

AZ ÁRAMLÁSTAN JELENTŐSÉGE AUTÓBUSZ KAROSSZÉRIÁK TERVEZÉSÉNÉL

Dr. Lajos Tamás egyetemi tanár, Rékert Tamás Ph.D. hallgató,
Dávid Norbert egyetemi hallgató
BME Áramlástan Tanszék

1. BEVEZETÉS

A közúti járművek karosszériáinak tervezésénél egyre nagyobb szerepet kapnak az áramlástanai megfontolások. A karosszéria körüli áramlás optimalizálásával három szempontból javulnak a jármű sajátosságai: csökken az üzemanyag fogyasztás, javulnak a működtetési tulajdonságai (menetstabilitás, úttartás, közlekedésbiztonság, kezelhetőség), végül kedvezőbbekké válnak a jármű komfort jellemzői (zaj, karosszéria sárosodás, utastér hűtése, szellőzése). A karosszéria áramlástanai optimalizálása három, egymással összefüggő áramlási térre terjed ki: a karosszéria külső felülete körüli áramlásra, az utastérben lévő áramlásra és a jármű egyes komponensei (hűtő, fékek, kerekek, szélvédő) körüli áramlásra. Ebben a dolgozatban az üzemanyag fogyasztás és a karosszéria sárosodás csökkentésének lehetőségeivel foglalkozunk, amit a karosszéria körüli áramlás (beleértve a kerékszekrényben kialakuló áramkép) befolyásolásával lehet megvalósítani. A téma tárgyalásának aktualitást ad az a rendkívül gyors fejlődés, amely az áramlások numerikus szimulációja területén lezajlott, és amely a bonyolult műszaki feladatoknak a korábbi lehetőségekhez képest elképzelhetetlenül olcsó és gyors megoldására ad lehetőséget.

2. AZ AUTÓBUSZ KAROSSZÉRIA KÖRÜLI ÁRAMLÁS ÉS AZ ELLENÁLLÁS ERŐ KAPCSOLATA

Az autóbussz karosszéria a talaj közelében elhelyezkedő, a talajhoz és a levegőhöz képest adott sebességgel mozgó, hasáb alakú test, amely körüli áramlást célszerű az autóbusszhoz rögzített koordináta-rendszerből szemlélni. Ha az oldalszél hatásától most eltekintünk, ebben a koordináta-rendszerben a karosszériára annak hossz tengelyével párhuzamosan áramlik rá a levegő, megkerüli a homlokfalat, majd az oldalfalak mentén, a tető fölött és a karosszéria alatti részben áramlik hátrafelé. A hátfal mögött egy bonyolult áramkép alakul ki, amely után a karosszéria különböző oldalai mellett áramló levegőrészek ismét egymás közelébe kerülnek.

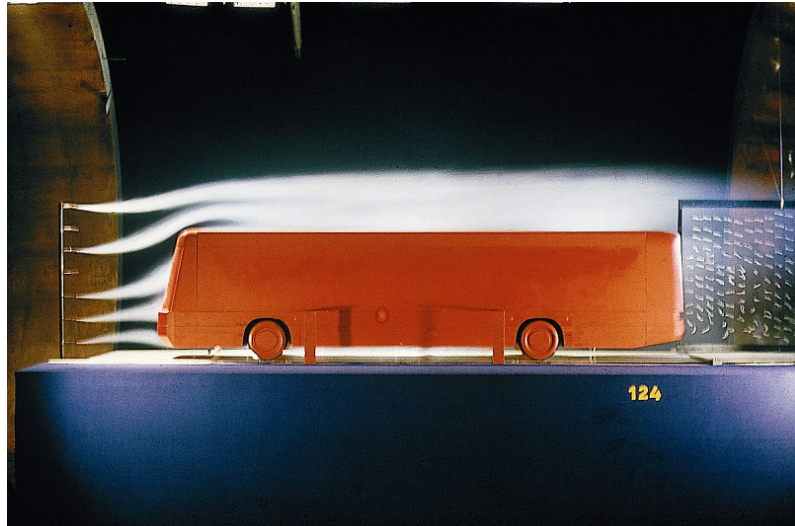
A fentiek alapján a karosszéria körüli áramlást

- a) a homlokfal körüli,
- b) az oldalfalak melletti, és a tető fölötti,
- c) a karosszéria alatti és
- d) a hátfal mögötti

áramlásra oszthatjuk.

Az **1. ábrán** a szélcsatorna nyitott mérőterében elhelyezett 1:5 méretarányú autóbussz modell körül olajköddel és pamutszálakkal szemléltetett áramkép illusztrálja a fenti felosztást.

A homlokfal körüli áramlásra jellemző, hogy a homlokfal közepe alatt kialakul egy torlópont, ahol a sebesség zérus, a nyomás pedig a legnagyobb, majd innen a homlokfal peremei (a továbbiakban belépő élek) felé gyorsul a levegő, amelynek nyomása ennek megfelelően csökken. A homlokfalon keletkező, a zavartalan áramlásban lévő nyomáshoz (p_∞) képesti $p-p_\infty$ [Pa] túlnyomás megoszlásának integrálásával megkapjuk a homlokfali ellenállás erőt.



1. ábra. Autóbusz modell a szélcsatorna mérőterében

A levegő a homlokfalat körülvevő belépő élek kialakításától, lekerekítésétől függő módon, a határreteg leválásával vagy anélkül áramlik rá az oldalfalakra, a tetőre és áramlik be a karosszéria alatti részbe. A karosszériát körülvevő felületeken a relatív áramlás hatására a jármű mozgásával ellentétes irányú fali csúsztatófeszültség (τ_0 [Pa]) ébred, amelynek integrálja az oldalfali ellenállás erőt adja.

