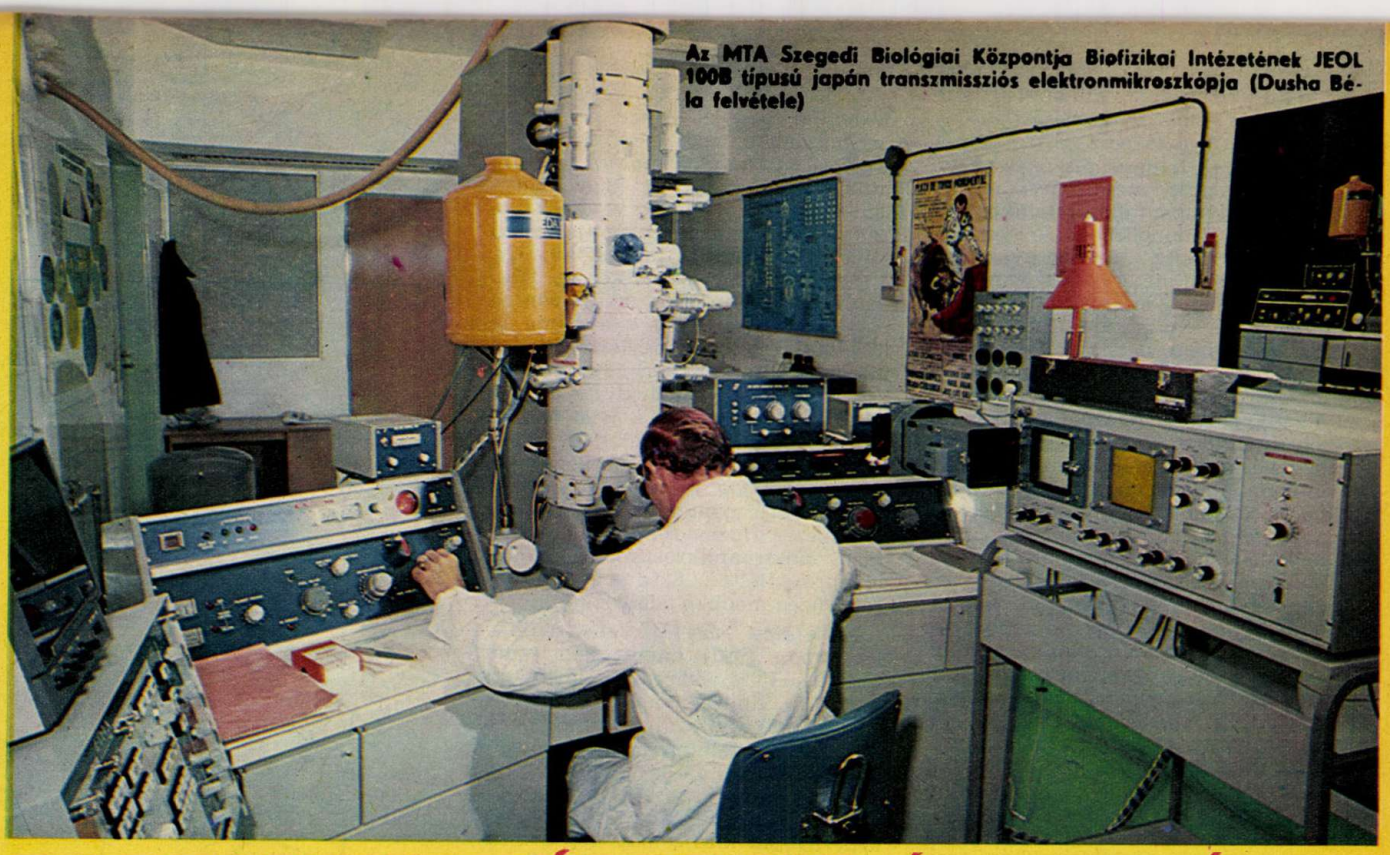


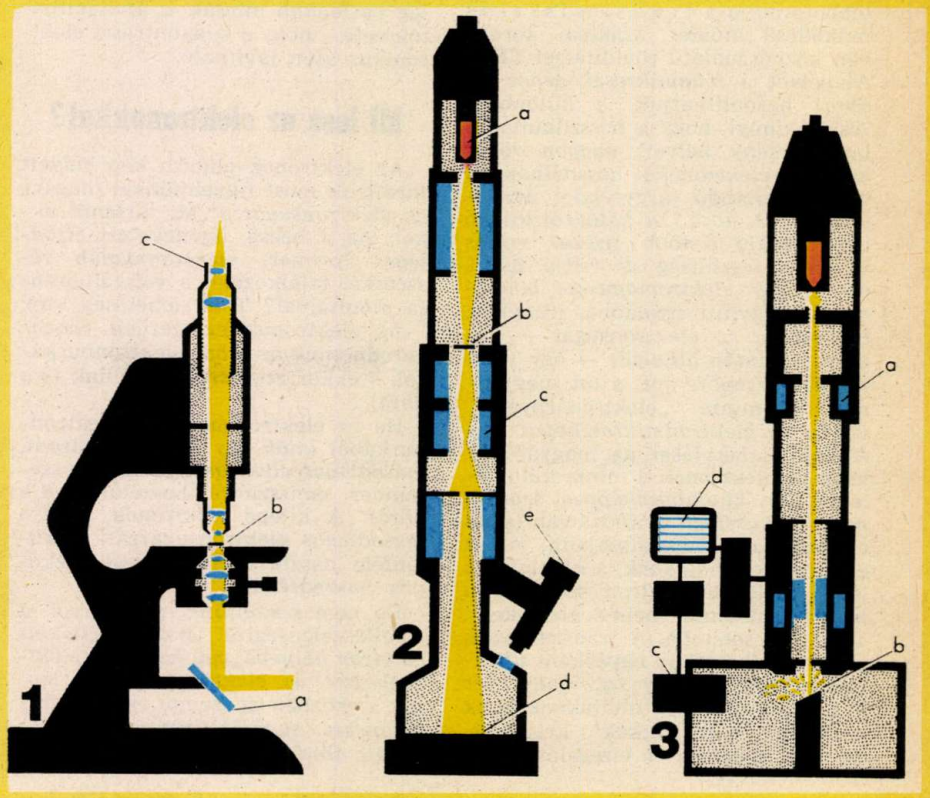
Az MTA Szegedi Biológiai Központja Biofizikai Intézetének JEOL 100B típusú japán transzmissziós elektronmikroszkópja (Dusha Béla felvétele)

AZ ANYAGVIZSGÁLAT EGY ÚJABB MÓDJA, A RÖNTGEN-MIKROELEMZÉS I.

1. ábra. Az optikai mikroszkóp elrendezése. Az a) tükör a b) mintára veti a fényt, amely ezt átvilágítva, majd a megfelelő optikai lencserendszeren áthaladva a c) pontban hozza létre a nagyított képet

2. ábra. Transzmissziós elektronmikroszkóp (TEM). Az a) pontban elhelyezett katódból kilépő elektronok kondenzorlencsék (megfelelő mágneses tekercsek) sorozatán áthaladva a b) mintára jutnak, „átvilágítják" azt, majd a c) mágneses lencserendszer a d) fluoreszkáló (világító) ernyőre vetíti őket. Ott jön létre a nagyított kép, s azt az okuláron e) át vizsgálhatjuk

3. ábra. A pásztázó elektronmikroszkóp (SEM). Itt az elektronsugarat először az a) kondenzor-lencserendszer igen szűk nyalábba gyűjti, majd ez végigpásztázik a b) mintán, mintegy letapogatja azt. Az innen visszavert (vagy a minta atomjaiból kilökött) elektronokat a c) elektronérzékelő gyűjti össze, s ennek jeleiből a d) képernyőn a letapogató sugárral szinkronban vezérelt elektronsugár nyomán jelenik meg a látható kép



