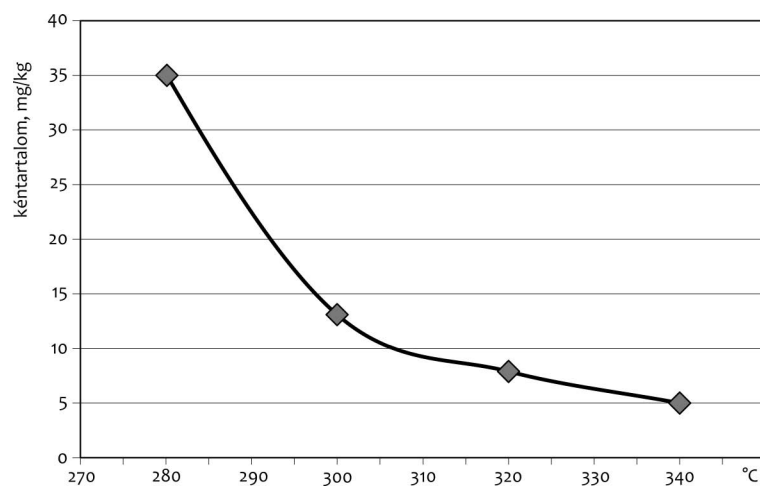
Kétlépéses eljárás

Az előzőekben bemutatott kísérleti eredményekből látható volt, hogy az alkalmazott gázolajpárlat és katalizátor esetén az egylépéses, hidrogénező heterogén katalitikus minőségjavítás nem előnyös. Ezért kísérleti tevékenységiinket úgy folytattuk, hogy az alapanyag kén- és aromástartalom-csökkentését két lépésben végeztük el.

Ennek során az első lépésben 60 bar össznyomáson, az aromástartalom csökkentésnek kedvező kisebb hőmérsékleten (350°C) és az ipari gyakorlatban alkalmazott folyadékterheléssel (1,5 h⁻¹) egy részlegesen kéntelenített (187 mg/kg) terméket állítottunk elő (lásd 2. táblázat) a vizsgált NiMo/Al₂O₃ katalizátoron. Majd az így nyert gázolajtermék további minőségjavítását vizsgáltuk kénnek részlegesen ellenálló PtPd/USY-zeolit katalizátoron.

A műveleti paraméterek kiválasztása a következők szerint történt. A nyomás kiválasztásánál figyelembe vettük, hogy a két lépés ugyanazon nyomásszinten történjen, azaz egy ipari megvalósítás esetén a két folyamat hidrogénellátása egy körben legyen megvalósítható. Ezért össznyomásnak a 60 bar-t választottunk a 2. lépésben is. A folyadékterhelés kiválasztásánál is az első katalitikus lépéshez való illesztést, illetve az ipari gyakorlatot tartottuk szem előtt, így azt 1,5 h⁻¹-nek választottuk. A második lépésben a részlegesen kéntelenített gázolaj további minőségjavítását a 280–340°C hőmérséklettartományban vizsgáltuk.

A termékek kéntartalmának változását az alkalmazott hőmérséklettartományban a 6. ábra szemlélteti. Látható, hogy a hőmérséklet növelésével a termékek kéntartalma monoton csökkent. A dízelgázolaj-termékszabványban előírt kéntartalmú termékeket már viszonylag alacsony hőmérsékleten (310°C és a felett) elő lehetett állítani. Ennek oka, hogy a legnehezebben kénteleníthető heterociklusos kénvegyületek (például dialkil-dibenzotiofének) átalakulása során a molekula egyik vagy mindkét aromásgyűrűje telítődik. Az alkal-



6. ábra • A kéntartalom változása a hőmérséklet függvényében (PtPd/USY-zeolit katalizátor, 60 bar össznyomás, 1,0 h⁻¹ folyadékterhelés)

mazott PtPd/USY-zeolit katalizátor pedig a nagy hidrogénező aktivitása miatt elősegíti ezt a folyamatot.

