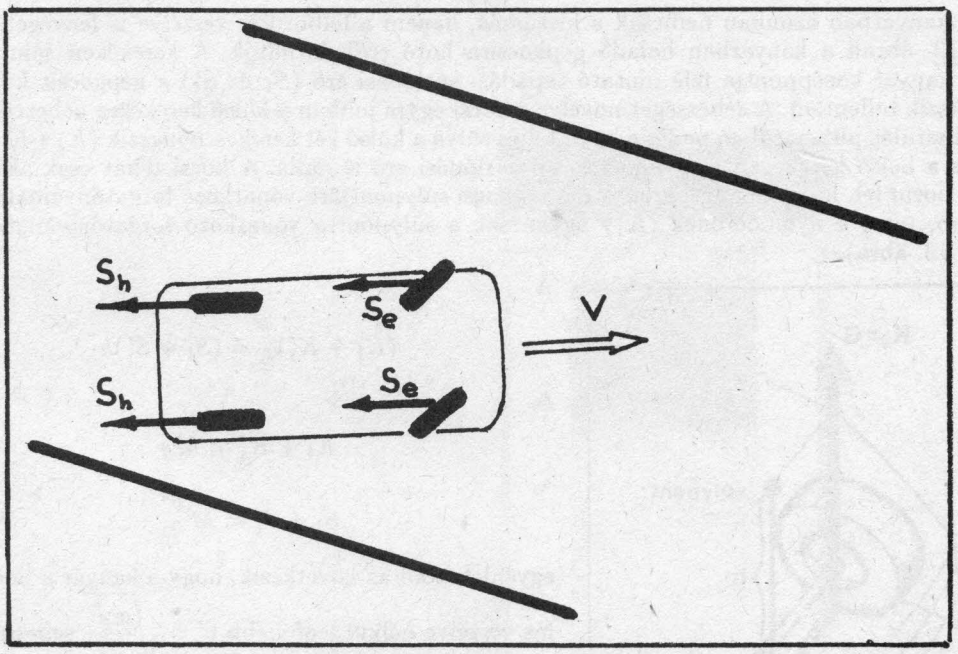
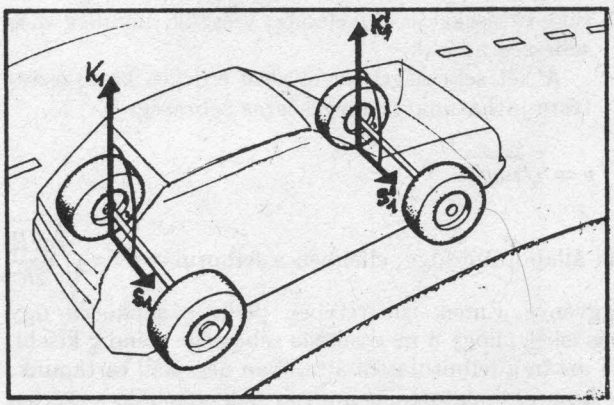


II.2.11. ábra

II.2.3. A kanyarban



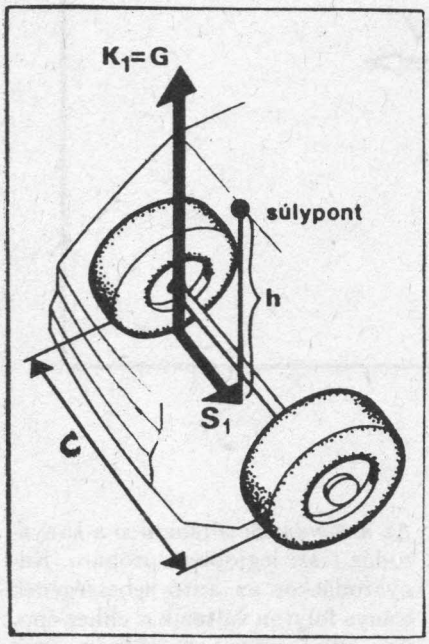
II.2.12. ábra

Az autóvezetőt alighanem a kanyarodás teszi legjobban próbára. Kanyarodáskor az autó sebességének iránya folyton változik, s ehhez éppúgy külső erőre van szükség, mint induláskor a sebesség növeléséhez, vagy fékezéskor a sebesség csökkentéséhez. Az R sugarú pályán v sebességgel haladó m tömegű gépkocsinak a pályán tartásához

$$F = m\frac{v^2}{r}$$

erőre van szükség. Ezt az erőt is a kerekek és az úttest között ébredő tapadás szolgáltatja, ám ez az erő merőleges a sebesség irányára, azaz a kanyar körívének középpontja felé irányul. Ha ahhoz, hogy a jármű a pályán maradjon, nagyobb erő szükséges, mint amekkora a tapadási erő lehető legnagyobb értéke ($\mu_0 mg$), akkor a kocsi kicsúszik a kanyarból. (Ebből adódik, hogy — egyenletes sebességre számítva és az ellenállási erőket elhanyagolva — az R sugarú kanyart egy autó legföljebb a $v = \sqrt{\mu_0 gR}$ összefüggésből számítható sebességgel veheti.