Az anyagok mikroszkopikus szerkezetét különféle fény- és elektronmikroszkópos eljárásokkal vizsgáljuk. A mikroszkópban látható részletek azonban nemcsak *megjelenési formájukban*, hanem *összetételükben* is sokban különböznek egymástól. Minthogy pedig méretük gyakran a tízezred milliméter alatt van, összetételük meghatározásában a hagyományos analitikai (vegyelemzési) eljárások nem jöhetnek számításba.

Szükségünk van tehát egy olyan eljárásra, amely a mikroszkópban megfigyelhető parányi szerkezeti egységek *lokális* — helyi, kis térrészben végzett — elemzésére, lehetőleg minden kémiai elemnek a kimutatására és mérésére alkalmas, csekély anyagfelhasználással jár, roncsolás nélkül, gyoran és automatizálhatóan dolgozik. Célszerűen egy fény- vagy egy elektronmikroszkóppal kombinálható elemző módszer jöhet itt számításba, hiszen az elemzésre szánt részletet mikroszkóppal kell kiszemelnünk. Mindeme kívánalmaknak a *röntgen-mikroelemzés* vagy más néven *elektron-mikroszondás eljárás* felel meg legjobban.

Mielőtt rátérnénk az elektronmikroszondázás részletesebb magyarázatára, nézzük meg, hogy tulajdonképpen mi történik akkor, amikor a különféle *elektronoptikai berendezésekben* (ez a különféle elektronmikroszkópok összefoglaló elnevezése) az elektronsugár és a vizsgált minta anyaga kölcsönhatásba lép egymással.

Az elekronmikroszkóp fajtái

Az elektronmikroszkóp legelterjedtebb formája a transzmissziós működésű műszer, szakmai körökben közhasználatú rövidítéssel TEM. Alapelvét a *fénymikroszkópéhoz (1. ábra)* hasonlíthatjuk, a különbség „csak" annyi, hogy a hosszúhullámú látható fény helyett *nagyon rövid hullámú elektronokat* használnak fel a felnagyítandó tárgyrészlet átvilágítására *(2. ábra.) A katódról* kilépő elektronokat a több tízezer voltos villamos feszültség gyorsítja fel, s ezeket egy *elektromágneses lencserendszer* gyűjti nyalábba, irányítja, fókuszálja. Az elektronsugár — miután *a mintán áthaladt* — egy *fluoreszkáló ernyőre* jut, s ott megjelenik a minta „elektronárnyéka", vagyis az *elektronmikroszkópos kép.* A kép kialakulását az magyarázza, hogy az elektronok a minta különféle részein *különbözőképpen szóródnak:* ahol *csekély* szóródás van (a kis rendszámú elemek atomjain), ott az elektronok *áthaladnak,* a kép *világos* lesz. Ahol *sok* elektron szóródik (a nagy rendszámú, nehéz elemeken), ott a kép *sötétebb.* A transzmissziós elektronmikroszkóp egyébként *ultravékonyságú* (néhány száz vagy ezer Å; 1 μm = 10 000 Å) mintáknak (ezek metszetek, szénreplikák*, kristallitok* stb. lehetnek) a vizsgálatára alkalmas, mivel az elektronok — energiájuktól és a minta átlagos rendszámától függően — már néhány μm vastagságú anyagban elnyelődnek.

