III.3. Ütközéses balesetek

„... gépkocsijával áttért az úttest bal oldalára, ott összeütközött egy tehergépkocsival, majd nekicsúszott egy személygépkocsinak. A gépkocsivezető a kórházba szállítás közben belehalt sérüléseibe."

„Frontálisan ütközött a Mélyépítő Vállalat munkásokat szállító bérautóbusza és a Volán helyi autóbusza. A baleset következtében hárman súlyos, tizenhárman pedig könnyű sérülést szenvedtek."

Ilyen és hasonló tragikus baleseti tudósításokat nap nap után olvashatunk a napilapok hírrovatában. A szomorú hírek mögött sokszor az emberi felelőtlenség, sokszor műszaki hiba, esetenként pedig csak a vak véletlen rejlik. Gyakran még a véletlen balesetek is megelőzhetők vagy súlyosságukban enyhíthetők lennének, ha a volán mögött ülők egy kissé óvatosabban, lassabban vezetnének.

A balesetek fizikájának elemzésével rámutathatunk azokra az okokra, amelyek ezt indokolják.

III.3.1. Miért sérül meg a vezető?

A balesetek súlyosságát főképp a balesetet szenvedő emberre ható erők nagysága szabja meg. Természetesen nem mindegy, hogy milyen testrészek sérülnek, de ez bizonyos értelemben szerencse kérdése. Az azonban egyértelmű, hogy ha a fellépő erőhatások nagyok, a súlyos sérülés veszélye is igen nagy.

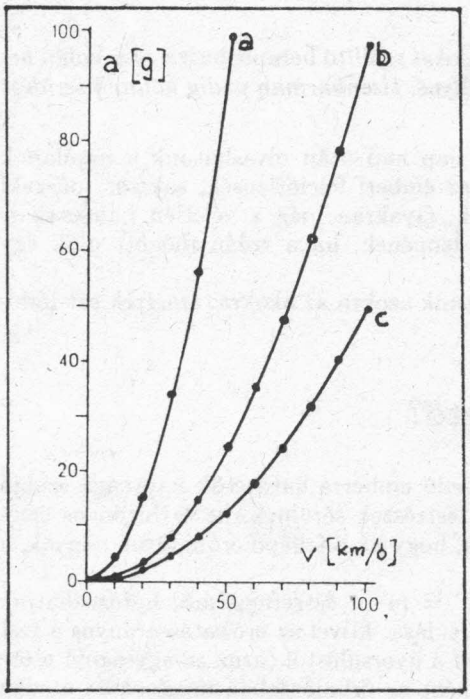
Az ütközés következtében fellépő F erőt az $F = m \cdot a$ összefüggésből határozhatjuk meg, ahol m a mozgó test tömege, a pedig a gyorsulása. Mivel az erőhatás arányos a test tömegével, adott tömegű ember esetén az erő csak a gyorsulástól (azaz az egységnyi időre jutó sebességváltozástól) függ. Gyorsulási egységként az űrhajózásban megszokott módon célszerű a g nehézségi gyorsulást választani. A g egységekben mért gyorsulásnak ugyanis szemléletes jelentése van. Ha például egy ember $2g$ gyorsulással mozog, ez azt jelenti, hogy a rá ható eredő erő éppen nyugalmi állapotban mért súlyának a kétszerese. Így a g egységekben mért gyorsulás a mozgó test súlyában mint egységben adja meg a testre ható eredő erőt.

Az ütközéses balesetek során a gépkocsik és a bennük ülők sebessége is nullára csökken, így a sebességváltozás az ütközés előtti sebességgel egyenlő. Az erő tehát kisebb lesz, ha lassabban mozgó test ütközik. Másrészt az erő nagysága a sebességváltozás időtartamától is függ: a gyorsulás és így az erő is annál nagyobb, minél hirtelenebb a sebességváltozás. Adott sebességű ütközés esetén a lassulás (tehát az erőhatás is) az ütközési idő növelésével csökkenthető.