Az autóbusz hátfalát körülvevő un. kilépő éleken a határreteg leválik, és a hátfal közelében egy, a külső nyomásnál kisebb nyomással jellemzett leválási buborék keletkezik. Ha a hátfalon keletkező $p_\infty - p$ [Pa] depresszió megoszlást integráljuk, a hátfali ellenállás erő adódik.

A járműre ható, a haladási iránnyal párhuzamos, de azzal ellentétes irányítású F_e [N] ellenállás erő a homlokfali, az oldalfali és a hátfali ellenállás erők összege.

Vezessük be a dimenziótlan c_p nyomástényezőt és a c_f súrlódási tényezőt, amelyek a felületen keletkező túlnyomást és a csúsztatófeszültséget viszonyítják a megfúvási sebességgel (v_∞ [m/s]) és a levegő sűrűségével (ρ [kg/m³]) számolt dinamikus nyomáshoz:

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho}{2} v_\infty^2}, \quad c_f = \frac{\tau_0}{\frac{\rho}{2} v_\infty^2}. \quad (1)$$

Definiáljuk a szokott módon a jármű c_e ellenállástényezőjét:

$$c_e = \frac{F}{\frac{\rho}{2} v_\infty^2 A_h}, \quad (2)$$

ahol A_h a karosszéria hossztengetyre merőleges keresztmetszete.

Az ellenállástényező az alábbi módon fejezhető ki az (1) dimenziótlan tényezőkkel:

$$c_e = \frac{1}{\frac{\rho}{2} v_\infty^2 A_h} \left[\overline{(p - p_\infty)_{\text{hom}}} A_h + \overline{\tau_0} A_o - \overline{(p - p_\infty)_{\text{hát}}} A_h \right] = \overline{c_{p,\text{hom}}} + \frac{A_o}{A_h} \overline{c_f} - \overline{c_{p,\text{hát}}}, \quad (3)$$

ahol a A_o [m²] az oldalfal keresztmetszete, a "hom" és "hát" indexek a homlokfalra és a hátfalra vonatkoznak, a felülvonás pedig az adott felületre vonatkozó átlagot jelzi.

A nyomástényezőre és a súrlódási tényezőre a tapasztalat szerint írható: $-2.5 < c_p \leq 1$ és $c_f < 0.01$, azaz általános szabályként fogadhatjuk el, hogy $c_p \ll c_f$, azaz a nyomástényező nagyságrendekkel

nagyobb a sűrűdési tényezőnél. Ebből következően az autóbusz karosszéria sima oldalfalain és tetején keletkező csúsztatófeszültségből származó erő, noha sokkal nagyobb felületen ébred, mint a homlokfalon és hátfalon ható, nyomásból származó erő, általában csak kis mértékben növeli a jármű mozgását fékező ellenállás erőt. Másik tapasztalat, hogy éles belépő és kilépő élek esetén a homlokfali ellenállás sokkal nagyobb, mint a hátfali.

Egy autóbusz karosszériához hasonló alakú hasáb esetén (amelynek ellenállástényezője $c_e=0.88$ volt) a homlokfali, oldalfali és hátfali ellenállás erő százalékos aránya éles be- és kilépő élek esetén rendre 65%, 0.1% és 34.9%. Lekerekítve a ki- és belépő éleket az ellenállástényező kevesebb, mint negyedére csökkent ($c_e=0.2$), a homlokfali, oldalfali és hátfali ellenállás erő százalékos aránya pedig így alakult: 0%, 1.5% és 98.5%.

Ebből a kísérletből fontos következtetések vonhatók le:

- a) éles belépő élek esetén a homlokfali ellenállás erő teszi ki az autóbusz karosszériákra ható ellenállás erő legnagyobb részét,
- b) a homlokfali ellenállás erő zérusra csökkenthető a belépő élek lekerekítésével,
- c) az oldalfali ellenállás erő viszonylag kis értékű,
- d) lekerekített homlokfal esetén a hátfali ellenállás erő határozza meg az autóbuszra ható erőt.

A c) következtetés csak sima határoló falak esetén igaz. Ugyanez már nem mondható el az autóbusz karosszéria "érdes" alján keletkező erőkről. Ha a karosszéria alatti áramlásnak kitett elemekre (pl. kerekek) ható erőket az átlagos csúsztatófeszültséggel fejezzük ki, ennek hozzájárulása a teljes ellenálláshoz már lényegesen nagyobb lehet. Ezért törekszünk arra, hogy a homlokfal alsó vízszintes belépő élét élesen hagyva csökkentsük a karosszéria alá beáramló levegő mennyiségét és ezzel a karosszéria alatti sebességet. Ennek hatására egyrészt csökken a karosszéria alsó részén keletkező ellenállás erő, másrészt nő a homlokfal lekerekített felső vízszintes és függőleges belépő élei körüli áramlás sebessége. Ez a helyi nyomás és ezáltal a homlokfali ellenállás erő csökkenését eredményezi.

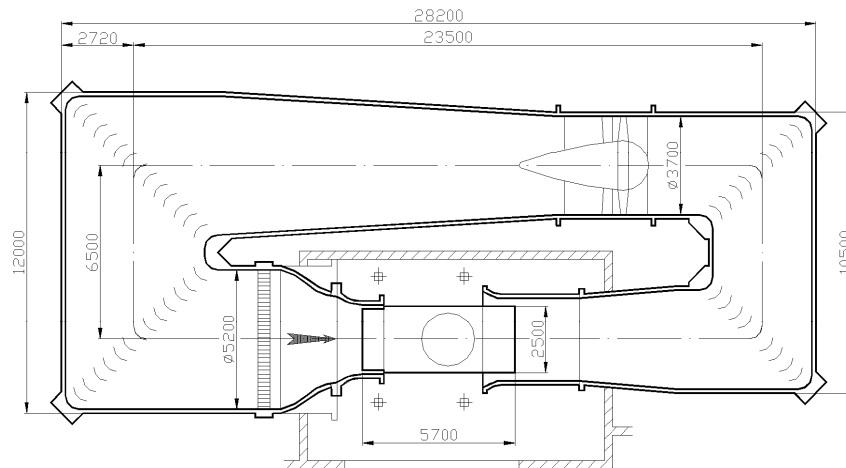
A hátfali ellenállás erő csökkentésének lehetőségei meglehetősen korlátozottak: az oldalfalak hátsó részének kis mértékű "összehúzásával", a hátsó élek lekerekítésével mérsékelt hátfali ellenállás erő csökkenés érhető el.