A pásztázó (scanning) elektronmikroszkóp (SEM) a hagyományos elektronmikroszkóptól egyebek között a képmegjelenítés módjában különbözik. A minta felületét az igen kicsi, alig 100 Å-ös átmérőre fókuszált elektron-sugárnyaláb *pontonként pásztázza végig,* s a minta felületén gerjesztett úgynevezett *másodlagos* (szekunder) *eletronokat* egy megfelelő detektor alakítja *elektromos jellé.* Ezt a jelet a pásztázó elektron-sugárnyalábbal *szinkronban futó katódsugár* a képernyőn *fénypontokként* jeleníti meg, így ott raszterszerű, pontokból összetett kép keletkezik. *Harmadik ábránk* a pásztázó elektronmikroszkóp működési elvét szemlélteti. Ez a műszer többféle üzemmódban dolgozhat.

A *felületi pásztázó elektronmikroszkópon* (SEI) kapott kép szinte térhatásúan, háromdimenziósként hat. Ez a típus ugyanis azt hasznosítja, hogy a vizsgált mintára beeső elektronok a felületre való merőleges beeséskor *sok,* ferde (döntött) beeséskor pedig *kevesebb* másodlagos elektront keltenek. Így a mikroszkóp képernyőjén kirajzolódó kép a minta felületének *domborzatára* (topográfiájára) lesz jellemző.

Ha pásztázó elektronmikroszkóppal *vékony* mintát vizsgálunk, az elektronok többsége — némi energiaveszteség árán — *áthalad* a mintán. Ha ezeket az átbocsátott elektronokat fogjuk fel, a hagyományos TEM-hez hasonlóan *transzmissziós pásztázó elektronmikroszkóp*os képet kapunk (STEM). Ennek az eljárásnak — egyebek között — az az előnye a hagyományoshoz képest, hogy némileg *vastagabb* minták is átvilágíthatók vele, s hogy a képkontraszt elektronikus úton javítható.

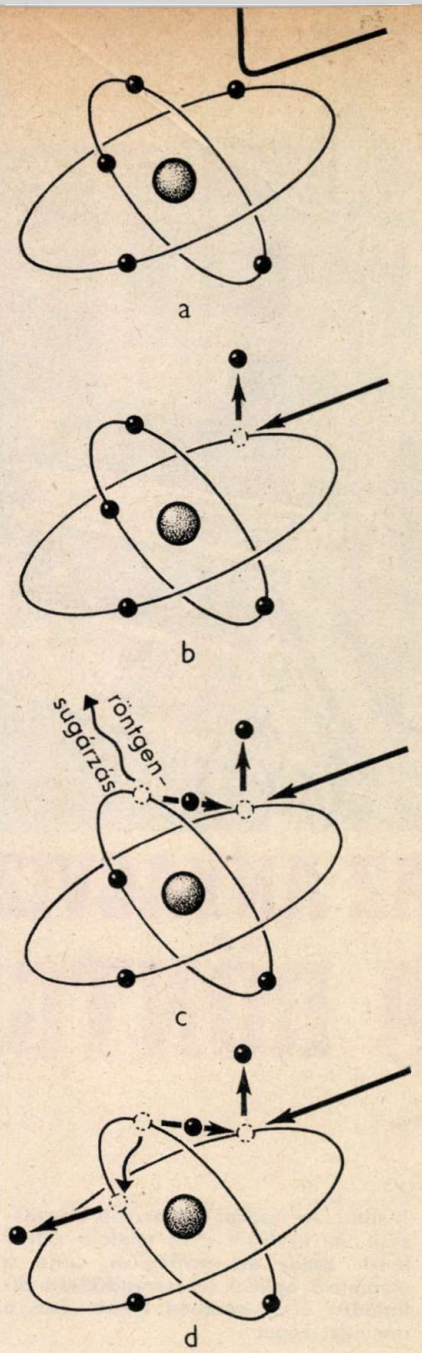
Mi lesz az elektronokkal?

Az elektronok alkotta kép helyett fordítsuk most figyelmünket magára az *elektronsugárra!* Mi történik akkor, ha a beeső úgynevezett *elsődleges* (primer) *elektronnyaláb* részecskéi találkoznak a vizsgált minta atomjaival? Több lehetőség van.