Az ütközési idő nagyságrendje a kísérleti tapasztalatok szerint *0,05–0,3 s*. A kérdésre később még visszatérünk, bevezetésül azonban a probléma bonyolultságának érzékeltetésére foglalkozzunk egy fiktív példával!

Tekintsünk először egy nyugvó akadályba ütköző járművet és az egyszerűség kedvéért tételezzük fel, hogy az ütközés során a lassulás egyenletes, azaz a lassuló testre állandó erő hat. (Ez természetesen nem igaz, nagyságrendi becslésekre azonban tökéletesen alkalmas.)

A d távolságon a megállásig egyenletesen lassuló test átlagsebessége $\frac{v}{2}$, tehát a megállásig eltelő ütközési idő: $\frac{2d}{v}$. Így a lassulásra: $a = \frac{v^2}{2d}$ adódik. Adott ütközési sebesség esetén tehát a lassulás a d ütközési hosszból, azaz abból a távolságból határozható meg, amelyet a test a megállásig megtesz. Becsüljük meg néhány valós baleseti helyzetben ezt a távolságot!



III.3.1. ábra

Tegyük fel, hogy egy v sebességgel haladó személygépkocsl megcsúszik, és az út menti vasbeton oszlopnak rohan. Gondoljuk végig, hogy mi történik a gépkocsivezetővel az ütközés során. Foglalkozzunk először azzal az esettel, amikor a gépkocsivezető nem használta a biztonsági övet, s az egyszerűség kedvéért tegyük fel, hogy az ütközés pillanatában a gépkocsi szinte azonnal megállt. (Ez a feltevés semmiképpen sem reális, ezért később még visszatérünk rá.) A bekötetlen vezető tehetetlensége miatt az ütközés után változatlan sebességgel folytatja útját, s a műszerfalnak, illetőleg a kormánynak ütközve megáll. Az ütközési távolság becslése ebben az esetben a legnehezebb, hiszen tulajdonképpen a műszerfalnak vágódó test benyomódásával egyenlő. Tegyük fel, hogy a gépkocsivezető mellkasával ütközik például a kormánynak, s durva becslésként tekintsük a mellkas deformálódását, tehát az ütközési hosszat *10 cm*-nek. (Ez valószínűleg már a bordák összeroppanását jelentené, most azonban csak az erőhatások megközelítő kiszámításával foglalkozunk, s a biológiai következmények hátborzongató leírásától eltekintünk.) A valóságban egyébként ennél kissé bonyolultabb a helyzet, mert ha a volánban megkapaszkodó vezető megmerevíti karjait, akkor egy kartörés árán esetleg meghosszabbíthatja az ütközési utat.

A szemléletesség kedvéért a III.3.1. ábrán a *10* centiméteres ütközési hosszhoz tartozó lassulásokat grafikusan is ábrázoltuk az ütközési sebesség függvényében (görbe). Látható, hogy már *20 km/óra* sebesség fölött óriási, *10 g* feletti gyorsulások lépnek fel. Ezeket a gyorsulásokat legfeljebb a speciálisan kiképzett űrhajósok szervezete képes elviselni! A b jelű görbe a biztonsági öv, a c jelű pedig a karosszéria deformációjának hatását mutatja.

III.3.1.1 A biztonsági öv és a karosszéria

Nézzük most, hogy mi történik egy óvatosabb gépkocsivezetővel, aki bekötötte magát. Az ütközés pillanatában a biztonsági öv nyúlni kezd és azonnal lassítja a vezető tehetetlenül előre lendülő testét. (Nagyon lényeges, hogy a biztonsági öv nem rugalmasan, hanem maradandó alakváltozással, képlékenyen nyúlik. Ez akadályozza meg úgyanis, hogy az öv a már lefékezett vezetőt csúzliként visszalője az ülésbe!) Így az övvel bekötött vezető számára az