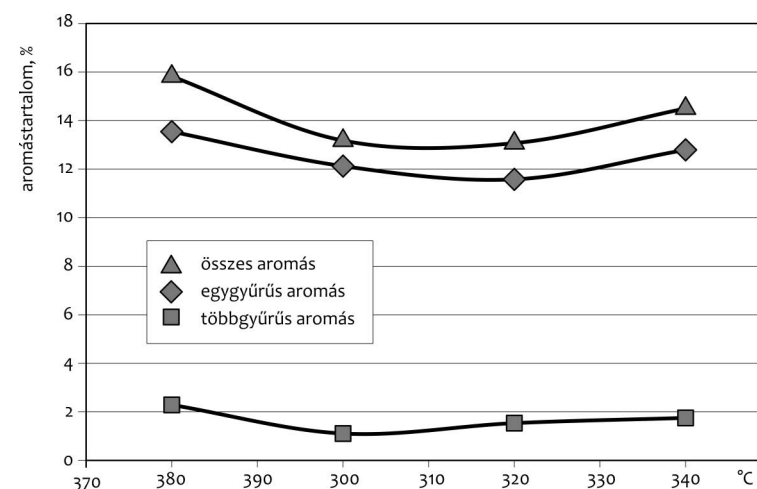
A kéntelenítés mellett vizsgáltuk a termékek egygyűrűs és többgyűrűs aromástartalmának változását is az alkalmazott technológiai paraméterek mellett (7. ábra). Az adatok jól szemléltetik, hogy minden vizsgált aromás szénhidrogéncsoport esetén a gyűrűtelítés jelentős mértékben lejárásodott. Az is jól látható, hogy a kéntelenítéssel ellentétben a vizsgált hőmérséklettartományban az aromástartalom minimumgörbe szerint változott. Ennek magyarázata azonos a NiMo/Al₂O₃ katalizátornál ismerttetettel (egyensúlyi, exoterm folyamat).

A nyert termékek többgyűrűs aromástartalma a 290–340°C tartományban messzeemenően kielégíti a jelenleg érvényes termék-szabvány idevonatkozó előírását, továbbá az autógyártók világszövetsége annál szigorúbb ajánlását is. Az összes aromástartalom pedig kisebb, mint az említett szervezet ajánlásában megfogalmazott, legfeljebb 15%.

A jelentős aromástartalom-csökkenés oka az alkalmazott PtPd/USY-zeolit katalizátor nagy hidrogénező aktivitása. Továbbá az is feltételezhető, hogy a gyűrűtelítésen túl a savas katalizátorhordozó (USY-zeolit) hozzájárul az aromások gyűrűnyitási folyamatainak lejátszódásához is, a Pt-ra kifejtett elektron-szívó hatásával.

A kedvező műveleti paraméterek (például 310°C, 60 bar, 1,5 h⁻¹) mellett előállított kis kén- és csökkentett aromástartalmú termékek kiváló dízelgázolaj-keverőkomponensek. Továbbá motorikus felhasználásuk esetén jelentősen csökkentik a kipufogógázok emisszióját, különösen a koromrészecske, az NO_x- és szénhidrogén-kibocsátást.

Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy az alkalmazott gázolajpárlat minőségjavítása a kétlépéses eljárással alacsonyabb hőmérsékleten, kisebb nyomáson és nagyobb folyadékterheléssel valósítható meg. További vizsgálat tárgyát képezi a két eljárás beruházási és üzemeltetési költségeinek összehasonlítása.



7. ábra • Az összes, az egygyűrűs és a többgyűrűs aromástartalom változása a hőmérséklet függvényében (PtPd/USY-zeolit katalizátor, 60 bar össznyomás, 1,0 h⁻¹ folyadékterhelés)

Jelen cikk a TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KONV-2010 projekt keretében készült. A projekt a magyar állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

IRODALOM

- Arora, A. – Mukherjee, U. (2011): Refinery Configurations for Maximizing Middle Distillates. *Petroleum Technology Quarterly*, 16, 4, 67–75.
- European Commission (2011): *Energy, Transport and Environment Indicators*. 2011 edition, Brussels, 1–211.
- Hancsók J. – Kasza T. (2011): The Importance of Iso-paraffins at the Modern Engine Fuel Production, In: Bartz, W. (ed.): *Proceedings of 8th International Colloquium Fuels 2011*. 361–373.
- Ho, T. C. (2004): Deep HDS of Diesel Fuel: Chemistry and Catalysis. *Catalysis Today*, 98, 3–18.
- Matsumoto, S. (2004): Recent Advances in Automobile Exhaust Catalysts. *Catalysis Today*, 90, 183–190.
- Nagy G. – Hancsók J. (2007): Diesel-üzemű gépjárművek korszerű utóátalakító katalizátorai I. *Magyar Kémikusok Lapja*. 62, 11, 373–378.