A kanyarban azonban nemcsak a kicsúszás, hanem a felborulás veszélye is fenyeget. A II.2.12. ábrán a kanyarban haladó gépkocsira ható erők láthatók. A kerekeken támadó és a kanyar középpontja felé mutató tapadási súrlódási erő (S_1 és S_1') a gépkocsit kifelé igyekszik billenteni. A sebességet növelve a kocsi egyre jobban a külső kerekekre nehezedik. A felborulás pillanatában pedig a kocsi teljes súlya a külső két keréken nyugszik ($K_1 + K_1' = G$), s a belső kerekeken a nyomóerő és a súrlódási erő is nulla. A kocsi tehát csak akkor nem borul fel, ha a tapadási erőnek (S_1) a kocsi súlypontjára vonatkozó forgatónyomatéka kisebb, mint a nyomóerőnek (K_1) ugyancsak a súlypontra vonatkozó forgatónyomatéka (II.2.13. ábra).



II.2.13. ábra

A

$$(K_1 + K_1')\frac{c}{2} = (S_1 + S_1')h$$

és

$$K_1 + K_1' = Mg$$

$$S_1 + S_1' = M\frac{v^2}{R}$$

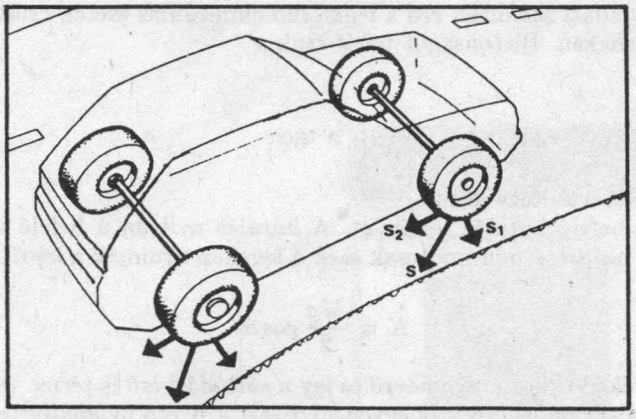
egyenletekből az következik, hogy a kanyar a borulás veszélye nélkül legföljebb $v' = \sqrt{\frac{gcR}{2h}}$ sebességgel vehető. (Az összefüggésben g a nehézségi gyorsulás, c a nyomtáv fele, R a pálya sugara, h a súlypont magassága.) Összefüggésünk csak megközelítő értéket ad, mert föltételeztük, hogy a kocsiszekrény mereven kapcsolódik az alvázhoz; ha a rugós felfüggesztéseket is figyelembe vesszük, némileg más sebesség adódik.

A két sebességet összevetve érdekes következtetésre juthatunk. A megcsúszás sebessége,

$$v = \sqrt{\mu_0 g R},$$

kizárólag az útviszonyoktól és a gumik állapotától függ, ellenben a felborulás $v' = \sqrt{\frac{gcR}{2h}}$ sebessége a kocsi felépítésének is függvénye. Ennek ismeretében pedig a gépkocsit úgy tervezhetik meg — s ez tervezési előírás is! —, hogy a megcsúszás sebessége mindig kisebb legyen, mint a borulási sebesség. Ezért aztán a felborulástól általában nem kell tartanunk. Ám egy magas építésű gépkocsival — ha a csomagtartóját nagyon megpakolják, s ezért a súlypontja túl magasra kerül, megtörténhet, hogy éles kanyarban nagy sebességgel haladva mégis felborul.

De maradjunk a megcsúszásnál! Ennek veszélye fokozódik, ha a kanyarban fékezni kezdünk vagy gyorsítunk. Ilyenkor ugyanis a tapadási súrlódási erő „elfordul" a kanyar középpontja felé mutató iránytól, s a középpont felé mutató, a gépkocsit körpályán tartó összetevője (S_1) kisebb lesz (II.2.14. ábra). Az a legbiztonságosabb tehát, ha a kanyarban egyenletes és nem túlságosan nagy sebességgel haladunk. Ez persze nem mindig követhe-

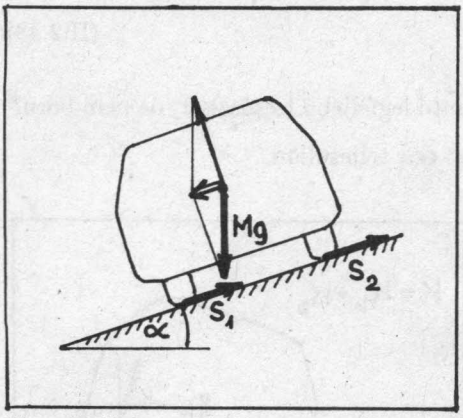


II.2.14. ábra

tő stratégia: ha például a kocsi a kanyarban megcsúszik és kormányozhatatlanná válik, kerekeit csak gázadással hozhatjuk ismét gördülésbe.

II.2.3.1. Kanyarodás emelt pályán

Megnövelhető a kanyarodás lehetséges sebessége, ha az út befelé dől. A befelé döntött pályán azonban a gépkocsi befelé, illetve kifelé is felborulhat. Vizsgáljuk végig, hogy adott súrlódási együttható esetén hogyan szabnak határt ezek a lehetséges veszélyhelyzetek a pálya α dőlésszögének és a gépkocsi sebességének.



