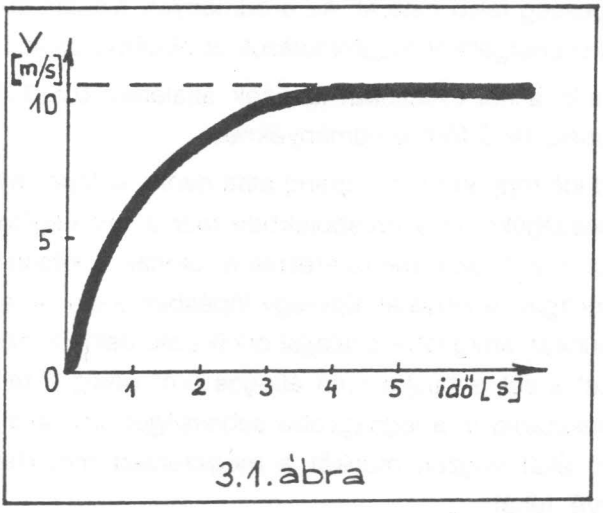
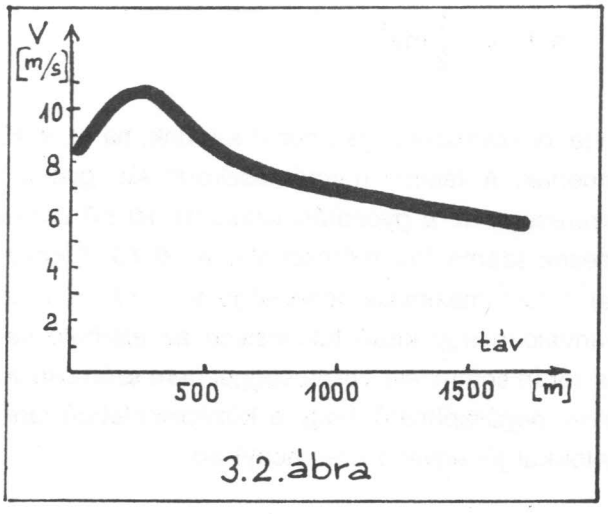
gel. Méréseket végzett arra vonatkozóan, hogy hogyan változik a versenyzők sebessége az idő függvényében. A 3.1. ábra grafikonja mutatja, hogy a futó sebessége eleinte gyorsan, majd egyre kevésbé nő, s néhány másodperc alatt eléri a legnagyobb értéket. *Hill* szerint a versenyző az első két másodperc alatt legnagyobb sebességének a *90* százalékára gyorsul fel, s újabb két másodperc múlva eléri a végsebesség *99* százalékát. A mai modern méréstechnika igazolja Hill eredményeit: a spportoló nem tudja korlátlanul fokozni a sebességét, a gyorsulás a rajtot követő néhány másodpercre korlátozódik.



3.1. ábra

A rövidtávfutók – azaz a „sprinterek" – a legnagyobb sebességüket szinte a táv végéig megtartják. A hosszabb távokon a sportolóra jellemző legnagyobb sebesség nem tartható, a táv növekedésével a futók átlagos sebessége a 3.2. ábra grafikonja szerint csökken. Alábbi táblázatunk a különböző hosszúságú futószámok átlagsebességeit tünteti föl. Az adatokhoz az 1957., 1982. és 1989. évi világcsúcsokat vettük alapul. A táblázat a 3.2 ábrával összhangban bi-



3.2. ábra

zonyítja, hogy a futási távolság növekedésével az átlagsebesség csökken, egyszersmint érzékelteti, hogy negyedszázad alatt mennyit javultak az eredmények. Érdemes megfigyelni, hogy a hosszabb távokon sokkal nagyobb a javulás, mint a rövideken. A táblázatban közölt adatok, vagy akár a legújabb világversenyek azt mutatják, hogy a rövidtávfutásban az eredmények látványos javulására már nemigen számíthatunk. A versenyzők, úgy tetszik, megközelítették a futási sebesség felső határát. Az eredmények alapján levont következtetést egyszerű energetikai megfontolások is alátámasztják.

Összehasonlításul közöltük a női csúcsokat is. Ezek általában *0,5-0,7 m/s*-mal gyengébbek a hasonló távú férfi eredményeknél.