Kulcsszavak: *gázolaj, kéntelenítés, aromástartalom csökkentés, hidrogénezés, NiMol/Al₂O₃ katalizátor, Pt, Pd/USY-zeolit katalizátor, motorhajtóanyag-felhasználás*

- Stanislaus, A. – Marafi, A. – Rana, M. S. (2010): Recent Advances in the Science and Technology of Ultra Low Sulfur Diesel (ULSD) Production. *Catalysis Today*, 153, 1–68.
- Varga Z. – Hancsók J. – Kalló D. – Stumpf Á. (2006): Investigation of the HDS Kinetics of Dibenzothiophene and Its Derivatives in Real Gas Oil. *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, 88, 1, 19–26.
- Varga Z. – Hancsók J. – Nagy G. – Magyar J. – Wáhláné H. I. – Kalló D. (2005): Környezetbarát dízelgázolajok előállítása I. Mély heteroatom-el-távolítás. *Magyar Kémikusok Lapja*. 60, 12, 430–438.
- Varga Z. – Hancsók J. – Nagy G., – Pölcsmann Gy. – Kalló D. (2007): Upgrading of Gas Oils: The HDS Kinetics of Dibenzothiophene and Its Derivatives in Real Gas Oil. *Topics in Catalysis*, 45, 1–4, 203–206.

Mobility and Environment

Editors: László Palkovics, Imre Czinege, János Kristóf

László Palkovics: Introduction.....	2
Hajnalka Hargitai – Gábor Dogossy – Erik Sági – Tamás Ibrikész – János Stifter: Production and Qualification of Polymer Nanocomposites	4
Adrienn Szentes – Csilla Varga – Géza Horváth – László Bartha – Zoltán Kónya: Carbon Nanotubes: Production and Application	15
János Jósai: Proactive Production Scheduling Methods and Their Industrial Applications ...	26
János Rechnitzer – Melinda Smahó: Impact of Vehicle and Automotive Industries on Competitiveness of the Central-Eastern European Area.....	38
Gabriella Iván – Csaba Koren: Impact of Road Scenes on Speed Choices on Rural Roads ...	48
Erzsébet Horváth – János Kristóf – Róbert Kurdi – Éva Makó: Preparation and Structure Elucidation of Clay Mineral Nanocomplexes	56
Levente Solecki: Microgeometric Examination of the Cylinder Surfaces of Internal Combustion Engines	65
Mathias Roman Dreyer – Tamás Gergye: Online Measuring of Wear Processes Using Radionuclide-Technique (RNT)	71
László Kodrik – László Wágner – Ferenc Husveth: Effect of Highway Traffic and Petroleum Processing Industry Emissions on the Heavy Metal Content of Foodstuffs of Animal Origin	81
Tamás Morauszki – Péter Mándli – Zoltán Horváth: Numerical Simulation of Fluid Flow and Combustion in IC Engines	86
Zoltán Varga: Research and Development for Sustainable Vehicle Driving with the Aim of Establishing Future's Electromobility.....	92
Tamás Bagi – Barnabás Horváth – Tibor Medvegy – Gergely Molnár – Gergely Kronome – István Szalai: Experimental Investigation of the Rotor Oscillations of a Stepper Motor Damped by Electro- and Magnetorheological Fluids	114
Barnabás Horváth – István Szalai: Structure of Electrorheological Fluids: Dielectric Study of Chain Formation.....	123
Dénes Fodor – Róbert Weisz: Modelling of Wheel/Tyre Dynamics.....	132
Péter Görbe – Attila Magyar – Katalin Hangos: Complex Integration of Renewable Energy Sources in Distorted Nonlinear Low Voltage Grid	146
Katalin Hangos – Miklós Gerzson – Adrien Leitold – Mrs Stark, Ágnes Werner – Tibor Dulai: Petri Net Models Based Vehicle Industry Diagnostic Methods	154
Jenő Hancsók: Belsőégésű motorok korszerű cseppfolyós üzemanyagai.....	161
Mrs Skoda, Rita Földes – Jenő Hancsók – Csaba Fehér – Eszter Kriván – Csaba Tóth: Synthesis of Gasoline and Diesel Oil Additives. Investigation of Oligomerisation Isobutene	176
Zoltán Varga – Jenő Hancsók – Zoltán Eller: Investigation of Quality Improvement of Gas Oil with Catalytic Way	184



Nemzeti Fejlesztési Ügynökség
www.ujsechenyiterv.gov.hu
06 40 638 638



A projektek az Európai Unió
támogatásával valósulnak meg.