3. SZÉLCSATORNA MODELLKISÉRLETK AZ ÁRAMLÁSI ELLENÁLLÁS CSÖKKENTÉSE CÉLJÁBÓL

Ezeket a megfontolásokat, ill. mérési eredményeket erősítették meg a 80-as években az IKARUS Karosszéria és Járműgyár megbízásából végzett szélcsatorna modellkísérletek eredményei. Egy cserélhető karosszéria elemekből álló 1:5 méretarányú autóbusz modellt függesztettünk fel az Áramlástan Tanszék vízszintes, recirkulációs, nagy szélcsatornájának (2. ábra) mérőtere fölött elhelyezkedő mérlegre, amely 3 erő- és 3 nyomaték komponens meghatározására alkalmas. A modell forgó kerekkel és részletesen modellezett karosszéria alsó résszel készült.

A modellkísérletek szerint a homlokfal oldalsó és felső belépő éleinek lekerekítése ($r/h = 0.04$ -ről 0.11 -re) átlagosan 38%-os ellenállástényező csökkenést eredményezett (r [m] a lekerekítési sugár, h [m] a jármű modell szélessége). A homlokfal 8° -os döntését 11° -ra növelve 8%-os ellenállástényező csökkenést tapasztaltunk. A homlokfal alsó belépő élének lekerekítése és a kilépő élek lekerekítése a többi karosszéria paramétertől függő kis mértékű ($|\Delta c_e| \leq 3.3\%$) ellenállástényező csökkenést vagy növekedést eredményezett. A karosszéria érdes alját az első kerekek előtt sima lemezzel lefedve 4% c_e csökkenést, míg a hátsó rész lefedése esetén kis mértékű növekedést tapasztaltunk. A homlokfal alatt elhelyezett, a karosszéria alatti rés 38%-át lezáró

függőleges lemez hatására az ellenállástényező csökkenése más geometriai paramétereiktől függően 5-8% volt.



2. ábra. A BME Áramlástan Tanszék nagy szélcsatornája

A karosszéria elemek rendszeres változtatásával végrehajtott modellkísérletek eredményeként $c_e=0.386$ legkisebb ellenállástényező értéket sikerült elérni, amely a kiinduló érték ($c_e=0.57$) 68%-a. Ez az ellenállástényező csökkenés vízszintes autópályán 100km/h sebességgel haladó autóbusz esetén mintegy 23% üzemanyag fogyasztás csökkenést jelent. Ezen túlmenően az áramlástan ellenállás optimalizálása az áramlási eredetű zaj és – amint azt a következőkben látjuk – a karosszéria sárosodás csökkenését is eredményezi.

4. A KAROSSZÉRIÁRA HATÓ ERŐ SZÁMÍTÁSÁNAK LEHETŐSÉGEI

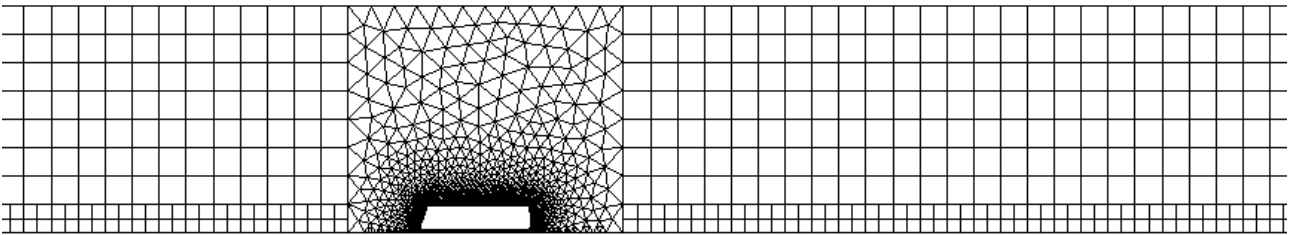
Az elmúlt években az áramlás számítása területén rendkívül gyors fejlődésnek lehetünk tanúi. Ez lehetővé tette az áramlástan alapegyenleteinek, a kontinuitás (tömegmegmaradás), a mozgásegyenlet (impulzus megmaradás), esetlegesen az energiaegyenlet (energia megmaradás), valamint egyéb mennyiségek (turbulencia, kémiai anyagok, szilárd szemcsék) transzportegyenleteinek numerikus megoldására épülő szoftverek gyakorlati feladatok megoldására való hatékony felhasználását. Az áramlás numerikus szimulációját a kibontakozó technológiák között kiemelt helyen említik.

Az eljárás alapja az, hogy a vizsgált teret, ahol a közeg áramlik, felosztjuk apró térfogatrészekre, és ezek segítségével állítjuk elő a deriváltakat. Az általunk alkalmazott FLUENT szoftver a véges térfogatok elvén működik, melynek alapvető tulajdonsága, hogy a fent említett egyenleteket integrál és konzervatív formában oldja meg. Ezen a módon a kis térfogat cellák falain egyszerűen ellenőrizhetővé válik a be- és kilépő tömeg-, illetve impulzusáram mennyisége. A fluxusok ily módon való kezelése biztosítja egyben azt is, hogy a megmaradó mennyiségek ténylegesen, numerikus hiba nélkül megmaradjanak. Ezt a módszert e kedvező tulajdonsága miatt széles körben alkalmazzák a numerikus áramlástan területén.