Mint láttuk, a futók rövid idő (egy-két másodperc) alatt nyolc-tíz lépésnyi úton elérik legnagyobb sebességüket, s a továbbiakban már a táv végéig ezt tartják. Ezen a kezdeti úton kell tehát megszereznie a futónak a későbbiek során állandóvá váló mozgási energiáját. Egy-egy lépésben azonban a futó csak addig végezhet munkát, amíg lába a talajjal érintkezik. Jelöljük ezt a lépésenkénti „lökethosszat" *s*-sel, a talajra ható átlagos erőt pedig *F*-fel. Ha a gyorsítási szakasz lépésszáma *n*, a legnagyobb sebességet úgy határozhatjuk meg, hogy a futó által végzett munkát a megszerzett mozgási energiával tesszük egyenlővé, tehát

$$n \cdot F \cdot s = \frac{1}{2} mv^2$$

Az összefüggés segítségével számszerű eredményt kapunk, ha az *s, F, n* mennyiségek értékeit ismerjük. A talajon megtámaszkodó láb gyorsító erejét a futó súlyának kétszeresére, az *s* gyorsítási szakaszt *40-50 cm*-re becsülhetjük. A gyorsító lépések száma *Hill* mérései alapján *8-10*. E közelítő adatok felhasználásával a futó maximális sebessége *v = 11-14 m/s*. Eredményünk persze nyilvánvalóan egy kissé túlbecslése az elérhető sebességnek, mert a számítás során semmiféle veszteséggel nem számoltunk. Mindezek figyelembevételével megállapítható, hogy a középiskolában tanított munkatétel a tapasztalatokkal jól egyező eredményt ad.

Táv	Férfiak (1982)				Férfiak (1957)			
	idő			sebesség	idő			sebesség
méter	óra	perc	s.	m/s	óra	perc	s.	m/s
100			9,955	10,05			10,1	9,90
200			19,725	10,14			20,0	10,00
400			43,865	9,12			45,2	8,85
800		1	41,72	7,86		1	45,7	7,57
1.000		2	12,18	7,56		2	19,0	7,19
1.500		3	31,36	7,10		3	40,8	6,79
2.000		4	51,40	6,86		5	02,2	6,62
3.000		7	32,10	6,63		7	52,8	6,35
5.000		13	06,20	6,36		13	40,6	6,09
10.000		27	22,47	6,08		28	30,4	5,84
20.000		57	24,20	5,81		59	51,7	5,56
25.000	1	13	55,80	5,64	1	16	36,4	5,43
30.000	1	29	18,80	5,59	1	35	01,0	5,26
maratoni (42.195 m)	2	08	13,00	5,48	2	17	39,4	5,11

Táv	Férfiak (1989)				Nők (1982)			
	idő			sebesség	idő			sebesség
méter	óra	perc	s.	m/s	óra	perc	s.	m/s
100			9,83	10,17			10,87	9,20
200			19,72	10,14			21,71	9,21
400			43,29	9,24			48,60	8,23
800		1	41,73	7,86		1	53,42	7,05
1.000			–	–			–	–
1.500		3	29,46	7,16		3	52,47	6,45
2.000			–	–			–	–
3.000			–	–		8	26,78	5,91
5.000		12	58,39	6,42		15	00,42	5,55
10.000		27	08,23	6,14		31	35,30	5,28
20.000			–	–			–	–
25.000			–	–			–	–
30.000			–	–			–	–
maratoni (42.195 m)	2	6	50,00	5,52	2	25	28	4,83

Hasonló eredményre jutott *Herbert Lin* amerikai fizikus is. Ő a futás egyenletes szakaszának vizsgálatával becsülte meg az elérhető legnagyobb sebességet. Gondolatmenete szerint: ahogyan a futó sebessége nő, a lábizmok munkájának egyre nagyobb részét maguknak a lábaknak szakaszosan ismétlődő gyorsítására kell felhasználni. Futás közben ugyanis a lábak periódikusan lassulnak és gyorsulnak, hiszen a talajon támaszkodó lábfej sebessége mindig nulla, s ahhoz, hogy a láb is elérje a test sebességét, gyorsulnia kell. Minthogy a lábak tömege számottevő (a statisztikai átlag szerint a test teljes tömegének egynyolcad része), az egyre ismétlődő gyorsítások számottevő energiát emésztenek föl. A futó akkor éri el a maximális sebességet, ha a teljes izommunkáját a lábainak mozgatása emészti föl. Egyetlen lépést vizsgálva tehát