II.2.15. ábra

Kezdjük a legegyszerűbb esettel, azaz határozzuk meg, mi a feltétele annak, hogy a befelé döntött pályán parkolhassunk. Gépkocsinknak tehát sem lecsúsznia, sem felborulnia nem szabad. Az egyszerűség kedvéért tegyük fel, hogy a kerekek a kocsi súlypontjához képest szimmetrikusan helyezkednek el. A II.2.15. ábráról leolvasható, hogy a gépkocsi nem csúszik le a pálya alja felé, ha

$$2S_b + 2S_k \geq Mg \sin\alpha,$$

ahol M a gépkocsi tömege, S_b, illetve S_k pedig a lejtő alja, illetve teteje felé eső kerekeken fellépő súrlódási erő. Mivel

$$S_b + S_k \leq \mu_0 \frac{Mg}{2} \cos\alpha,$$

a csúszás elkerülhető, ha

$$\mu_0 \geq \mathrm{tg}\alpha. \qquad \text{(II.2.46)}$$

Természetesen ilyen dőlésszög mellett a parkoló gépkocsik biztosan lecsúsznának az út

aljára, hiszen a tapadási súrlódási erő a legkisebb elmozdulás esetén csúszóra vált, s ekkor a súrlódási erő lecsökken. Biztonságot tehát csak a

$$\mu > \mathrm{tg}\alpha \tag{II.2.47}$$

feltételeknek eleget tevő dőlés jelent.

Nézzük most a befelé borulás feltételét. A borulás nyilván a befelé eső kerekek körül következhet be. A határesetben már csak ezek a kerekek nyomják a lejtőt, s ez a nyomóerő

$$K = \frac{Mg}{2}\cos\alpha.$$

A másik két keréken ekkor a nyomóerő és így a súrlódási erő is zérus. Borulás akkor nem következik be, ha a súrlódási erő még egyensúlyt tart a K erő nyomatékával (II.2.16. ábra). Még kevésbé borul fel a kocsi, ha

$$2Sh \geq 2K\frac{c}{2}.$$

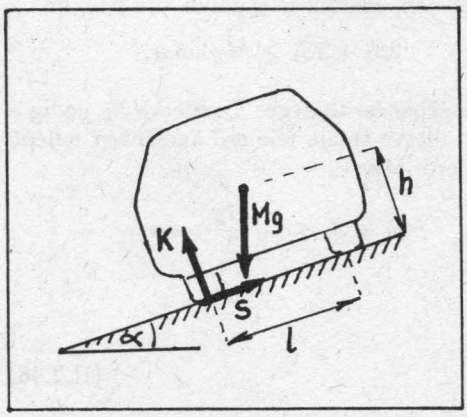
Beírva S és K maximális értékét:

$$\mu_0 Kh \geq K\frac{c}{2},$$

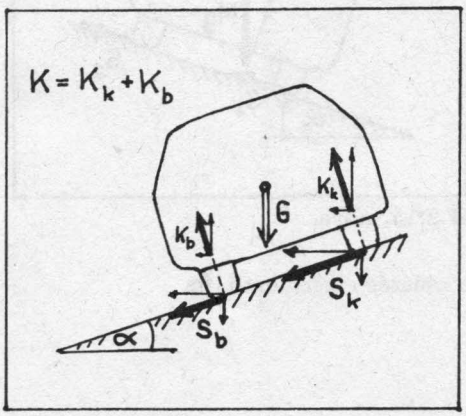
amiből

$$\mu_0 \geq \frac{c}{2h}. \tag{II.2.48}$$

Mivel a biztonsági előírásoknak megfelelően az autó legfeljebb lecsúszhat, de nem borulhat fel a döntött úttesten, szükséges az, hogy $\frac{c}{2h} < \mathrm{tg}\alpha$ teljesüljön.



II.2.16. ábra



II.2.17. ábra

Térjünk át most a döntött pályán mozgó jármű biztonságos vezetésének feltételeire. Határozzuk meg először azt, hogy mekkora maximális sebességgel vehetjük az R sugarú kanyart, ha adott μ_0 és α. A II.2.17. ábra alapján bontsuk vízszintes és függőleges összetevőkre a járműre ható erőket, és írjuk fel a mozgásegyenleteket. Vízszintes irányban az erők eredőjének a centripetális erőt kell adni, azaz

$$K \sin\alpha + 2(S_b + S_k)\cos\alpha = M\frac{v^2}{R}.$$

Függőleges irányban az erők eredője zérus, tehát

$$K\cos\alpha = Mg + 2(S_b + S_k)\sin\alpha.$$

Határesetben a súrlódási erőt maximálisan kihasználjuk, ezért

$$2(S_b + S_k) = \mu_0 K.$$

Az egyenletrendszer megoldásaként a maximális sebesség

$$v_{max} = \sqrt{Rg\frac{\sin\alpha + \mu_0\cos\alpha}{\cos\alpha - \mu_0\sin\alpha}}. \qquad \text{(II.2.49)}$$