Jelentős nehézséget jelent azonban a turbulencia jelenségének figyelembe vétele, ugyanis a turbulens sebesség-ingadozások frekvenciájának skálája igen széles, vagyis a turbulens áramkép struktúrák, örvények mérete nagy tartományt fog át. Mindez azt eredményezné, hogy az áramlást leíró differenciálegyenleteinket nagyon finom felosztású hálózat segítségével kellene megoldani. Ez a jelenlegi módszerek és számítógép kapacitások mellett nem alkalmazható gazdaságosan, így a turbulenciát modellezni kell. A turbulencia modellek jelenleg a Reynolds-féle látszólagos feszültségek kiszámítására irányulnak, amelyet többféle módon végeznek el. A jelenleg elérhető turbulencia modellek közül egyik sem mondható általános érvényűnek, így a modellezendő jelenség

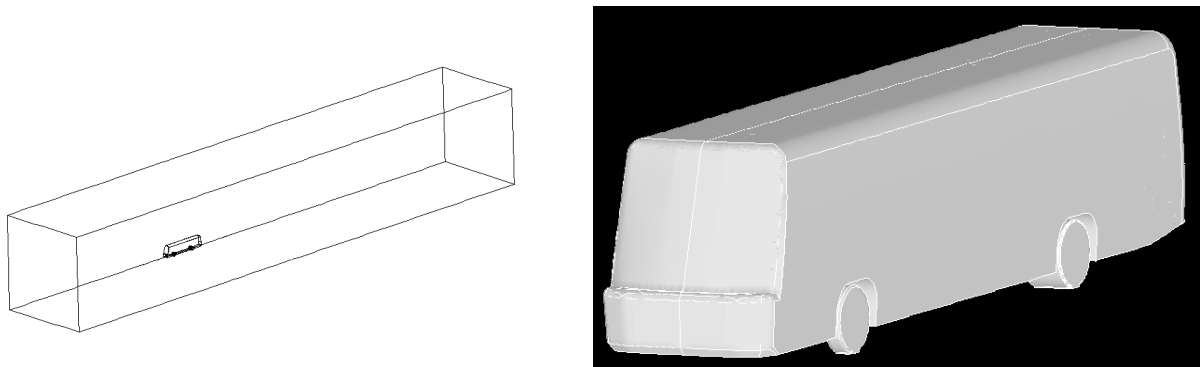
tulajdonságai alapján kell eldöntenünk, hogy melyik utat választjuk ennek az igen fontos áramlási jellemző hatásának figyelembe vételére.

A BME Áramlástan Tanszéken elvégeztük az előzőekben leírt mérések alapjául szolgáló, lekerekített éllel rendelkező autóbusz modell konfiguráció körüli áramlás numerikus modellezését. Az áramlási teret kb. 400000 cellára osztottuk fel, melynek cellatérfogot eloszlása olyan volt, hogy az autóbusz modell közelében a térfogatok kicsik voltak, a zavartalannak számító távolságban pedig viszonylag nagyok. A **3. ábra** mutatja a háló autóbusz modell középsíkjába eső szelvényét.



3. ábra. A számítási hálózat szerkezete a tartomány középsíkjában

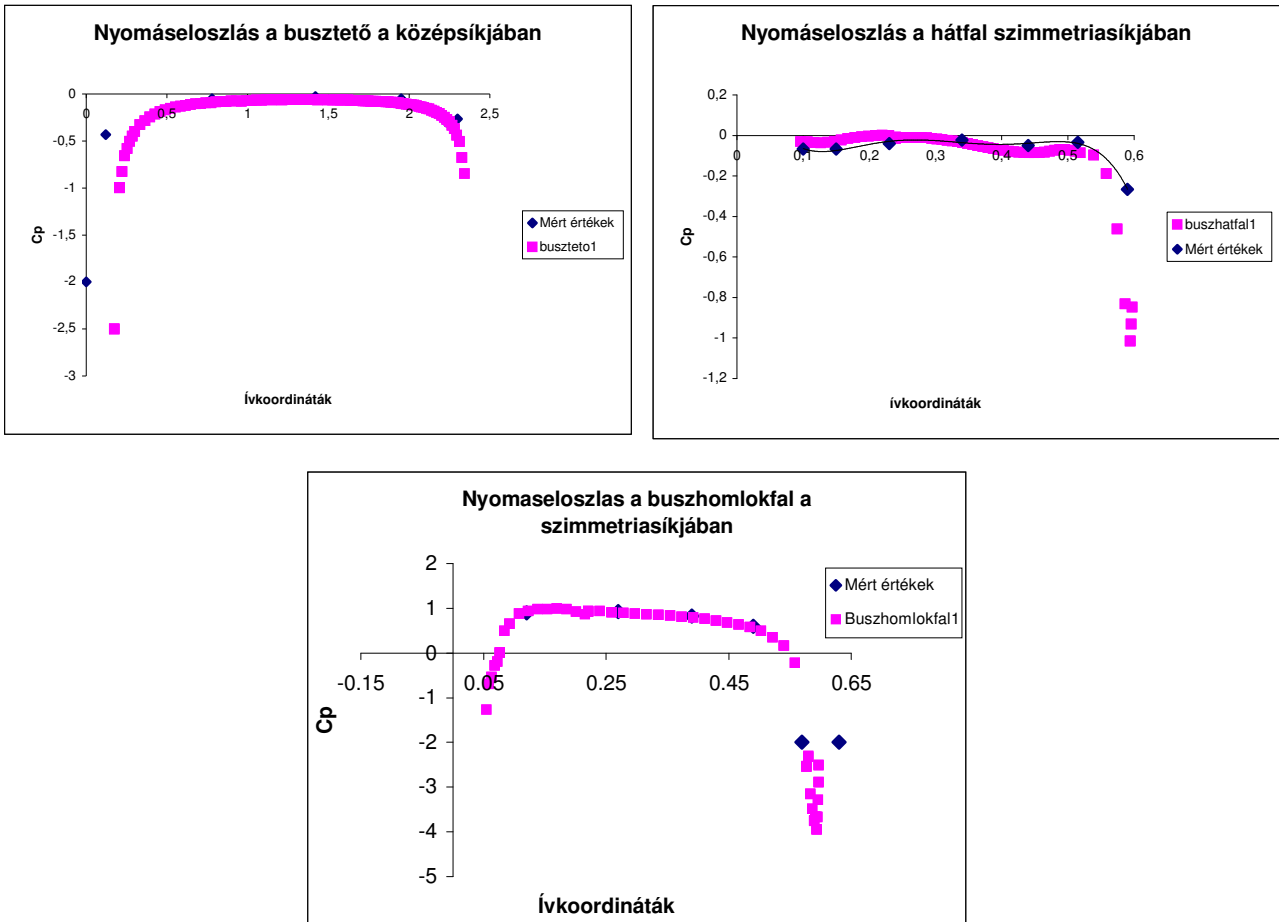
A nyugvó levegőben haladó autóbusz körüli áramlást szimmetrikusnak vehetjük, így elegendő volt a teljes áramlási tartománynak csak az egyik felét vizsgálni. Az áramlás szempontjából nagyon fontos volt a határréteg, illetve a turbulencia jelenségének megfelelő módon történő kezelése. Az autóbusz körüli áramlást az autóbushoz rögzített koordinátarendszerből vizsgáltuk. A talaj ebben az esetben hátrafelé (az ábrán balról jobbra) mozog, és a kerekek forognak. A számítási tartomány és az autóbusz geometriája a **4. ábrán** látható. A méretek megegyeznek a modell méreteivel és az áramlási sebesség 25 m/s, ami szintén megfelel a mérésnél alkalmazott peremfeltételnek.



