

BORSÓS TIBOR – SALMA IMRE

A Várhegy-alagút közepén

Az Alagút

Budapest leghosszabb alagútja a Várhegy-alagút. A belvárosban helyezkedik el, és összeköti a Lánchidat a Krisztinavárossal. Fontos szerepet tölt be a város közlekedésében.

Az Alagút építésére Novák Dániel mérnök tett először javaslatot 1838-ban. Az építést Széchenyi István kezdeményezte 1842-ben abból a célból, hogy a már épülő Lánchíd könnyebben megközelíthető legyen Budán. A végleges műszaki tervet – ami hasonlított Novák elképzelésére – Clark készítette el 1845-re. A munkálatokat a szabadságharc miatt jóval később, csak 1853-ban kezdték el. A Várhegyet hét és fél hónap alatt vajták át két irányból. Az Alagút 350 méter hosszú, 9,5 méter széles és 7,8 méter magas a közepén. A belmagasság fokozatosan nő 10,6 méterig a bejáratok felé a természetes világítás jobb kihasználása érdekében. Az Alagút 6,1 métert lejt a Duna felé, ami a természetes szellőzés („kéményhatás”) és a csapadékvíz elvezetése miatt fontos. Az Alagutat legelőször a gyalogosok használhatták, majd 1857 áprilisában megnyitották a kocsiforgalom számára is. Az áthaladásért vámot kellett fizetni. A homlokzatok ekkor még nem voltak készen. Az építkezést 1858-ra fejezték be teljesen (**1. ábra**). Először olajmécsesekkel, majd petróleumlámpákkal világítottak. A századfordulón gázvilágítást vezettek be, 1915-ben pedig villanyvilágításra tértek át. 1918-tól ingyenesen lehet használni az Alagutat.

A II. világháború végén harcállásként használták; emiatt a nyugati kapuja megsérült. 1949-ben állították helyre. Az úttestet kiszélesítették az északi gyalogosjárda megszüntetésével, és aszfalttal borították. Az Alagutat 1973-ban, Budapest létrejöttének centenáriuma korszakosították: új vízszigetelő és -elvezető rendszert építettek, a falat üvegmozaikkal burkolták, valamint új szellőztető-berendezést is üzembe állítottak. A ventilátorok percenként 1900 köbméter levegőt juttathatnak az Alagútba (**2. ábra**). A mesterséges szellőzés munkanapokon 8 órától 18 óráig működik, és friss levegőt szállít az Alagút melletti és fölötti, külső teregekből a vajtába. Az Alagút összesen két forgalmi sávot (gépjárművek részére), egy járdát és egy szervizjárdát foglal magába. Teherautók áthaladása nem engedélyezett. Az Alagút belső felületeit „célgéppel” tisztítják; az alsó kétharmadot évente kétszer, a felső egyharmadot évente egyszer mossák.

Az Alagút mint közlekedési mikrokörnyezet

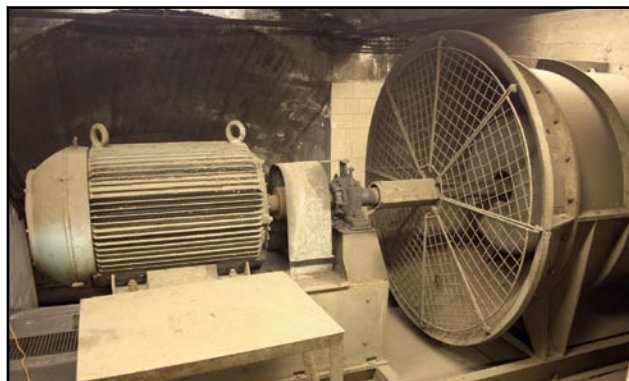
A közúti gépjármű-forgalom a budapesti levegőtisztaság egyik meghatározó tényezőjévé vált. Az érdeklődő olvasó részleteket talál erről a *Természet Világa* 2007. októberi számában „Budapest: poros és fakó város?” címmel. Közlekedési mikrokörnyezetekben, például forgalmas csomópontokban, utcakanyonokban vagy alagutakban a gépjárművek hatása fokozottan jelentkezik. Méréseink idején, vagyis 2010. július 12–26. között átlagosan 900 db gépjármű haladt óránként keresztül az Alagúton munkanapokon. Hétfévégen a napi átlagos forgalom kb. 35%-kal kisebb volt. A Lánchíd felé kétszer annyi jármű haladt, mint az ellenkező