Határozzuk meg most a kifelé borulás feltételét is. Ekkor a teljes kényszererő és így a súrlódási erő is a külső kerekeken hat. Az előbb használt egyenletrendszerben $K_b = 0$, $S_b = 0$, $K = 2K_k$, azaz

$$2K_k\sin\alpha + 2S_k\cos\alpha = M\frac{v^2}{r}$$

$$2K_k\cos\alpha = Mg + 2S_k\sin\alpha$$

egyenletrendszerből indulhatunk ki, azonban a súrlódási erő maximumára vonatkozó feltételt a még éppen kiegyensúlyozott forgatónyomatékra vonatkozó

$$K\frac{c}{2} = S\cdot h$$

feltétellel kell helyettesítenünk. Az egyenletrendszer megoldásából

$$v_{\max} = \sqrt{Rg\frac{\sin\alpha + \frac{c}{2h}\cos\alpha}{\cos\alpha - \frac{c}{2h}\sin\alpha}} \qquad \text{(II.2.50)}$$

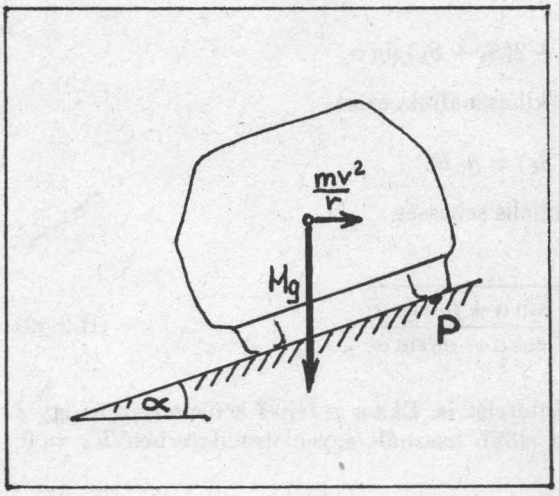
adódik. A kicsúszás (II.2.49) és felborulás (II.2.50) feltételét összehasonlítva azt kapjuk, hogy ha

$$\mu_0 < \frac{c}{2h}, \qquad \text{(II.2.51)}$$

akkor a kocsi kicsúszik, egyébként pedig felborul, ha túlságosan nagy sebességgel haladunk.

A már felhasznált gépkocsimodell esetén a feltétel teljesül, hiszen

$$\mu_0 = 0,9\frac{c}{2h} = \frac{0,6}{4,8} = 125$$



II.2.18. ábra

A borulás feltétele egyszerűbben meghatározható, ha a járműhöz rögzített, gyorsuló koordinátarendszert használunk. Ekkor a II.2.18. ábra jelöléseivel az $m\frac{v^2}{R}$ centrifugális erő és az Mg nehézségi erő nyomatékának egyensúlyát kell felírnunk a P pontra. Megoldásként természetesen ismét a (II.2.50) összefüggés adódik. Ez utóbbi gondolatmenet alapján azonban már a feladat megfogalmazásakor jól látszik, hogy a borulási szög független a súrlódási együtthatótól. Ha μ_0 elég nagy, akkor a sebesség növekedtével az autó felborul, ha μ_0 kicsi, akkor kicsúszik.

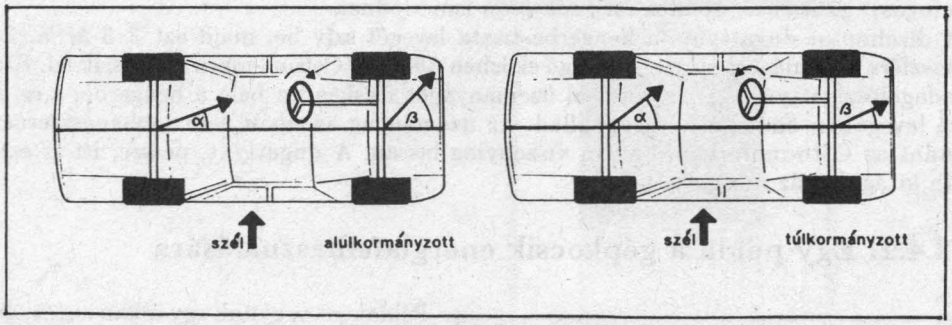
Megjegyezzük még, hogy a centrifugális erő támadáspontja nem pontosan a tömegközéppontban van. A nagy kanyarodási sugár és az ehhez képest kicsiny gépkocsiméretek miatt azonban ez a pontatlanság nem okoz nagy hibát.

II.2.3.2. Alul- és túlkormányzott gépkocsik

A gépkocsi mozgását még nagyon sok körülmény módosíthatja. Nézzük közülük még meg az oldalszél hatását. Minden autós tapasztalta már, hogy a nagy sebességgel haladó kocsit az oldalszél igyekszik lesodorni az útról. Nagyon nagy, *150-200 km/h* sebességgel haladva az oldalirányú széllökés hatására a kocsi meg is csúszhat. Ez a legveszélyesebb dolog, ilyenkor már az út enyhe lejtése miatt is az árokba csúszhatunk. Ez azért következhet be, mert a súrlódási erők nem merev kerekeken, hanem rugalmas gumiabroncson keresztül tevődnek át a gépkocsira, s mert a gumiabroncs oldalirányú erőket csak akkor közvetíthet, ha közben a haladási iránya is megváltozik. A kocsi a gördülő kerekek forgási síkjának megváltoztatása nélkül, mondhatnánk, „oldalazva" halad tovább.