4. ábra. Az áramlási tér felének geometriája (a levegő balról jobbra áramlik), valamint a vizsgált autóbusz térbeli ábrája

A mérésekből származó nyomáseloszlásokat alapul véve összehasonlítást végeztünk a mért és számított esetek között. Az **5. ábra** a nyomástényező eloszlást mutatja az autóbusz különböző felületein. (A nyomástényező definícióját az (1) összefüggésben adtuk meg.)

Az ábrák azt mutatják, hogy a számítás és a mérés eredményei közötti egyezés jónak mondható. A homlokkal, illetve a busztető numerikus szempontból nem mondható nehéz feladatnak, hiszen az előzőnél az áramlás gyorsul, az utóbbinál párhuzamos a falakkal, így a súrlódásnak csak kevés szerepe van. Megfigyelhető azonban, hogy a hátfali nyomáseloszlás is nagyon jól egyezik a méréssel, ami jelentős eredménynek tekinthető, hiszen a hátfali áramkép struktúrájában igen nagy szerepe van a súrlódásnak és a turbulenciának, azaz azoknak a jelenségeknek, amelyek teljesen korrekt és általános érvényű modellezésével még nem rendelkezünk.



5. ábra. Nyomástényező eloszlások az autóbusz különböző felületeinek középsíkjaiban mérés és számítás alapján

Mindegyik diagramon látható, hogy a számítás az adott felületek szélein néhol jóval nagyobb depressziót jósolnak, mint amit mértünk. Itt alapvetően két hibalehetőséget említhetünk meg az eltérés okaként: a közeg összenyomhatóságát elhanyagoltuk, és a geometria megadásában (a peremfeltételek meghatározásában) hibákat követhettünk el.

Összegezve megállapíthatjuk, hogy még nem állnak rendelkezésre olyan módszerek, amelyekkel teljes pontossággal sikerülne meghatározni egy karosszéria körüli áramlást, és ezáltal az ellenállástényező értékét. Ezért a szélszámítások mérések még nem nélkülözhetők. Ugyanakkor a számítási módszerek igen alkalmasak arra, hogy szélszámításokkal való összevetés után gyorsan és gazdaságosan megvizsgálhassuk, hogy egyes tervezési paraméterek változása milyen változásokat idézhet elő az áramlástól függő sajátosságokban. Így pl. milyen geometriai módosítások milyen hatást gyakorolnak az áramlási ellenállásra, és ezen keresztül az üzemanyag fogyasztásra, hol célszerű elhelyezni a szellőzőlevegő bevezető nyílást, hogy a legkisebb ventilációs munkára legyen szükség? Emellett a numerikus módszerek – amint ezt később látjuk – segítenek az áramlás szerkezetének megismerésében és ezáltal az áramlási jellemzők tudatos kihasználásában a tervezés során.

5. A KAROSSZÉRIA SÁROSODÁS CSÖKKENTÉSE

Az autóbuszok nagy méretük, viszonylag nagy sebességük következtében az emberi környezet fontos, a közérzetet befolyásoló elemei. Ezt a hatást erősíti, hogy az autóbuszok igen gyakran kapcsolódnak a szabadidő eltöltéséhez, szórakozáshoz. Különösen lényeges, a versenyképességet befolyásoló tényező tehát a karosszéria alakja, színezése mellett a karosszéria elpiszkolódása, a sár

lerakódás mértéke. A már említett vizsgálat ellenállástényező csökkentés melletti másik célja a sár karosszériára való lerakódásának csökkentése volt áramlástanai eszközökkel.