$$F \cdot s = \frac{1}{2}\frac{m}{8}v^2$$

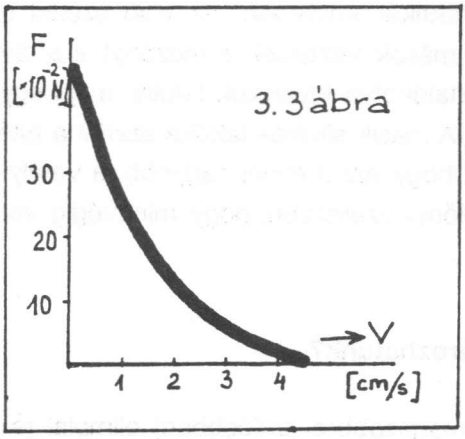
Itt is alkalmazva az $F \sim 2\ mg$, továbbá $s \sim 0{,}5\ m$ becslést az elérhető sebesség

$$v \sim 12\ m/s$$

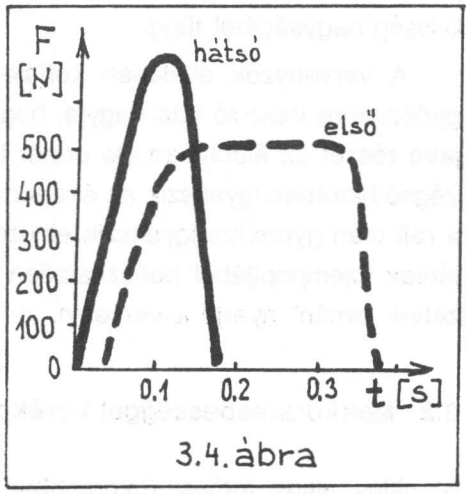
adódik.

A fentiek alapján egyszerűen magyarázható a 3.1. ábrán bemutatott mérési grafikon is. Tegyük fel, hogy a sportoló végig egyenletesen a legnagyobb teljesítményt nyújtja. Kezdetben a befektetett munka java része a test gyorsítására fordítódik, a lábak gyorsítása alig emészt föl energiát. A sebesség növekedésével ez az arány fokozatosan megfordul, s a tapasztalatnak megfelelően a futók az első nyolc-tíz lépés után már nem gyorsulnak tovább, s a teljes izommunkájukat a lábuk szakaszos gyorsítása emészti föl. A munkatételre alapozott fenti becslésekkel adódó eredmények jól közelítik a mai, világcsúcsot ostromló rövidtávfutók futási sebességét, de kérdés, hogy mennyire jelentik az emberi teljesítőképesség felső határát. A számításainkban használt adatok közül az *s* lökethossz és a láb tömege az ember alkati sajátságaitól függ. Értékük személyenként változhat kissé, de

ez az ingadozás biztosan nem kérdőjelezheti meg eredményünket. A láb izomerejének behatárolása jóval kritikusabbnak tűnik, hiszen a súlyemelők testsúlyukat többszörösen meghaladó terheket emelve állnak fel guggolásból. Ez azonban csak látszólag áll ellentmondásban a fentebb alkalmazott közelítéssel. Lényeges különbség van ugyanis az izmok sztatikus és dinamikus erőkifejtése között. A súlyemelésre a sztatikus erőkifejtés jellemző. (Ilyenkor az izomrostok döntő többsége egyszerre feszül meg.) A sztatikus erőkifejtés szélső esete az izmok tetanuszos görcse, amikor valamennyi rost maximálisan megfeszül. A gyors mozgások során az izmok igénybevétele is gyorsan változik, az izmok megfeszülnek, majd néhány tizedmásodperc erőkifejtés után elernyednek, hogy újabb pár pillanat múlva ismét összehúzódjanak. Ilyen körülmények közt az izomköteg rostjainak mindig csak egy része dolgozik, érthető tehát, ha gyors mozgások során kifejtett erő kisebb, mint a sztatikus terhelés esetén kifejthető. A maximális izomerő változását a sebesség függvényében az ún. *Hill*-féle görbe tünteti fel. A sematikus grafikont a 3.3. ábra mutatja. A futás energetikai vizsgálata során alkalmazott erő-becslés helyességét konkrét mérések is igazolják. A 3.4. ábrán bemutatott grafikon egy elrugaszkodó versenyző lába által kifejtett erőt mutatja az