A gépkocsi kúszó mozgása ellenkormányzással javítható ki. Hogy ez hogyan, milyen kormánymozdulatokkal mehet végbe, az a kocsi kormányzásának a „típusától" függ. Ha az első és a hátsó kerekek oldalkúszása azonos mértékű, a kúszás a szél irányával ellentétes irányú kormányzással szüntethető meg. Az ilyen — úgynevezett semlegesen kormányozható — autó a széliránnyal csaknem szembe állítva a szél által kifejtett oldalnyomóerő hatására továbbra is egyenes pályán mozog, hossztengelye azonban nem esik egybe a haladás

irányával. Az úgynevezett alulkormányzott autók első kerekeinek az oldalkúszása nagyobb, mint a hátsóké (II.2.19. ábra). Ezért ezeket — a semlegesen kormányzott kocsikhoz képest — erősebben kell a szél ellen fordítani. Végül az úgynevezett túlkormányzott autóra az a jellemző, hogy a hátsó kerekei jobban, nagyobb mértékben kúsznak, mint az elsők. Az ilyen kocsit ahhoz, hogy az oldalirányú mozgás megszűnjön, csak kevéssé kell a szél irányába kormányozni.



II.2.19. ábra

Az oldalszélben követendő kormányzás a valóságban ennél sokkal bonyolultabb dolog. Ez ugyanis nemcsak a kocsi felépítésétől, hanem a gumiabroncsok szerkezetétől, állapotától és nyomásától is függ. Például egy szokványos körülmények között alulkormányzott autó — mondjuk egy Trabant — azonnal túlkormányzottá válik, ha első kerekei sokkal keményebbek, mint a hátsók.

A gépkocsi kormányzottsági tulajdonságai a kanyarban is befolyásolják a kormányzást. A részletes vizsgálatok azt mutatják, hogy a kúszási szög a sebesség növekedésével nő. Pl. egy alulkormányzott jármű azonos íven haladásához növekvő sebességnél egyre nagyobb kormányzási szög szükséges, mert az első kerekek egyre jobban kúsznak.

A biztonságtechnikai elemzések és kísérletek szerint egy átlagos vezető 5–6°-os kúszásig tudja uralni járművét, mert e fölött a kormányzás esetleg a szokásossal éppen ellentétes mozdulatokat igényel. A kérdés igen bonyolult, ezért további taglalásától eltekintünk.

II.2.4. Hová lesz a benzin? Az autózás energetikája

A hetvenes évekbeli olajárrobbanás megszüntette azt az idilli állapotot, amikor az autó üzemeltetése — az üzemanyag megvásárlása — nem okozott különösebb gondot. Jelenleg — ha egy gépkocsi élettartamát csupán 100 000 km-re becsüljük is — egy közepes teljesítményű autóban elégetett üzemanyagnak a költsége megközelítheti az új autó árát.

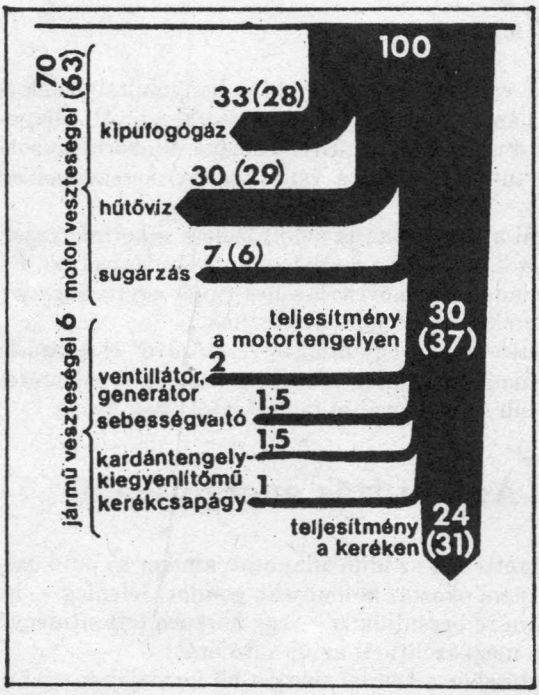
A gépkocsimotorban az üzemanyag elégetésekor a kémiai energia hő formájában szabadul fel. A motor ezt a hőt hasznosítja, alakítja át mechanikai munkává. De vajon milyen eredménnyel?

Mind a benzinüzemű Otto-, mind pedig az olajjal működő dízelmotornak a hengereiben szétporlasztott és levegővel kevert üzemanyagot égetünk el. A jármű a dugattyú mozgását hasznosítja; ennek az egyenes vonalú mozgását a forgattyús hajtómű alakítja át forgó mozgássá. A négyütemű Otto-motornak a hengerébe a benzinnek és a levegőnek a keveréke a szívószelepen keresztül jut bele, az égésgázok pedig a kipufogószelepen át távoznak belőle.

Az első ütemben a dugattyú a hengerben lefelé mozog, s a nyitott szívószelepen keresztül gázkeveréket szív be (szívás). A második ütemben a szelepek zárva vannak, a dugattyú fölfelé mozog, s a keveréket mintegy *0,8–0,9 MPa* (*8–9* atmoszféra) nyomásúra sűríti (sűrítés). A harmadik ütem elején a gyújtógyertyán keletkező szikra felrobbantja az üzemanyagot, s a robbanás a dugattyút lefelé löki. A motor ebben az ütemben munkát végez (munkaütem). Amikor a dugattyú az alsó holtpontra ér, kinyílik a kipufogószelep, s ezen keresztül az immár fölfelé mozgó dugattyú kiszorítja a hengerből az égésterméket (negyedik ütem: kipufogás). Ezután az ütemek folyamatosan ismétlődnek.