1. ábra. A Várhegy-alagút klasszicista stílusú, keleti homlokzata egy 1908. évi képeslapon

irányba. A legnagyobb egyirányú forgalmat július 22-én, csütörtökön 9:50 órakor tapasztaltuk; ez kismértékben túllépte az 1000 gépjármű/óra értéket. A vizsgált időszakban a Margit hídon szünetelt a közúti forgalom felújítás miatt, ami a tipikus adatokat kisebbé megváltoztathatta. A forgalom maximális értékét az Alagúton kívüli, a bejáratokhoz közel elhelyezkedő közlekedési lámpáknál, illetve körforgalmú kereszteződésnél kialakuló forgalmi torlódások korlátozzák. A torlódás az Alagút belsejét is gyakran eléri. A forgalom napi átlagos változása munkanapokon 7,5% körüli, tehát kicsi volt. Azt tapasztaltuk továbbá, hogy ha a munkanapokat és a munkaszüneti napokat külön-külön tekintjük, a forgalom időbeni változása nagyon hasonló volt egy-egy kategóriában. Érdekes tehát az átlagérték napi változását vizsgálni. Az Alagúton áthaladó gépjárművek számának átlagos napi változását munkanapokon és hétfévégen a **3. ábrán** mutatjuk be. Látható, hogy munkanapokon a forgalom monoton módon növekszik hajnali 5 órától 7 óráig, majd 7 és 8 óra között eléri első maximumát. A forgalom napközben viszonylag magas szinten marad, és csupán kisebb in-

2. ábra. A szellőztetést végző bányaventilátor



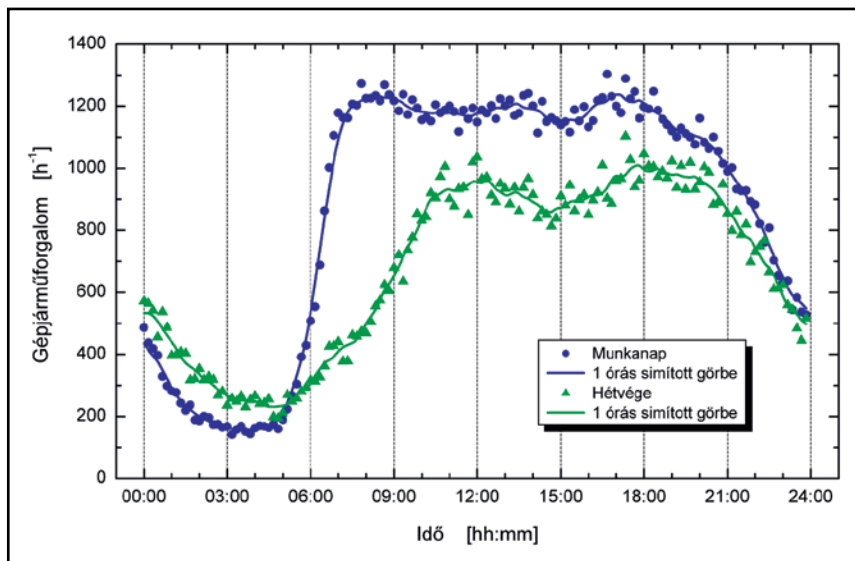
gadozások alakulnak ki. A második maximum 17 óra körül jelentkezik, amit a forgalom csökkenése követ egészen másnap hajnali 4 óráig. Hétféteken kissé más a helyzet. A késő éjszakai forgalom gyakorlatilag azonos a munkanapokon tapasztalttal, sőt az éjfél-től 5 óráig terjedő időszakban meg is haladja azt. A különbség az éjszakába nyúló programokkal (szórakozással) magyarázható, ami a hétféteken nagyobb forgalmat eredményez. Hétféteken a forgalom reggeli, monoton növekedése lassabb. Az első maximum déli órára tolik, és kisebb szintet ér el. A második maximum 18 óra körül alakul ki és szélesebb, mint munkanapokon. A két maximum között minimum keletkezik körülbelül 15 óraker. A forgalom napi változása a városlakók és utazók szokásos napi tevékenységével magyarázható.