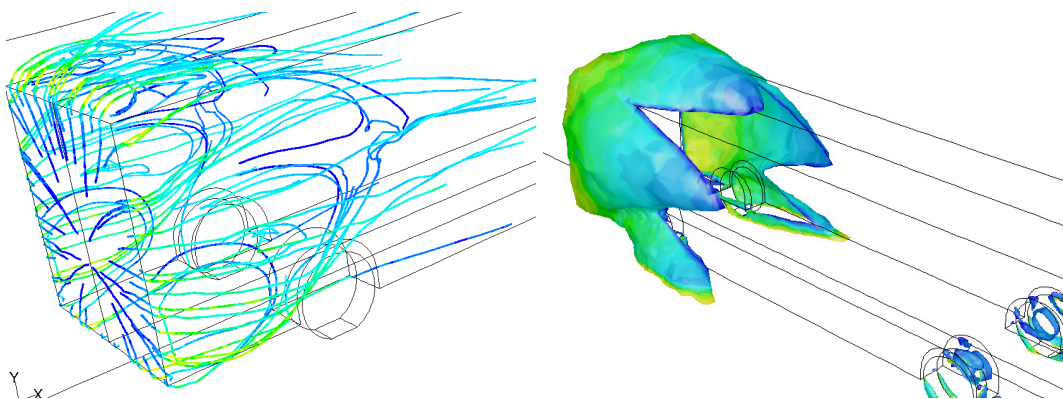
Esős időben a kerekek által diszpergált víz-sár cseppek a karosszéria két részére rakódik le különösen: az oldalfalra és a hátfalra. Különböző mechanizmusok révén mind az oldalfal, mind pedig a hátfal sárosodását nagy mértékben befolyásolja a karosszéria alatti áramlás.

5.1. Az oldalfal sárosodása

Az oldalfalat az első kerékszekrény felső részén kilépő sárcseppek szennyezik. Az, hogy a sárcseppek milyen magasra emelkednek fel, azaz milyen magasságig szennyezik az oldalfalat, a tapasztalat szerint alapvetően két tényezőtől függ: a homlokfal függőleges belépő élének lekerekítésétől és a karosszéria alatt áramló levegő lassulásától.

Ha a homlokfal függőleges belépő éleit nem kerekítjük le eléggé, nagy méretű leválási buborék jön létre, amely elérheti a kerékszekrény kivágását. Ennek következtében a kerékszekrényből kilépő sárcseppeket a leválási buborékban lévő áramlás felemeli és az oldalfal teljes magasságában elosztja. A belépő élék nem kellő lekerekítése – amelyet főként városi buszoknál figyelhetünk meg, ahol a kis sebesség miatt az áramlási ellenállásnak alárendelt szerepe van – tehát az oldalfal sárosodás szempontjából igen kedvezőtlen helyzetet idézhet elő.

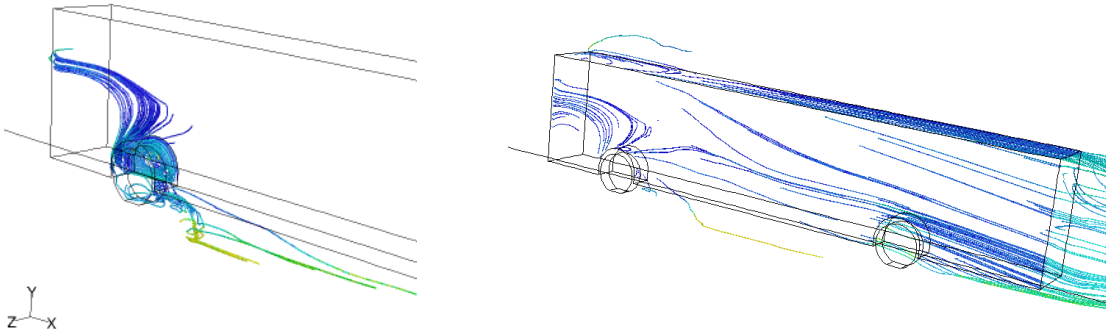
Egy egyszerű hasáb modellen mutatjuk be, hogy az éles belépőéleknek milyen kedvezőtlen hatása van a sárosodásra. A **6. ábrán** a homlokfal és az oldalfal melletti áramvonalak, valamint a leválási buborék burkolófelületei láthatók.



6. ábra. A homlokfali leválási buborék szerkezete

A **7. ábrán** az első kerékházból induló sárcseppek útját kísérhetjük nyomon. Az első kerékházból indított sárcseppek jelentős része a vezetőfülke oldalablakán rakódik le, másik része az ábra jobb oldali képén látható módon a teljes oldalfalat szennyezi.

Ha az oldalfal kellően lekerekített, akkor a sárcseppeket tartalmazó levegő egy felülről jellegzetes alakú, ívelt görbével határolt felületen szennyezi az oldalfalat. Ez a görbe annál magasabbra emelkedik fel, minél jobban lassul a karosszéria alá bejutó levegő. A karosszéria alól oldalirányban kilépő levegő ugyanis felfelé téríti az oldalfal mellett áramló, sárcseppeket tartalmazó levegőt. Ezért annál kisebb felületen sárosodik az oldalfal, minél kevesebb levegő áramlik be a karosszéria alá, és a beáramló levegő minél kevésbé lassul. Ebben a tekintetben tehát a homlokfal alsó vízszintes belépő élének lekerekítése és a karosszéria alsó részének érdessége hátrányos.