A dízelmotor dugattyúja a hengerbe tiszta levegőt szív be, majd azt *3–5 MPa* (*30–50* atmoszféra) nyomásúra sűríti. A levegő eközben *500–700* Celsius-fokra melegszik fel. Ezután az adagolószivattyú nagy nyomással üzemanyagot fecskendez bele a hengerbe, s ez ott a forró levegőben önmagától meggyullad. Az üzemanyag azonban nem robbanásszerűen ég el, mint az Otto-motorban, hanem viszonylag lassan. A dugattyút, persze, itt is az égés során kitáguló gáz mozgatja lefelé.

II.2.4.1. Egy példa a gépkocsik energiafelhasználására



II.2.20. ábra

Példaként vegyünk egy olyan autót, amely *90 km/h* sebességgel haladva *7 l* benzint fogyaszt *100 km*-en (ilyen volt a Skoda 105-ös a gyári adatok szerint). Eszerint a motorban egy óra alatt *6,31 l* benzin ég el, s eközben belőle $2,1 \cdot 10^8$ *joule* energia szabadul fel (a benzin égéshője $4,7 \cdot 10^7$ *J/kg*, a sűrűsége körülbelül *0,7 kg/l*).

Mi lesz ezzel az energiával? Gépkocsink — tegyük föl — vízszintes és egyenes aszfaltúton, szélcsendben és egyenletes sebességgel *(90 km/h)* halad. A motor ilyen körülmények között csak a gördülési ellenállás és a légellenállás ellenében végez munkát. A motor W_h hasznos munkája tehát a légellenállási erő W_k és a gördülő ellenállás W_s munkájából tevődik össze. A gördülési ellenállási erő: $S = fG$ (az f a gördülési ellenállási együttható — ez aszfaltúton körülbelül *0,015*; G a kocsi súlya, ezt vegyük *10 000 N*-nak).

A gördülési ellenállás ellen végzett munka: $W_s = S_s$ (az egy óra alatt megtett út, példánkban *90 km*). A légellenállási erő:

$$F = kA\varrho v^2,$$

ahol k az alaki tényező — ez személygépkocsi esetén jó közelítéssel *0,25*; A a példánkban szereplő gépkocsi homlokfelülete, körülbelül *1,9* m^2; $\varrho = 1,3$ kg/m^3 a levegő sűrűsége; v a jármű sebessége — példánkban: *90 km/h*. A légellenállási erő ellen végzett munka

$$W_k = Ks.$$

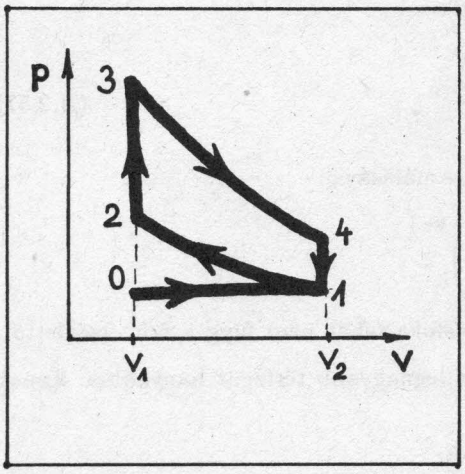
Az adatokat felhasználva adódik, hogy közepesen terhelt autónk egy óra alatt a gördülési ellenállás leküzdésére mintegy $1,35 \cdot 10^7$ joule energiát fordít, a légellenállási erő pedig kereken $3,5 \cdot 10^7$ joule energiát emészt föl. Az előrehaladáshoz tehát a *90 km*-es úton összesen $4,85 \cdot 10^7$ joule energiára van szükség. Ha ezt összehasonlítjuk a benzin elégetésekor felszabaduló energiával, kitűnik, hogy az üzemanyag energiájának mindössze *23* százaléka jelenik meg a „keréken", vagyis csak ez a része fordítódik a menetellenállások leküzdésére.

A motor ennél valamivel jobban hasznosítja az energiát, hiszen a hajtómű, illetőleg a sebességváltó fogaskereinek a csatlakozásaiban támadó súrlódást is le kell küzdenie. Ez az úgynevezett áttételi veszteség körülbelül *10* százalék. Ezt is számításba véve a motor munkája (a motor tengelyéről levehető és hasznosítható munka) kereken $5,4 \cdot 10^7$ *joule*. Ez az elégetett üzemanyag energiájának azonban még mindig csak a *26* százaléka!

Bár számításainkban bizonyos körülményeket figyelmen kívül hagytunk, eredményeink a valóságot jól tükrözik: a személyautók motorjában a benzin, illetőleg a dízelolaj kémiai energiájának — égéshőjének — többnyire csak a *30–37* százaléka hasznosul, alakul át mechanikai munkává. Az energia nagyobb része hő formájában elvész, tehát veszteség (II.2.20. ábra).