A Budapesten és Pest megyében regisztrált összes gépjármű 87%-a személygépkocsi, 0,46%-a busz. Ezek közül 18,2%, illetve 97% rendelkezik dízelmotorral. A személyautók átlagos életkora 9,9 év, míg a buszok esetében ez az idő 13,9 év. Ólmozott benzint 1999. április 1. óta nem árulnak Magyarországon. Az ólmozatlan benzint kevesebb, mint 0,013 g/l ólmot tartalmaz. A gázolajat kéntelenítik, így annak kéntartalma kevesebb, mint 10 ppm (1 ppm=1 milliomodrész) az EU-szabályozásnak megfelelően.

A közúti gépjárművek az üzemanyag elégetésével (ami a folyamat jellege miatt gyakran tökéletlen) és a mozgó alkatrészek kopásával emittálnak szennyező anyagokat a levegőbe. Az emittált gázokból további vegyületek keletkezhetnek a levegőben kémiai reakciók révén. A kipufogógáz nitrogén-oxidokat, szén-monoxidot és módosult szénhidrogéneket, valamint aeroszol ré-



4. ábra. Az Alagút bejáratánál lévő figyelmeztető tábla. Nem a levegőbe beszélnek!



3. ábra. Az Alagúton mindkét irányban áthaladó gépjárművek átlagos száma munkanapokon és hétféveken 2010. júliusban

szecskék¹ tartalmaz legnagyobb mennyiségben. Az emisszió (levegőszennyezés) az üzemanyag típusától és összetételétől, adalékoktól, a motor típusától, műszaki állapotától és az üzemi körülményektől is függ. A kipufogógázban legnagyobb mennyiségben lévő, egészségre káros gázokat katalizátorral ma már át tudják alakítani egészségre nem veszélyes anyagokká. A kén-dioxid emisszióját a gázolaj kéntelenítése csökkenti. Ezek az intézkedések a gázok problematikáját lényegében megoldják. Mindennek köszönhetően a másik fő emissziós termékcsoporthoz, az aeroszol relatív jelentősége megnőtt.

¹ Aeroszolnak nevezzük a levegőben finoman eloszlott szilárd és cseppfolyós részecskék rendszerét. A részecskék átmérője néhány nanométertől (1 nm=10⁻⁹ m) néhányszor tíz mikrométerig (1 μm=10⁻⁶ m) terjedhet. Méretük tehát 4–5 nagyságrendet fog át.

A kipufogógázban lévő aeroszol részecskék koromból, szerves vegyületekből, szulfát- és nitrát-tartalmú vegyületekből állnak leginkább. Néhány vegyület tömeghányada 0,1%-nál is kisebb, de egészségügyi hatásuk miatt mégis fontosak lehetnek. Az emberi egészség szempontjából a 10 mikrométernél kisebb részecskék jelentősek (a szabályozás területén ezt hívják „szálló pornak”), mert ezek lejutnak a tüdőbe. Legnagyobb részük korom, ez főleg dízelüzemű járművekből származik. A dízelmotorok egy nagyságrenddel több kormot emittálnak, mint a benzinüzeműek. A korom kibocsátását részecskeszűrőkkel és a kiszűrt szecskék alacsony hőmérsékleten történő, katalitikus elégetésével igyekeznek csökkenteni. A dízelautók arányának növekedése miatt azonban a korom légköri koncentrációja nőtt az elmúlt években.

Az Alagút levegőminősége

Korábban több alkalommal is végeztünk méréseket és gyűjtöttünk aeroszol-mintákat az Alagútban. Ezek összegezéséként megállapítható, hogy a „szálló por” tömeg-koncentrációja nappali időszakban tipikusan 580 μg/m³ volt 1999-ben. Összehasonlításképpen: a 24 órára vonatkozó egészségügyi határérték 50 μg/m³. Az Alagút levegője tehát meglehetősen szennyezett. Ennek kockázatára egyébként egy tábla is figyelmezteti a gyalogosokat a keleti bejáratnál, több nyelven (4. ábra). Az ólom koncentrációja a „szálló porban” 1998-ban nappali időszakban 1,36 μg/m³ volt. A 24 órás egészségügyi határérték ólom esetében 0,3 μg/m³. Az Alagút levegője körülbelül tízszer szennyezettebb volt ólommal, mint a belváros. Amikor az ólmozott benzint kivonták a kereskedelmi forgalomból, heteken belül a negyedére csökkent az ólom

koncentrációja az Alagútban, és azóta is hasonló a szintje. Érdekes azt is megemlíteni, hogy a korom koncentrációja az Alagútban $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ volt (a finom méretű aeroszol részecskéket tekintve) – körülbelül tízszer több, mint a belvárosban, és két nagyságrenddel nagyobb, mint a város szélén (városi háttér).