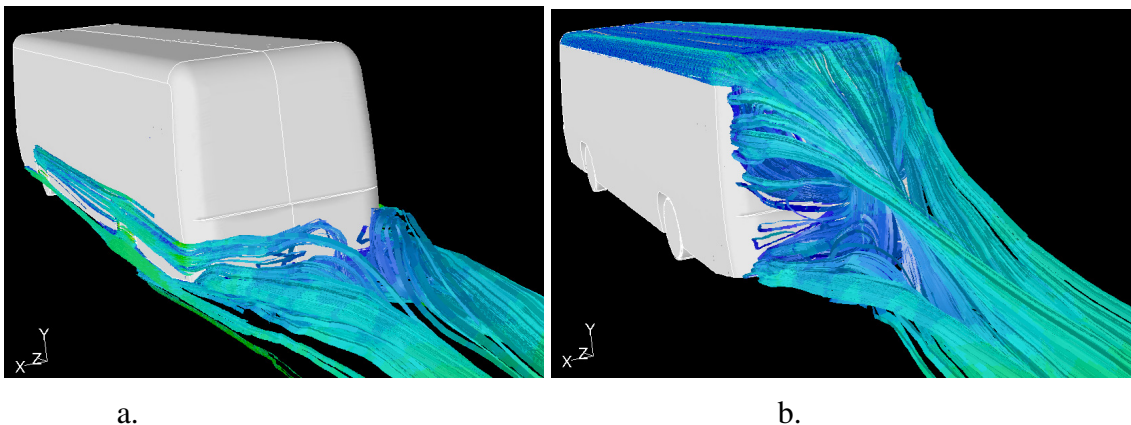


7. ábra. A busz oldalfalának sárosodása

5.2. A hátfal sárosodása

Az autóbusz hátfalat körülvevő kilépő éleken a határréteg leválik, és a hátfalhoz egy viszonylag kis sebességgel és nagy turbulenciafokkal jellemezhető bonyolult áramlási struktúra csatlakozik, amelyet leválási buboréknak nevezünk. Ennek szerkezete befolyásolja a hátfal sárosodását. Kísérletek azt mutatták, hogy a hátfal mögötti leválási buborékba vagy a karosszéria felett áramló tiszta levegő jut be, vagy a karosszéria alatti részből kiáramló sárccseppeket tartalmazó levegő. E két változat esetén a sárosodás mértéke méréseink szerint 1:4 arányban különbözött.

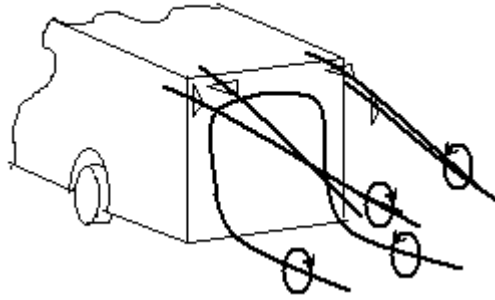
A numerikus áramlástan segítségével vizsgálva egy autóbusz körüli áramlási struktúrát a **8. ábrán** látható áramvonal rendszert kapjuk. Az ábra egy, a sárosodás szempontjából kedvező az áramképet mutat: a karosszéria alatti részből és a kerékszekrényből kilépő sárccseppeket tartalmazó levegő a talaj közelében eláramlik, nem jut a hátfal közelébe (a. kép). A karosszéria mögötti térbe a tető fölött áramló tiszta levegő áramlik, azaz a hátfal sárosodás mérsékelt (b. kép).



8. ábra. A hátfal mögötti áramlás számításának eredményei

A vizsgált autóbusz hátfalának kilépő élei nagymértékben le voltak kerekítve, így itt a határréteg nem vált le azonnal, hanem a leválásig a lekerekítés mentén áramlott, majd a leválás után ferdén lefelé hagyta el a hátfalat. A hátfal alsó vízszintes éle éles volt, így ott azonnal levált a határréteg. Mivel az alváz viszonylag sima volt, a súrlódási veszteség mérsékelt maradt, így a közegnek elegendő kinetikai energiája maradt ahhoz, hogy a hátfaltól távolodva növekvő nyomással szemben eláramoljon a hátfaltól és ne alakuljon ki visszaáramlás.

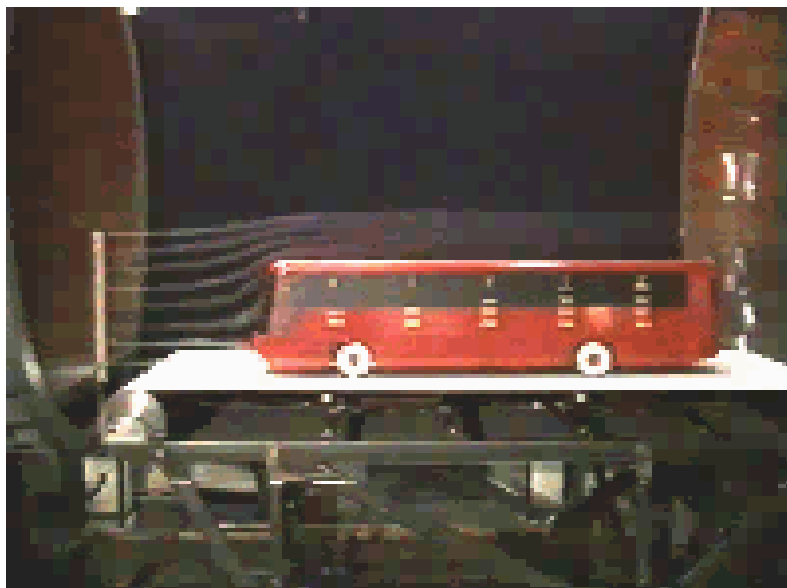
A hátfal mögött kialakuló áramlási struktúrát, a keletkező örvényeket a **9. ábrán** ábrázoltuk sematikusán:



9. ábra. A hátfal mögötti áramlási struktúra vázlata

A számítási eredmények összhangban vannak a méréseinkkel. Annak érdekében, hogy a karosszéria alatti áramlás a valóságnak megfelelően, futószalaggal szimuláltuk az autóbushoz képest hátrafelé mozgó talajt (ld. **10. ábra**).