Mind ez ideig eszményi körülmények között — vízszintes és egyenes úton, s egyenletes sebességgel — autóztunk. A valóságban kanyarokkal és emelkedőkkel teletűzdelt utakon, a városokban pedig még a jelzőlámpák és közlekedési táblák miatt meg-megállva haladhatunk, s persze sok-sok jármű társaságában. A gyorsításhoz is energia kell (ez többnyire veszteséggé válik a fékezés során), az „üresen" működő motor is fogyaszt benzint és így tovább. Egyszóval: az elégett üzemanyagnak a városi forgalomban csak mintegy *15* százaléka hasznosul. Úgy tetszik tehát, hogy az energia hasznosításában jócskán van még tennivalónk!

II.2.4.2. A termodinamika második főtétele korlátot szab a hatásfok javításának



II.2.21. ábra

A műszaki fejlesztés lehetőségei jóval szerényebbek, mint gondolnánk. A hőerőgépeken a hőnek — a termodinamika II. főtétele szerint — elvileg is csak egy bizonyos hányada alakítható át munkává.

Tudjuk, hogy adott $T_1 > T_2$ hőmérsékleti határok között a felvett hőnek legfeljebb η-szorosa hasznosítható munkaként, ahol

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \qquad \text{(II.2.52)}$$

Ez a hatásfok azonban csak a Carnot-körfolyamattal érhető el, s az autók motorja az Otto-, illetve Diesel-körfolyamattal működik.

A II.2.21. ábra az Otto-motor működését mutatja. A 0–1 a szívásnak, az 1–2 a sűrítésnek, a 2–3 a robbanásnak, a 3–4 a munkavégzésnek; a 4–1 és az 1–0 pedig a kipufogásnak felel meg. Robbanáskor (2–3 szakasz) a hengerben a nyomás hirtelen megnő. Munkavégzéskor (3–4) a gázkeverék valójában hőleadás nélkül tágul. A kipufogószelep nyitásakor a nyomás gyorsan csökken (4–1 szakasz), majd az égéstermek állandó nyomás mellett távozik a hengerből (1–

0 szakasz). Ezután a folyamat ismétlődik. A dízelkörfolyamat ettől egyebek között abban különbözik, hogy a hengerben — majdnem állandó nyomáson — lassú égés megy végbe (2–3 szakasz).

Az Otto-körfolyamat hatásfoka a következő egyszerű számítással határozható meg. Definíció szerint

$$\eta = \frac{Q_{\text{felvett}} - Q_{\text{leadott}}}{Q_{\text{felvett}}}. \tag{II.5.53}$$

Az Otto-körfolyamatban a 2–3 szakaszon történik hőfelvétel, s a 4–1 szakaszon van hőleadás. A hatásfok tehát az

$$\eta = \frac{c_v(T_3 - T_2) - c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \cdot \frac{T_1}{T_2} \tag{II.2.54}$$

alakban fejezhető ki. Az adiabataegyenlet $TV^{\kappa-1}$ =*állandó* alakja szerint a 3–4 és 1–2 folyamatra felírhatók a

$$T_3 V_1^{\kappa-1} = T_4 V_2^{\kappa-1} \tag{II.2.55}$$

$$T_2 V_1^{\kappa-1} = T_1 V_2^{\kappa-1} \tag{II.2.56}$$

összefüggések. Az egyenleteket elosztva egymással

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \tag{II.2.57}$$

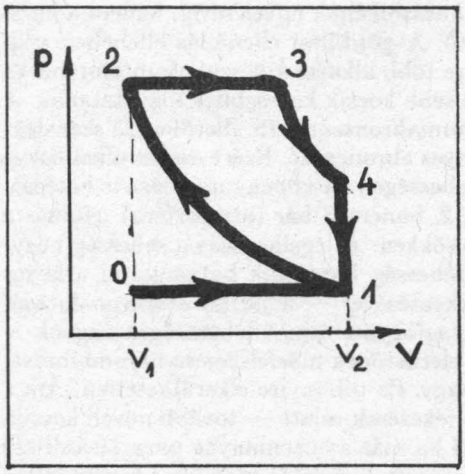
adódik, s így a hatásfok (II.2.54) és (II.2.56) felhasználásával

$$\eta = 1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1}$$

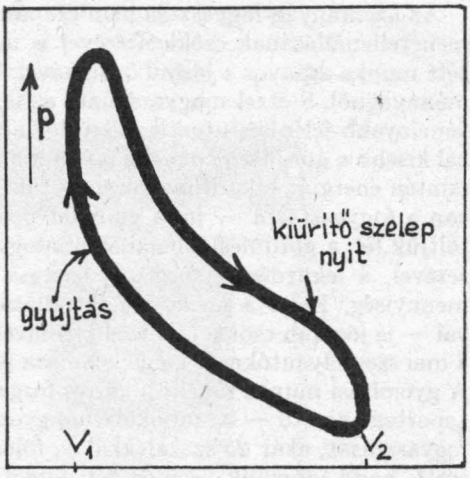
alakban is kifejezhető. Az Otto-körfolyamat hatásfoka tehát nem függ a hőmérséklettől. A $\frac{V_1}{V_2}$ arány a dugattyú által bezárt legkisebb és legnagyobb térfogat hányadosa. Ennek reciprokát $\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$ nevezzük kompresszióviszonynak.

A példaként említett autó kompresszióviszonya *8,5*. Ebből az adódik, hogy e motor lehető legnagyobb, azaz elvileg lehetséges hatásfoka *58* százalék.