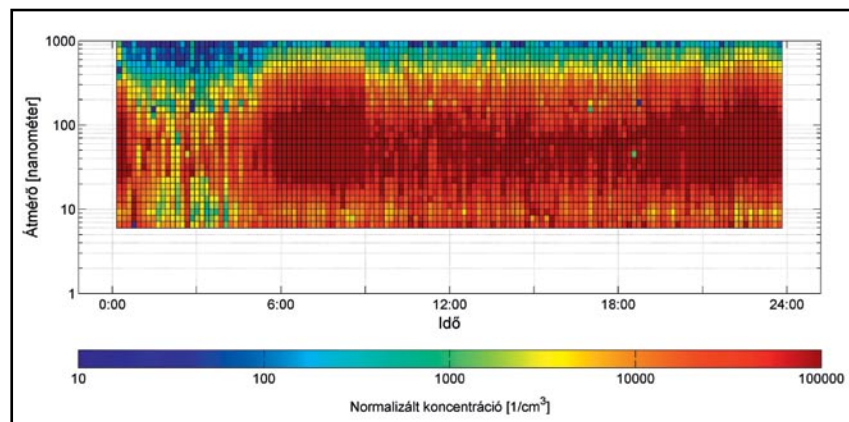
Az ultrafinom aeroszol

A korom nagyobb egészségkárosító kockázatot jelent a többi városi aeroszol részecskéknél. Fajlagosan nagy és aktív felületükön további vegyi anyagokat, például illékony gázokat és vírusokat köthetnek meg és koncentrálhatnak. Veszélyes hatásuk összefüggésben van a méretükkel is. A legtöbb koromszemcse átmérője kisebb $100\text{--}200 \text{ nm}$ -nél, és ezért egy adott tömeg-koncentráció rendkívül nagy részecskeszámot, darabszámot jelent. A légzőszervek védekező mechanizmusai (például a falósejtek) nem tudnak ekkora számú idegen részecskét hatásosan eltávolítani a tüdőből. A legkisebb, néhány nanométer nagyságú részecskék ráadásul átjuthatnak a sejtmembránon is, bekerülhetnek a vérkeringésbe, amely egyrészt elszállítja őket szervezetünk más,

részecskék keletkezésének és tulajdonságainak kutatását. Mostani cikkünkben az Alagútban végzett mérési kampány eredményeiből emelünk ki néhány, közérdekűnek tekinthető eredményt és megállapítást.

A részecskék számának napi átlaga a vizsgált időszakban 126 ezer és 167 ezer között változott $1 \text{ köbc centiméter levegőben}$. A tipikus koncentráció 143 ezer volt köbc centiméterenként. Ez a szám tizenegyszer nagyobb a belvárosi tipikus szintnél. A napi átlagkoncentráció Budapest belvárosi levegőjében még a szmogriadó idején, vagyis 2009. január 10–11-én sem haladta meg a $30 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ értéket. A legnagyobb egyedi koncentráció az Alagútban $465 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ volt, amelyet július 20-án, kedden 18:50-kor mértünk. Összehasonlítás céljából: a vidéki háttérkörnyezetben tipikusan 2–5 ezer részecske van $1 \text{ köbc centiméter levegőben}$. Először közelítésként azt mondhatjuk, hogy az Alagúton 5–7 perc alatt átsétáló személy átlagosan olyan mértékű részecske-expozíciónak van kitéve, ami 1 óra 15 perc időtartamú belvárosi gyaloglással egyenértékű, míg a legszennyezettebb időszakban áthaladó gyalogost 4 órának megfelelő belvárosi hatás éri (pesszimista becsléssel). A részecskeszámra vagy koromra vonatkozó egészségügyi határérték sajnos még nem létezik.