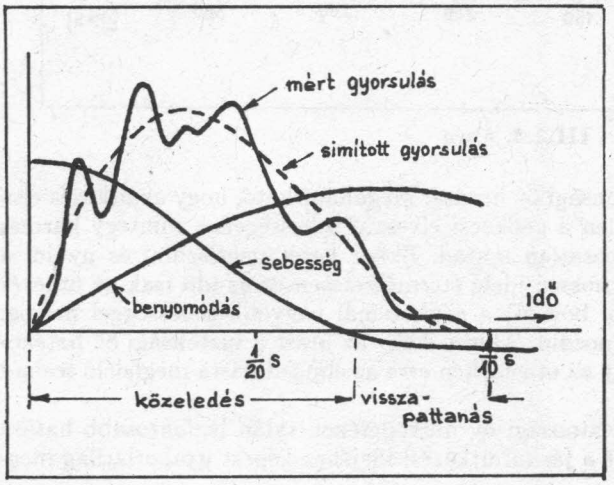
ütközési hossz jelentősen megnő! Az ütközési hosszat ebben az esetben a vezető mellkasa és a kormány közötti, nagyjából *40* cm-es távolsággal közelíthetjük.

Az ekkor fellépő gyorsulásokat a III.3.1. grafikon *b* görbéje mutatja. Természetesen az ütközési hossz fenti becslése is csak közelítés. (Kis sebességű ütközöseknél az öv nem nyúlik *40 cm*-t, nagy sebességű ütközéskor pedig a vezető teste még jelentős sebességgel vágódik a műszerfalnak.) A nyert adatok azonban tájékoztató becslésként elfogadhatók.

Segít-e a karosszéria deformálódása?

Az előzőekben úgy számoltunk, mintha a gépkocsi karosszériája az ütközés során nem deformálódna. A valóság az, mint sok autós már nyilván bosszankodva észlelte, hogy a kocsiszekrény már viszonylag kis ütközési sebességeknél is benyomódik. Ez a deformáció adott esetben életet menthet! A gépkocsi felgyűrődő orra ugyanis meghosszabbítja a vezető számára az ütközési hosszat. Ha a kocsi orrának benyomódását *40 cm*-nek vesszük, akkor az ütközési hossz durván becsülve *80 cm* lesz. (A becslés kis sebességeknél pontatlan.) Az ennek megfelelő gyorsulásokat a III.3.1. grafikon *c* jelzésű görbéje mutatja. Az ütközési hossz növekedése jelentősen csökkentette a lassulás értékét. Ez a mechanizmus azonban csak akkor működik hatékonyan, ha az ütközés során a deformáció valóban egyenletesen és a gépkocsit erőteljesen lassítva megy végbe. Erősen korrodált lemez vagy például a Trabant gyenge műanyag karosszériája nem jelent hatékony védelmet a vezető számára!

III.3.2. Mi történik a valóságban?