Az elektronok egyszerűen *visszaverődhetnek* az atom elektronburkáról, s ekkor *szórásról* beszélünk *(4/a ábra).*

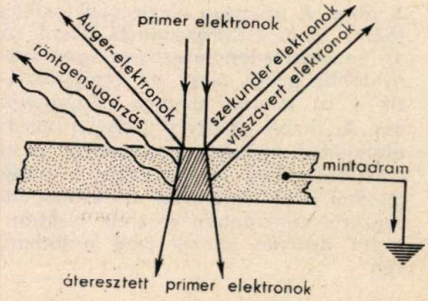
Ha az elektron az atom elektronburkából *kilök* egy *másik* elektront, *másodlagos elektronsugárzásról,* szekunder emisszióról beszélünk *(4/b ábra).* A kilépő elektronok alkotta másodlagos elektronsugárzást a különféle pásztázó elektronmikroszkópok hasznosítják.

De nem beszéltünk még arról a „mellékjelenségről", hogy a *kilökött elektron helyébe egy külsőbb elektronhéjról új elektronnak kell lépnie,* s eközben az atomot egy *elektromágneses sugárzáskvantum* hagyja el *(4/c ábra).* A *belső* elektronhéjak-



4. ábra. Az elektronok és az atomok közötti kölcsönhatás módjai: a) szórás, b) másodlagos (szekunder) elektronok kilökése, c) ugyanez röntgensugárzással, d) Auger-elektronok gerjesztése

5. ábra. Az elektronmikroszkópban az elektron és az anyag kölcsönhatása közben keletkező jelek



ról való kilökéskor (a belső héj „gerjesztésekor") ez *röntgensugár*, s ezt használja fel a röntgen-mikroelemzés.

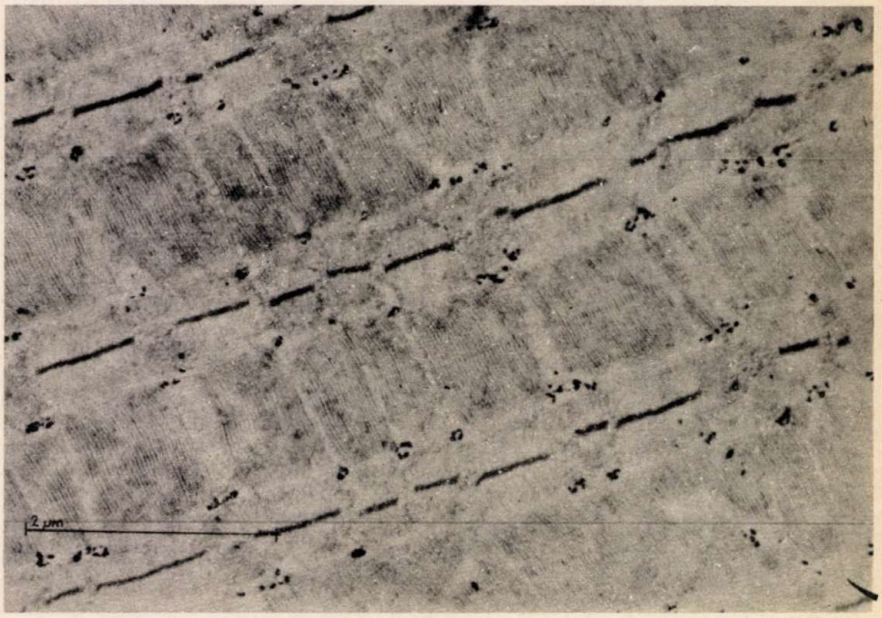
Ha röntgensugár nem hagyja el az atomot, hanem még az atomból való kilépése előtt kiüt egy másik elektront, az így kilépő elektronokat az előbbiektől megkülönböztetve *Auger-elektronnak* nevezzük *(4/d ábra)*.