3.3 ábra



3.4. ábra

idő függvényében. Az erőmérőket a térdelőrajtot segítő lábtámaszokban helyezték el.

Az eddigiekben mondottak csak a rövidtávfutók erőkifejtésére és teljesítményére érvényesek. A hosszútávfutás pillanatnyi eredményei, távlati lehetőségei nem értékelhetők a biomechanika viszonylag egyszerű módszereivel. Ezek a futószámok nem annyira robbanékonyságot és nagy erőkifejtést, hanem inkább szívós kitartást, állóképességet és az energiatartalékokkal való jó gazdálkodást kívánnak. A mechanika törvényei mellett itt a jóval bonyolultabb fiziológiai törvényeknek, sőt a lélektani hatásoknak is nagy szerepük van.

A legfőbb különbségeket a kétféle versenyzőtípus jellemző testfelépítése is elárulja. A rövidtávfutók hatalmas izomzatú (a legnagyobb erőkifejtés az izomköteggel arányos) robusztus atléták, a hosszútávfutók ellenben szikár, inas emberek.

A hosszútávú versenyzők a rajtot követő gyorsítási szakasz után hosszan tartható egyenletes sebességre törekednek (ez szükségképpen sokkal kisebb, mint a rövidtávfutók által elért legnagyobb futási sebesség), majd, ha erőtartalékaik még megengedik, egy végső „hajrában" megpróbálják fokozni sebességüket. A győzelem elsősorban a tartósan egyenletes sebesség nagyságától függ.

A versenyzők általában kétféle taktikát követnek. Az első szerint a győzelemre készülő futó hagyja, hogy mások vezessék a mezőnyt, s a táv java részét az élbolyban, de erejét tartalékolva igyekszik lefutni, majd egy végső hajrában igyekszik az élre törni. A másik sikeres taktika szerint a futó a rajt után gyorsítva igyekszik elhúzni, hogy ezzel minél nagyobb, a vetélytársak szempontjából behozhatatlan előnyt szerezzen, hogy mindvégig vezetve „simán" nyerje a versenyt.

3.2. Mekkora sebességgel kerékpározhatunk?

A „citius, altius, fortius" (gyorsabban, magasabbra, erősebben) olimpiai jelmondat jegyében a kerékpározásban is a lehető legnagyobb sebesség el-

érése és hosszabb idejű megtartása kell a jó eredményekhez. A csúcsok ebben a sportban is egyre javulnak. A hosszabb távon is tartható maximális sebességet Francesco Moser érte el élete utolsó versenyén, 1988 májusában. A kiváló versenyző egy óra alatt *50.644* métert és *65* centimétert tett meg, miközben a *20* kilométeres távon is világrekordot javított *23* perc, *41,71* másodperces idővel. Igen érdekes, hogy az egyórás kerékpározás és az első húsz kilométeres táv átlagsebessége századmásodpercre egyezően *14,08 m/s* volt. Ez arra utal, hogy futáshoz hasonlóan, a hosszú távú kerékpározásban is a teljes távot egy jól megválasztott állandó sebességgel érdemes megtenni.

Végezzünk néhány egyszerű becslést arra, hogy mennyi lehet a kerékpározás sebességének felső határa. Gondolatmenetünket arra alapozzuk, hogy a nagy sebességű mozgás miatt a kerékpáros teljesítménye a légellenállás ellen végzett munkára fordítódik. (A kerekeknél fellépő súrlódás elhanyagolható). Becsüljük meg először a versenyző maximális teljesítményét! E teljesítményre fogadjuk el a 100-as vágtázók gyorsítási teljesítményét.. Hill vizsgálatai megmutatták, hogy a sprinterek rövid idő (*1-2* másodperc) alatt éri el maximális sebességüket.