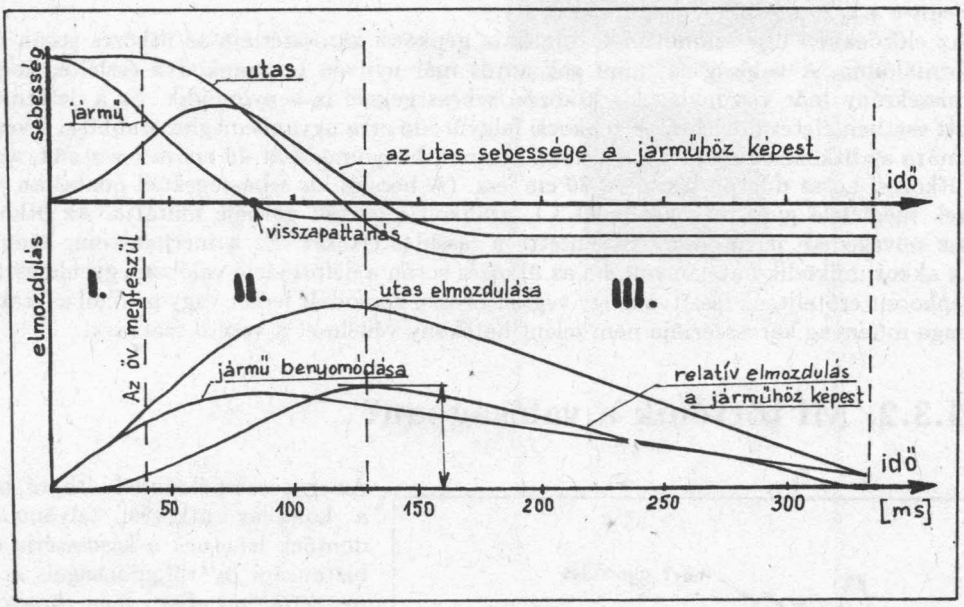


III.3.2. ábra

Az egyszerű példákból látható, hogy a komplex ütközési folyamatban döntőek lehetnek a karosszéria és a biztonsági öv tulajdonságai. A karosszéria azonban igen bonyolult rendszer, rugalmas, illetve képlékeny viselkedése elméleti úton nem állapítható meg. Ezért a nagy autógyárak szabványosított módon *48 km/h* sebességgel szilárd falnak ütköztetve vizsgálják a gépkocsik viselkedését és az utastérben elhelyezett bábuk helyzetének és sebességének változását. A tapasztalat azt mutatja, hogy a kapott grafikonok jellege hasonló. A III.3.2. ábrán egy falnak ütköző gépkocsi sebesség–idő, lassulás–idő és benyomódás–idő grafikonja látható. Szembeötlő, hogy a lassulás erősen ingadozik! Ennek nyilvánvalóan az az oka, hogy a karosszéria felépítése nem homogén. Leolvasható továbbá az is, hogy az ütközés döntő része néhány század másodperc alatt lezajlik, valamint az, hogy a folyamat végén a karosszéria csekély rugalmas visszaalakulása miatt a gépkocsi kissé elpattan a faltól.

A kísérletileg felvett grafikonok alapján az egyes gépkocsitípusokra jellemző simított menetű gyorsulás-, sebesség- és benyomódásfüggvények határozhatók meg, s ezek segítségével számítógépes eljárással bonyolult ütközési folyamatok (pl. két gépkocsi frontális ütközése)

is szimulálhatók. A gépkocsikra vonatkozó vizsgálatokat természetesen ki kell egészíteni az utas mozgására vonatkozó mérésekkel is. A III.3.3. ábra a szilárd falba ütköző gépkocsi sebessége és az utastérben elhelyezett bábu mozgására jellemző paraméterek alakulását mutatja az idő függvényében. Az ábrán a kísérletileg felvett görbék helyett már a simított grafikonok láthatók.



III.3.3. ábra

A grafikonokról leolvasható a biztonsági öv hatása. Megállapítható, hogy az ütközés első három század ($3 \cdot 10^{-2}$) másodpercében a gépkocsi elveszíti sebességének mintegy harmadát, az utas sebessége azonban változatlan marad. Ekkor kezd megfeszülni és nyúlni a biztonsági öv. Az utas azonban még hosszú ideig (természetesen ez az idő csak az ütközés időtartamához viszonyított időskálán hosszú) a gépkocsinál nagyobb sebességgel mozog. Emiatt az utas a járműben is előre mozdul. Ahhoz, hogy az utast a biztonsági öv hatékonyan megvédhesse, az szükséges, hogy az utastérben erre az elmozdulásra megfelelő szabad tér legyen.

A III.3.3. ábra mutatja, hogy a biztonsági öv működésének talán legfontosabb hatása az, hogy az utas lelassításának idejét a jármű ütközési idejéhez képest gyakorlatilag megtízszerezi!