A valóságos motornak a termikus hatásfoka ennél — említettük — mindenképpen kisebb: a valóságban az ideális körfolyamatokat nem tudjuk megvalósítani, több ok miatt



II.2.22. ábra



II.2.23. ábra

sem. Nézzük az Otto-motort! Ebben szíváskor a hengerbe beáramló levegő örvényleni kezd, s emiatt mozgási energiája elvész. A valóságos gép hengereiben a hűtés és a tömítetlenség miatt a sűrítés végén kisebb a nyomás, mint a tökéletes gépben. A tökéletes benzinmotor esetében föltettük, hogy az üzemanyag egy pillanat alatt elég. A valóságban ehhez hosszabb időre van szükség, ezért a diagramon az égési görbe (2–3 szakasz) nem párhuzamos a p tengellyel (II.2.22. ábra). A valóságban a kitágulás vonala (3–4 szakasz) is eltér az eszményitől, s a gázoknak a hengerből való eltávolítása is munkát igényel.

A valóságos motorokban méréssel veszik fel a $p - V$ diagramot. A II.2.23. ábra egy ilyen ún. indikátordiagramot mutat, amelyen jól látható az eszményi Otto-körfolyamat torzulása, ami a termikus hatásfokot általában *35–40%*-ra csökkenti. A motor hasznos munkáját tovább csökkentik az egymáson elmozduló alkatrészek között keletkező súrlódási veszteségek és a segédberendezések hajtásából származó teljesítményveszteségek.

II.2.4.3. Hogyan csökkenthető a fogyasztás?

Az autógyárak fejlesztőmérnökei és fizikusai arra törekednek, hogy a motor hatásfoka a lehető legjobban közelítse a tökéletes motor hatásfokát. A két érték közötti különbség — amint láttuk — tetemes, s ez főként a tökéletlen égésre vezethető vissza, vagyis arra, hogy az égéstérben az üzemanyag nem cserélődik ki teljesen, s hogy a motor részleges terhelésekor a benzin és a levegő keverékének aránya eltér a kívánatostól. Az ebből származó energiaveszteség akár *15* százalékot is kitehet. A motorfejlesztők e veszteségeket az üzemanyag és a levegő tökéletes keverésével (finomabb adagolásával) és — esetleg — több égéstér alkalmazásával kívánják csökkenteni. Ezekkel a megoldásokkal a motor hatásfoka főként a jármű részleges terhelésekor javítható. (A tökéletesebb égést megvalósító — úgynevezett réteges feltöltésű — motor fejlesztésén több országban is dolgoznak.) A részleges terheléshez tartozó hatásfok a motor vezérlésének a módosításával is javítható. Ez utóbbira irányul egyebek között az elektronikus gyújtás és az üzemanyag adagolásának meg a fékerőnek az elektronikus szabályozása. Javítható a benzinmotornak a hatásfoka a sűrítési viszony (a kompresszióviszony) növelésével is, ennek azonban határt szab az üzemanyag öngyulladása.

Az üzemanyag-fogyasztás nem csupán a motor hatásfokának növelésével, hanem a kocsi menetellenállásának csökkentésével is mérsékelhető. A gördülési ellenállás ellenében végzett munka arányos a jármű önsúlyával. Ezért egyre több alkatrész készül alumíniumból és műanyagból. S ezzel magyarázható az is, hogy a kisebb kocsik kevesebbet fogyasztanak. A keményebb felépítésű textil-, illetőleg acélradiál gumiabroncsnak *15*, illetőleg *25* százalékkal kisebb a gördülési ellenállása, mint a hagyományos abroncsoké. Ezért ezeket alkalmazva szintén energiát takaríthatunk meg, főként nagy sebességen. A köpeny nyomása is hatással van a fogyasztásra — ha a gumikat például nem *2*, hanem *3 bar* (atmoszféra) nyomásra töltjük fel, a gördülési ellenállás mintegy a felére csökken. A légellenállás a sebesség négyzetével, a leküzdésére fordított energia pedig a sebesség harmadik hatványával arányos mennyiség. Ezért a jármű légellenállásnak a csökkentésével — a jármű áramvonalazásával — is jócskán csökkenthető a járművek üzemanyagfogyasztása. A lehetőségek nagyok — a mai személyautóknak a légellenállása ugyanis az elérhetőnek másfélszerese-háromszorosa. A gyorsítási munka főként a városi forgalomban nagy. Ez többnyire elkerülhetetlen. Ám a „sportos" vezető — az indokolatlan gyorsítások és fékezések miatt — tovább növeli kocsija fogyasztását, akár *25* százalékkal is, fölöslegesen. S ha már az üzemanyag pazarlásáról szó esett, hadd idézzünk fel még két dolgot: a porlasztás és a gyújtás időszakos beállításával *5–10*, a gyári előírásnak megfelelő nyomáson tartott abroncsokkal pedig további néhány százaléknyi üzemanyag takarítható meg.

Azt, hogy mindez milyen eredményt hozhat, bizonyítják a japán kisautók: ezek *90 km/h* sebességen óránként *3,5–4 l* benzint fogyasztanak, s a benzin energiatartalmának — eszményi körülmények között — *40–45* százalékát hasznosítják, alakítják át mechanikai munkává.