Tételezzük fel, hogy a sportoló teljesítménye ez alatt az idő alatt teljes mértékben a mozgási energia növelésére fordítódik. Ebben az esetben a keresett teljesítmény

$$P = \frac{1}{2}\frac{mv^2}{\Delta t}$$

ahol Δt a gyorsítás ideje, v az elért sebesség.

Térjünk át most a légellenállás teljesítményének meghatározására. A légellenállási erő ebben a sebességtartományban a sebesség négyzetével arányos és az

$$F = cA\rho v^2$$

alakban írható fel. Így a légellenállás teljesítménye a sebesség köbével arányos, és a

$$P = F \cdot v = cA\rho v^3$$

képletből számítható ki. A két teljesítményt egyelővé téve a kerékpározás sebességének felső határaként $v = 16\ m/s$ (azaz *57,6 km/ó*) adódik.

Annak ellenére, hogy a kapott eredmény csak kevéssel (mintegy *13* százalékkal) tér el *Moser* világcsúcsától, nem szabad elfelejtenünk, hogy becsléseink során gyakran durva közelítéseket alkalmaztunk, s ezek alapvetően meghamisíthatják a végeredmény számértékét. Ezért a közölt számításnak inkább csak a gondolatmenetét, s nem számszerű végeredményét érdemes komolyan venni.

3.3. Az ugrások felső határa

Az ugróversenyek múltja az ókorba nyúlik vissza. Nagyszerű eredményekről maradtak feljegyzések a görög olimpiákon a pentatlon keretében lebonyolított távolugróversenyekről. Eszerint a *krotóni Phaüllosz 16,94 m*-t, a spártai *Khionisz* pedig *16,1 m*-es eredményt ért el. Ezek az eredmények bizonyára több ugrás hosszának az összegét jelentik, de még egy modern hármasugróversenyen is jó teljesítménynek számítanának.

A magasugrást és a távolugrást a középkorban is rendszeren űzték, míg a hármas- és rúdugróversenyek valamivel később kezdődtek. A nagy ügyességet és gyorsaságot kívánó ugrószámok a modern olimpiákon 1896 óta, tehát kezdettől fogva szerepelnek. Az eredmények azóta rengeteget fejlődtek: magasugrásban az 1896-os olimpia győztese *181 cm*-t ugrott, míg 1976-ban a lengyel *Wszola 225 cm*-rel nyert. Távolugrásban pedig az első győztes *635 cm*-es eredményét *250 cm*-rel szárnyalta túl 1968-ban Mexikóban *Bob Beamon*. A *890 cm*-es „álomcsúcsot" korunk legnagyobb atlétája – *Lewis* – is csak megközelíteni tudta. (1991-ben a csúcsot *Powell 895 cm*-re javította.)

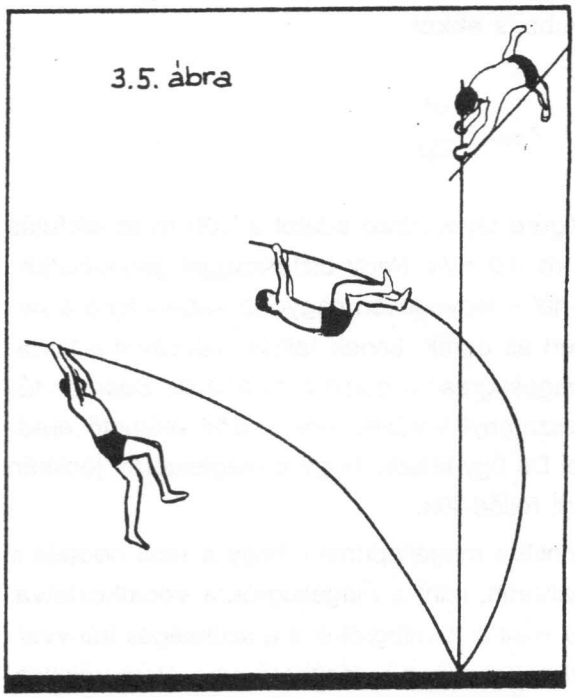
Általában a centiméterekért folyó harc is egyre nehezebb, s úgy látszik, hogy az ugróatléták hovatovább elérik az emberi teljesítőképesség felső határait. A következőkben ezt a határt próbáljuk megbecsülni elemi fizikai gondolatmenet segítségével. Az ugrások voltaképpen három szakaszra bonthatók: a lendületszerző nekifutásra, az elugrásra és a légmunkára. A légmunka során az ugró már csak csekély mértékben befolyásolhatja mozgását, súlypontja – mint az ellökött golyó vagy a meglőtt labda – parabola pályán mozog. Az elrugaszkodáskor az atléta a nekifutással megszerzett vízszintes irányú sebességét „konvertálja" az ugrásnak megfelelő irányú sebességgé. Tegyük fel, hogy ezt az irányváltozást a sportoló a fizika törvényei szerint a legcélszerűbb módon képes megvalósítani. Eszerint az ugrásokat egy adott kezdősebességgel (a nekifutás sebességével) indított ferde hajításként kezelhetjük. Becsüljük meg ennek alapján a magas- és a távolugrás fizikailag lehetséges maximumát. A ferde hajítás távolsága 45 fokos hajítási szög esetén a legnagyobb, s ekkor