III.3.2.1. Az ütközési folyamat mennyiségi jellemzése

Az ütközési folyamat jobban áttekinthető és matematikailag is egzaktul követhető leírásához juthatunk, ha a kísérletileg felvett görbéket néhány jellegzetes paraméterük alapján egyszerű függvényekkel közelítjük. Foglalkozzunk először a gépkocsival!

A kísérleti eredmények szerint a jármű a faltól kissé elpattan. Az ütközésnek igen fontos jellemzője, hogy a folyamat mennyire rugalmas. A rugalmasság mértékeként az ún. ütközési

számot (k) használják. Az ütközési szám fizikai tartalmát a következőképpen érthetjük meg. Bontsuk két részre az ütközési folyamatot. Az első rész tartson addig, amíg a gépkocsi súlypontjának sebessége zérus nem lesz. Jelöljük $F(t)$-vel a fal által a kocsira kifejtett erőt és τ-val a mozgás e szakaszának időtartamát. Ekkor

$$\int_0^{\tau} F dt = \Delta I_1 = -mv_0,$$

ahol m a gépkocsi tömege, v_o pedig a kezdeti sebessége. Az ütközés második szakaszában a gépkocsi visszapattan, és a jármű ellentétes irányú impulzushoz jut. Írjuk fel erre a szakaszra is az impulzustételt:

$$\int_{\tau}^{t_0} F dt = \Delta I_2 = mv,$$

ahol t_0 az ütközés teljes időtartamát, v pedig a visszapattanás sebességét jelenti.

A folyamat rugalmassága a benyomódást és visszapattanást okozó erőlökés k arányával jellemezhető, azaz

$$k = \frac{\int_{\tau}^{t_0} F dt}{\int_0^{\tau} F dt} = -\frac{v}{v_0}.$$

Nyilvánvaló, hogy tökéletesen rugalmas ütközés esetén — amikor az első szakaszban bekövetkező deformáció tökéletesen visszaalakul — $k = 1$. Tökéletesen rugalmatlan esetben a második szakasz nem is létezik, vagyis $k = 0$.

Az ütközési szám segítségével egyszerűen kifejezhető az ütközés során disszipált $\frac{\Delta E}{E_0}$ energiahányad:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \left(\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv^2\right) : \frac{1}{2}mv_0^2 = 1 - k^2.$$

Vegyük észre, hogy az ütközési szám nemcsak a jármű és a fal anyagi tulajdonságaitól, hanem az ütközés v_0 kezdősebességétől is függ. (Ezért is szabványosították az ütközési kísérletek során a kezdősebességet.) Ha ugyanis a kezdősebesség nő, akkor a jármű egyre jobban deformálódik, s az ütközés mindinkább a tökéletesen rugalmatlan határesethez tart. Az ütközési szám mint paraméter felvételével a gépkocsi kinematikai jellemzőinek meghatározására egyszerű leírás adható.

A III.3.2. grafikon mutatja, hogy a gépkocsi lassulásgörbéje jól közelíthető egy szinuszgörbével, azaz

$$a = -a_0 \sin bt,$$

ahol $b = \frac{\pi}{t_0}$. Ha ismerjük a v_0 kezdősebességet és a k ütközési számot, akkor a