Az elektron és az anyag kölcsönhatása során keletkezett különböző jelek (a visszaszórt, a másodlagos, az Auger-, a mintában elnyelt elektronok árama; lásd az *5. ábrát)* a pásztázó elektronmikroszkópban képalkotásra használhatók fel, illetve bizonyos információt szolgáltatnak a minta elemi összetételére vonatkozóan.

A minta atomjaival ütköző elektronok egy része röntgensugárzást gerjeszt, s ez teszi lehetővé az anyagvizsgálatnak ama módját — a már említett röntgen-mikroelemzést —, amelyről a továbbiakban részletesen beszélünk.

(Az itt említett és nem említett különféle elektronmikroszkópokat, a nemzetközi szakirodalomban használt rövidítéseiket és azok magyarázatát — amelyek rámutatnak a be-

Pásztázó elektronmikroszkóppal készült kép, mintegy 5000-szeres nagyításban. A felvételen egy radiolaria – tengeri egysejtű – váza látható



TEM-felvétel a szegedi berendezéssel. A beeső elektronsugár energiája körülbelül 80 kV. A képen egy harántcsíkolt izomszövetet látunk mintegy tízezerszeres nagyításban. A felvételen bejelöltük a valóságban egy mikronnak megfelelő távolságot (Dr. Dux Ernő felvétele)

ELEKTRONMIKROSZKÓP-FAJTÁK ÉS -ÜZEMMÓDOK

TEM: transmission electron microscope = áteresztő elektronmikroszkóp

SEM: scanning electron microscope = pásztázó elektronmikroszkóp

SEI: secondary electron image = másodlagos elektron-leképezés (felületi pásztázó elektronmikroszkópban)

BSEI: backscattered elctron image = visszaszórtelektron-leképezés (felületi pásztázó elektronmikroszkópban)

STEM: scanning transmission electron microscope = pásztázó áteresztő elektronmikroszkóp

ELEMZÉSI ELJÁRÁSOK

BEA: electron energy analyser = elektronenergia-elemző

AES: Auger electron spectroscopy = Auger-elektron-spektroszkópia

EDS: energy dispersive system = energiadiszperziv (energia szerint elemző) rendszer

WDS: wavelenght dispersive system = hullámhosszdiszperziv (hullámhossz szerint elemző) rendszer

rendezés mibenlétére, de amelyeknek nem mindig van magyar nyelvű megfelelőjük —, valamint az elemzés különféle módjait *táblázatunkban* ismertetjük.)

Az X-sugárzástól a röntgenszínképig

Foglaljuk össze röviden, hogy milyen fontos fölfedezések vezettek el az eljárás kifejlődéséig! 1895-ben Conrad *Röntgen* fölfedezte a később róla elnevezett láthatatlan sugárzást. (Maga Röntgen X-sugárzásnak keresztelte el a csodálatos jelenséget, s fölfedezéséért 1901-ben Nobel-díjat kapott.)

1913-ban egy fiatal angol fizikus, *Moseley* rájött arra, hogy a különféle elemek, ha röntgensugárzásra gerjesztik őket, mindig a *rájuk jellemző hullámhosszúságú* röntgensugárzást bocsátják ki. E sugarak *hullámhossza* és a sugárzást kibocsátó elem *rendszáma* között *fordított* arányú összefüggés van: minél nagyobb az elem rendszáma, tehát minél *nehezebb* elemről van szó, annál *rövidebb* a hullámhossz, viszont annál nagyobb a sugárzás *energiája*. E fölfedezés jóvoltából ezután az elemeket a röntgensugárzásukból is fölismerhették, vagyis *azonosíthatták* őket.