Az ultrafinom részecskék méretének és koncentrációjának időváltozását – a 2010. július 19-i, hétfői adatok alapján – az 5. ábrán mutatjuk be. A részecskék koncentrációját színekkel jelöltük; kézzel jeleztük a legalacsonyabb, pirossal pedig a legmagasabb koncentrációsíntet. A gépjárművek meglehetősen sok aeroszol részecskét emittálnak a levegőbe, ezért a görbe szinte teljesen piros és vörös. A részecskék 85%-ának átmérője 100 nm -nél kisebb, tehát az ultrafinom méretű részecskék dominálnak. A reggeli és esti csúcsforgalom hatása két vörös „sziget” formájában jól követhető. A koncentráció reggeli maximuma a szellőztető-berendezés bekapcsolása után jelentősen lecsökken, amit függőleges „választó” vonal jelez 9 órakor. Napközben viszonylag állandó koncentrációsínt alakul ki, amely azonban meglehetősen magas marad.



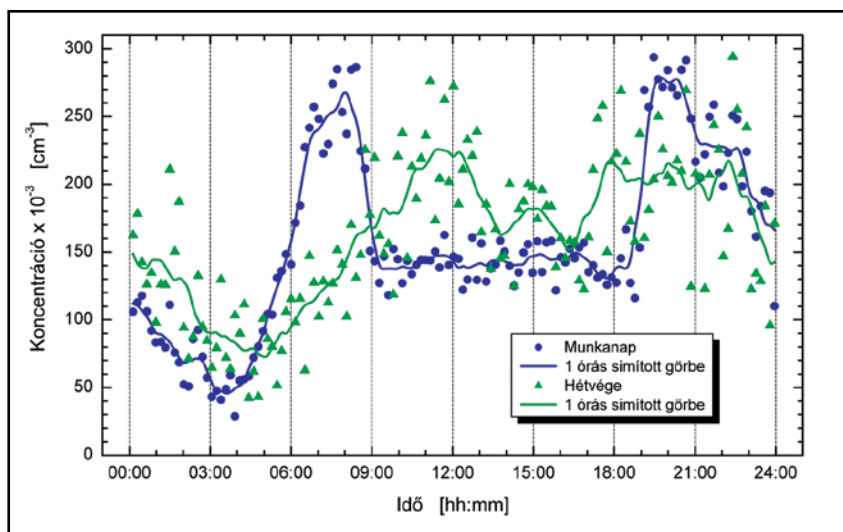
5. ábra. A részecskék méretének és koncentrációjának időváltozása 2010. július 19-én

érzékeny részeibe, másrészt a részecskék megváltoztathatják a vér bizonyos tulajdonságait, például az alvadékonyságot. Mindezeknek súlyos következményei lehetnek. Az egészségi hatások megfontolásakor figyelembe kell venni az expozíció idejét is. A szervezet általában jobban tűri a rövidebb ideig tartó, akut kitétséget az idült, krónikus hatásoknál.

A legkisebb részecskék össztelege elhanyagolható a nagyobb részecskék által képviselt tömeghez képest, ugyanakkor a részecskék számának elsőprő többségét ezek az úgynevezett ultrafinom részecskék képviselik. Ilyen részecskék mennyiségét tehát nem tömeg-koncentrációval (pl. $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mértékegységgel), hanem részecskeszám-koncentrációval (pl. darabszám/ cm^3 egységgel) célszerű kifejezni. Az ultrafinom részecskék kísérleti vizsgálata új módszereket igényel. Az ELTE Kémiai Intézetében rendelkezünk olyan mérőrendszerrel (DMPS, differential mobility particle sizer), amellyel méreteloszlásokat tudunk meghatározni $6\text{--}1000 \text{ nm}$ átmérettartományban 10 perces időfelbontással. Mindez lehetővé teszi az új aeroszol

A napi átlagos koncentráció rendszertelenül változott egyik munkanapról a másik munkanapra az állandónak tekinthető napi

6. ábra. A részecskeszám-koncentráció átlagos változása munkanapokon és hétvégén 2010 júliusában



átlagos forgalom ellenére. Ennek oka, hogy az átlagos koncentrációt a forgalom mellett az áthaladó gépjárműpark összetétele (például a buszok aránya), a kültéri levegő szennyezettsége és a mikrometeorológiai viszonyok is befolyásolják. Ez utóbbi két tényező pedig szabálytalanul változik.