$$v_0 + \int_0^{t_0} a dt = -kv_0$$

egyenlet alapján a jármű maximális a_0 gyorsulására az

$$a_0 = \frac{v_0}{2}(1+k)\frac{\pi}{t_0}$$

összefüggéshez jutunk. Ezzel a gépkocsi sebesség–idő függvénye a

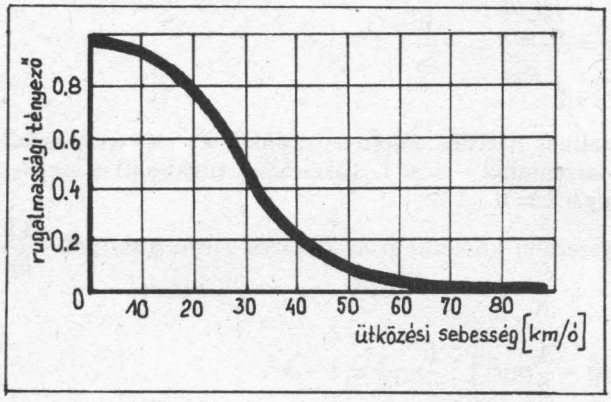
$$v = \frac{v_0}{2}(1-k) + \frac{v_0}{2}(1+k)\cos\frac{\pi}{t_0}t$$

alakban, az elmozdulás–idő függvény pedig az

$$s = v_0 t + \frac{v_0}{2}(1+k)\frac{t_0}{\pi}\sin\frac{\pi}{t_0}t$$

alakban fejezhető ki. Ezek az összefüggések természetesen csak addig érvényesek, amíg a jármű érintkezik a fallal. Az elválás pillanatától a gépkocsi mozgása egyenletesnek tekinthető.

Foglalkozzunk most az utas mozgásával!



III.3.4. ábra

A III.3.3. grafikon mutatja, hogy egy rövid τ_0 ideig az utast semmi sem lassítja, majd ezután a lassulás jó közelítéssel állandó. Ez elvileg is érthető, hiszen a képlékenyen nyúló öv által kifejtett erő állandónak tekinthető. Ha ezt a modellt használjuk, akkor az övben ébredő rugalmas feszültségeket elhanyagoljuk. Ha az autóban van elegendő szabad tér, akkor az utas mozgását lényegében csak a biztonsági öv befolyásolja. Ha az övben ébredő erő F_0 és az utas tömege m_u, akkor az utas lassulása

$$a_u = \frac{F_0}{m_u}.$$

Ennek megfelelően sebessége a

$$v_u = v_0 - a_u(t - \tau_0),$$

elmozdulása pedig az

$$s_u = v_0 t - \frac{a_u}{2}(t-\tau_0)^2$$

összefüggés szerint változik, ahol τ_0 az ütközés kezdetétől az öv megfeszüléséig eltelt időt jelenti. Ezek az összefüggések addig érvényesek, amíg az utas sebessége egyenlővé nem válik

a gépkocsiéval, azután ugyanis a két test már együtt mozog. (Az öv rugalmasságának figyelembe vétele kissé módosítaná ezt a képet, mert ekkor az utas visszafelé mozgása gyorsabb lenne, mint a gépkocsié.) A fentiek alapján mind a jármű, mind az utas mozgása egyszerű függvényekkel jellemezhető. Ezek menete alapján néhány egyszerű tervezési szabály is megállapítható. Nyilvánvalóan arra kell törekedni, hogy az utas lassulása a lehető legkisebb legyen. Ezért olyan biztonsági övet kell alkalmazni, amely nagyon kis időkéséssel megfeszül és az utastérben meglévő szabad teret jól kihasználva nyúlik meg. Ugyancsak hasznos, ha a gépkocsi karosszériája úgy deformálódik, hogy ezáltal az ütközési idő meghosszabbodjék. Végül a III.3.4. ábrán a k ütközési szám változását ábrázoltuk az ütközési sebesség függvényében.

Érdemes azonban megjegyezni, hogy mind a kocsiszekrénynek, mind a biztonsági övnek bizonyos határig rugalmasan kell viselkednie. Felesleges költséget jelentene ugyanis, ha már kisebb koccanások vagy egy erős fékezés hatására is deformálódna a kocsiszekrény, illetve megnyúlna a biztonsági öv.