$$x_{max} = \frac{v^2}{2g}$$

Az elrugaszkodás sebességére tájékoztató adatot a 100 m-es síkfutás világcsúcsából kaphatunk. Ez kb. *10 m/s*. Nagy biztonsággal gondolhatjuk, hogy ennél – tehát *10 m/sec*-nél – lényegesen nagyobb sebességre a nekifutás során sem tehetnek szert az ugrók. Ennek felhasználásával a távolugrás maximumára *10 m*, a magasugráséra pedig *5 m* adódik. Beamon távolugrási világcsúcsa ezt az eszményi körülmények között elérhető eredményt igencsak megközelítette! De úgy látszik, hogy a magasugrók jócskán lemaradtak ettől, s még van mit fejlődniük.

A kétféle ugrást összehasonlítva megállapítható, hogy a fenti becslés a távolugrókra vonatkoztatva reálisabb, mint a magasugrókra vonatkoztatva. A magasugrók rohama lassúbb, mint a távolugróké, s a szükséges irányváltoztatás is jóval nagyobb, ezért nehezebben valósítható meg. Nem véletlen, hogy a vágtázók között sokkal több a kiváló távolugró, mint a magasugró. Például *Jesse Owens* 1936-ban a 100 és a 200 m-es vágtaszámokon kívül

távolugrásban is olimpiai bajnokságot nyert. Ezt az eredményt *Lewis* 1984-ben megismételte, 1988-ban azonban 200 m-en már nem sikerült győznie. A becslés azonban a magasugrás szempontjából sem érdektelen. Rávilágított ugyanis arra, hogy itt az elrugaszkodás körülményei megnehezítik a rohammal szerzett sebességnek a függőlegesre való fordítását. Ha ezt a problémát akár valamilyen segédeszköznek – például egy rúdnak – a segítségével megoldjuk, akkor az *5 m*-es magasság átugrása egyszeriben elképzelhetővé válik. A rúdugrás világcsúcsa 1972-ben már *564 cm* volt. Az *5 m*-es felső határ túlszárnyalása itt annak volt köszönhető, hogy kifejlesztették a különlegesen rugalmas rudakat. Ezek segítségével a nekifutással szerzett mozgási energia nagyobb része tárolható a rúd hajlításával rugalmas energiaként, és a leszúráskor még tovább hajlítható rúd szinte katapultként löví ki a versenyzőt (3.5. ábra).



Az előzőekből már kitűnt, hogy az ugrás legfontosabb mozzanata az, amikor a sportoló elrugaszkodik a talajtól. Az elrugaszkodás rövid ideje alatt kell a vízszintes nekifutással szerzett lendületet az ugrónak – lehetőleg folyamatos és törés nélküli mozgással – megfelelő irányba fordítania. Az elugrás során a talajtól kifejtett $F \cdot \Delta t$ erőlökés hozza létre a sportoló impulzusváltozását (ΔI), ahol Δt az elrugaszkodás ideje. A mozgást tehát eredendően a dinamika

$$F\,\Delta t = \Delta I$$