A koncentráció napi változása periodicitást mutatott a munkanapokat és munkaszüneti napokat külön-külön tekintve. A részecskeszám koncentrációjának átlagos napi változását a **6. ábrán** mutatjuk be. A két görbe alakja eltérő. A részecskék koncentrációja éjjel és 5 óra között nagyobb volt hétvégeken, mint munkanapokon. A különbség a fent említett, éjszakai forgalmat érintő különbségekkel magyarázható. Munkanapokon a koncentráció 5 órától gyorsan nő egészen 8 óráig, amikor eléri az első maximumot körülbelül $270 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ szinten. A maximum után a koncentráció 1 órán belül $140 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ értékre esik vissza. Mindezt a szellőztetés eredményezi, amelyet 8 órakor kapcsolnak be. A beszívott kültéri levegő kb. a felére hígítja a részecskék koncentrációját, és elnyomja a legkisebb részecskék járulékát a méreteloszlásban. A szellőztető-berendezés 18 órakor kikapcsol, aminek következtében a részecskék koncentrációja ismét megnő, és 1,5 óra alatt eléri második maximumát. A második maximum az elsőhöz hasonló mértékű. A koncentráció 20:30 óra után ismét csökken, mert ilyenkor már jelentősen visszaesik a járműforgalom. Hétvégeken a koncentráció menete lényegében követi a forgalom alakulását. Ezzel összhangban lassabb délelőtti növekedést és dél körüli maximumot tapasztaltunk. A második maximum későbbre tolódik és kiszélesedik. Hétvégeken a szellőztető-berendezés egyáltalán nem üzemel, aminek következtében a napi átlagos koncentráció nagyobb, mint munkanapokon!

Mit tehetünk?

Az Alagút levegőminőségének még részletesebb és más összetevőkre is kiterjedő megismerése hosszabb idejű és további vizsgálatokkal lehetséges. Eddigi méréseink azonban azt sugallják, hogy lehetőleg ne sétáljunk át az Alagúton. Ne tegyük ezt különösen kora reggel vagy este, illetve munkaszüneti napokon napközben. A **6. ábra** alapján megállapítható, hogy a szellőztetőrendszer célszerű lenne körülbelül 2 órával korábban bekapcsolni, valamint 3 órával később kikapcsolni, mert ezáltal lényegesen tisztább levegő érhető el az Alagútban. Megfontolandó továbbá a hétvégi és ünnepnapos működtetés is. A szellőzést vezérelni lehetne egy közlekedésből eredő, szennyező gázt (például szén-monoxidot és/vagy nitrogén-dioxidot) monitorozó műszerrel.

Alagutakra várhatóan továbbra is szükség lesz a városi közlekedésben. Tervezésük és üzemeltetésük során azonban az emberi egészségre és a környezetre kifejtett hatásukat is figyelembe kell venni. Az alagutakban közlekedők jelentős többlet expozíciónak vannak kitéve az aeroszol részecskék szempontjából. A gyalogosoknak, a nyitott gépjárművek utasainak, a nyitott ablakokkal közlekedő vagy levegőszűrő nélküli szellőztető-berendezéssel felszerelt járművekben utazóknak tudatosítaniuk kell, hogy fokozott kockázatnak vannak kitéve. Ezt lehetőleg kerülni kell. A kockázatot az alagutakban kialakuló forgalmi torlódások tovább növelhetik. A torlódásokat forgalomszervezési eszközökkel szükséges csökkenteni. Az alagutak szellőztetésének helyes megválasztása szintén komolyan hozzájárul a levegőminőség javításához. A leghatékonyabb és általánosan előnyös megoldást azonban az emisszió csökkentése jelentené, ami a járműpark korszerűsítésével érhető el.

További információ található a www.salma.elte.hu címen. A kutatást az OTKA támogatta a K84091 jelű szerződés alapján. Köszönetünket fejezzük ki Ramotsáné Menyhért Ágnesnek (BFFH) és Újvári Péternek (FKF Zrt.) a mérések támogatásáért, valamint Huszár Dezsőnek (FKF Zrt.) a forgalmi adatokért.