III.3.3. A frontális ütközés

A frontális ütközés rendkívül veszélyes, csaknem mindig halálos kimenetelű baleset, és mindig a „kicsik" számára súlyosabb. Egy nagy tömegű teherautó vagy autóbusz szinte elsöpri a szembe jövő személyautót! Így az ütközés rövid ideje alatt a személyautó nemcsak elveszíti eredeti sebességét, hanem még ellentétes irányú sebességet is nyer. Tegyük fel például, hogy egy $M = 10$ t tömegű tehergépkocsi egy $m = 1$ t tömegű személygépkocsival ütközik. Anélkül, hogy az ütközési folyamatot részleteznénk, határozzuk meg lassulásaik arányát! Mivel az ütközés során a két gépkocsira ható erő a hatás–ellenhatás-törvény értelmében egyenlő, lassulásaik aránya megegyezik a tömegek arányának reciprokával, azaz

$$\frac{a_t}{a_s} = \frac{m}{M} = \frac{1}{10}.$$

Ez azt jelenti, hogy a személyautó utasai sokszorosan nagyobb veszélyben vannak, mint a teherautó utasai.

A biztonsági öv hatásának elemzéséhez már pontosabb leírásra van szükségünk, ez azonban visszavezethető az előzőekben tárgyalt, fallal való ütközésre. Vizsgáljuk ugyanis az ütközést a két gépkocsi közös tömegközéppontjához rögzített koordináta-rendszerben. Mivel az ütközés során csak belső erők hatnak, a tömegközéppont sebessége nem változik, tehát zérus marad. Ebben a koordináta-rendszerben a két gépkocsi saját tömegközéppontja éppen a teherautó S_t és a személyautó S_s deformációjának összegével közeledik egymáshoz. A közös tömegközépponthoz képest azonban az egyes tömegközéppontok elmozdulása nem egyezik meg a megfelelő karosszériák behorpadásával! A tömegközéppont-tétel értelmében a teherautó tömegközéppontja

$$z_t = \frac{m(s_t + s_b)}{m + M},$$

a személyautóé pedig

$$z_{sz} = \frac{M(s_t + s_b)}{m + M}$$

távolsággal mozdul el.

Az egyes autók deformálódása pontosan ugyanúgy zajlana le, mint a valóságban, ha a járművek közös tömegközéppontjába egy falat képzelnénk és karosszériáik deformálódását z_t-re, illetve z_{sz}-re módosítanánk, ütközési sebességként pedig a tömegközépponthoz képest adódó

$$w_t = \frac{m(v_t + v_s)}{m + M},$$

illetve

$$w_{sz} = \frac{M(v_t + v_{sz})}{m + M},$$

sebességet használnánk.

III.3.4. Apróság-e a koccanás?

A járművek ütközése szinte kifogyhatatlanul szolgáltatja a bonyolultabbnál bonyolultabb mechanikai problémákat. Befejezésül egy apróságnak tűnő és mégis gyakran komoly sérülést okozó helyzettel foglalkozunk.

Nem ritka baleset, hogy egy — például piros lámpánál álló — autóba viszonylag kis sebességgel beleszalad a mögötte haladó. A látszólag jelentéktelen koccanás következménye gyakran agyrázkódás. Az álló autó vezetőjét a hátulról jövő lökés váratlanul éri, s míg testét az ütés a gépkocsival együtt gyorsítja, feje a tehetetlenség következtében hátracsuklik. (Ezt akadályozhatja meg a fejtámasz!) Természetesen ezután a megfeszülő nyakizomzat vagy az ülés támlája a fejet is az autó sebességére gyorsítja, ez a gyorsítás azonban rendkívül rövid úton történik. Ha a meglökött autó *5 km/h* sebességgel lódul előre, s a fej gyorsítása *5 cm*-es úton következik be, a gyorsulás *1,9 g*. Ha az autó *10 km/h* sebességgel indul meg, ez az érték már *7,6 g*, *20 km/h* induló sebesség esetén pedig *30 g*. Ez utóbbi eléri az ökölvívók fejének a legnagyobb ütések hatására bekövetkező gyorsulását. Egy ilyen koccanás tehát felér egy K.O.-val!