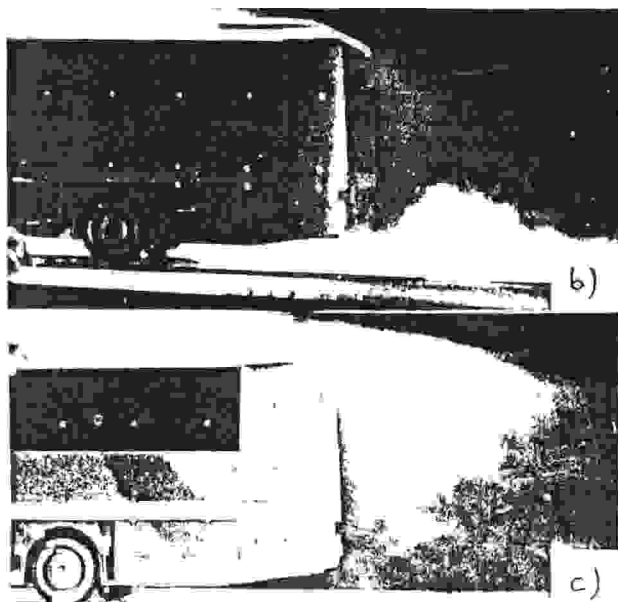
A **11. ábrán** látható olajköddel láthatóvá tett áramkép a **8. ábrán** látható számított áramképhez hasonló helyzetet mutat: ha a hátfal körüli felső és oldalsó kilépő éleket lekerekítjük, a karosszéria alatt áramló közeg a talaj közelében marad (b. kép), a karosszéria hátfala közelébe a tető felett áramló levegő jut (c. kép).



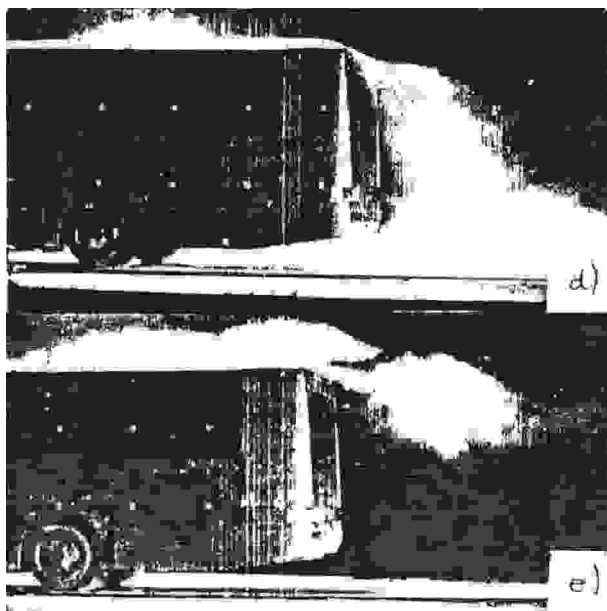
10. ábra. A mozgó talaj szimulálása futószalaggal

Ha a kilépő élek kevésbé lekerekítettek, vagy/és a karosszéria alatti résből lefékezett levegő lép ki, a karosszéria alól kiáramló, sárcseppeket tartalmazó levegő a hátfalra áramlik, erősen szennyezve azt. A **12. ábrán** ez az eset látható: a d. jelű képen a karosszéria alól kiáramló és a hátfalra jutó levegő útja figyelhető meg, míg az e. jelű képen a karosszéria felett áramló levegőé. Ebben az esetben a hátfal erősen sárosodik.

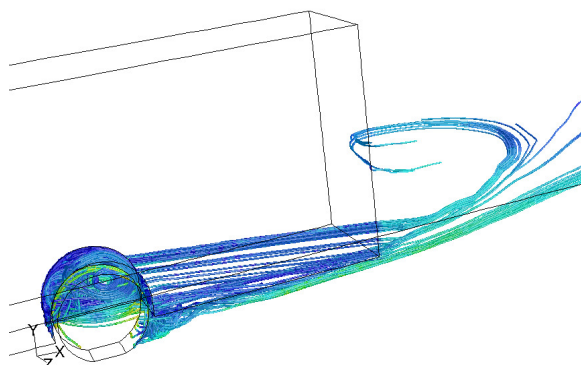
Hasonló áramképet mutatnak a hátfal mögött elhelyezett pamutszálak az **1. ábrán** és hasonló eredményre vezetett az áramlás numerikus szimulálása: a kerékről indított áramvonalak egy része visszakanyarodik a hátfalra (ld. **13. ábra**). Az ábrán látható, hogy a hátsó kerékházból érkező levegő egy örvénybe kerül a hátfal mögött, amely meghatározza a sárcseppek további útját.



11. ábra. Láthatóvá tett áramlás az autóbusz modell mögött.
Olajköd bevezetés b) esetben alul, c) esetben felül



12. ábra. Láthatóvá tett áramlás az autóbusz modell mögött.
Olajköd bevezetés d) esetben alul, e) esetben felül



13. ábra A busz hátfalának sárosodása

A számítási modellen az alváz sima volt, így az áramlás lassulása nem volt jelentős. Érdes alváz esetén az alsó örvény mérete megnőhet, és így a sáros levegő a teljes hátfalat szennyezheti.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az autóbusz típusok versenyképességét jelentősen befolyásolják a karosszéria áramlási jellemzői. Az autóbuszok sebességének növekedésével nő az áramlási ellenállási erő szerepe az üzemanyag fogyasztásban. Nő az utasok komfort és biztonság iránti igénye, ezért a karosszéria sárosodás és a karosszéria körüláramlásából származó zaj csökkentése, a fékek jobb hűtése, a belső szellőzés hatékonyságának növelése és zajosságának csökkentése fontos fejlesztési szempontokká válhatnak. Mindezen áramlási vizsgálatokat igénylő problémák megoldásában a hagyományos szélcsatorna kísérletek mellett növekvő szerepet játszik a numerikus áramlástan, amellyel egyre pontosabban és megbízhatóbban írható le a karosszéria körüli vagy a karosszérián belüli áramlás.