De miképp gerjeszthetők röntgensugárzásra az elemek? Röntgensugárzás akkor keletkezik, ha *nagy energiájú részecskék* (elektronok, protonok, ionok stb.) vagy *sugárzások* (röntgen-, gamma-, kozmikus sugárzás stb.) valamilyen — rendszerint szilárd állapotú — anyaggal *ütköznek*. Az elektronmikroszkópban általában 20—100 kilovoltra (1kV = 1000 V) felgyorsított *elektronokkal* bombázzák a leképezendő mintát, így az *elektron becsapódásának helyéről röntgensugárzás* indul ki. Ezt a jelenséget aknázta ki 1949-ben R. *Castaign* francia kutató. Ő egy elektronmikroszkóphoz *kristályos röntgenszínkép-elemzőt** csatlakoztatott, s a szilárd mintát 1 μm átmérőjű elektronsugár-nyalábbal „szondázta" (innen ered az elektron-mikroszonda elnevezés), vagyis *mérte az elektron becsapódása nyomán keletkező röntgenspektrumot.*

Az ötletet ugyan már egy 1947-ből eredő amerikai szabadalmi leírásban *(Hillier)* is olvashatjuk, de akkor még nem valósíthatták meg, ezért az eljárás meglétét Castaign munkásságától számítjuk. 1953-ban Castaigntól függetlenül két szovjet kutató *(Borovszkij* és *Ridnik)* is megszerkesztette a maga röntgen-mikroelemzésre szolgáló készülékét. Mindkét berendezésben egy néhány μm átmérőre fókuszált elektronsugárnyalábot használtak a röntgensugárzás gerjesztésére, s a vizsgált térfogat nagysága (amely a gerjesztő sugár átmérőjétől függ) 10^{-8} — 10^{-10} cm^3 lehetett. Ezután a hatvanas évek derekáig csak néhány *egyedi* szerkesztésű készülék működött a világon; az eljárás csupán *1965-től*, az első *kereskedelmi forgalmazású* pásztázó elektronmikroszkóp megjelenésétől terjedt el. Ehhez az is kellett, hogy megszülessenek azok a *félvezető röntgenérzékelők*, amelyek közvetlenül és gyorsan meghatározzák bármely röntgensugárzásnak energia szerinti összetételét, s közvetlenül csatlakoztathatók a már meglevő pásztázó vagy transzmissziós elektronmikroszkópokhoz is.

Immár ez a kérdés: *hogyan vizsgálják* az anyagot elektronok gerjesztette röngensugárzással? Erre cikkünknek a jövő héten megjelenő *második része* válaszol.

Dr. Jánossy András
(MTA Szegedi Biológiai Központ)

NYELV ÉS ÉLET

SZERKESZTI: DR. GRÉTSY LÁSZLÓ

ELVESZETT IGEKÖTŐK NYOMÁBAN

Anyanyelvünk egyik igen fontos sajátossága az a mód, ahogyan az igekötők használatával él: ezek a röpke kis nyelvi elemek egyszerre színezik és árnyékolják, meg szabatossá is teszik beszédünket.

Érdemes felfigyelni rá, hogy újabban sokan és sokszor elhagyják az igekötőt az ige mellől, s ezáltal egyszerre vétenek a stílus magyarossága, világossága és szabatossága ellen. A rossz példák sajnálatosan bőséges választékából emeljünk ki néhányat!

„Ebben az ügyben az alperest egyértelműen *marasztalni* kell." — „*Vesztegetni* próbálta a tanácsi dolgozót." — „Az óvodaépítkezés költségeihez a vállalat 3 millió forinttal *járul*." — „Vidéken a legnagyobb forgalmat az új áruházak *bonyolították*." — „Igaz, hogy az alacsony hőmérséklet, a jég, a rossz látásviszonyok *nehezítik* ott a közlekedést, de már nem *akadályozzák*."

Talán mondanunk sem kell, hogy a *marasztal* mást jelent, mint az *elmarasztal*, s hogy még a jogi nyelvben sem célszerű teret engedni az igekötő nélküli formának. Bátran állíthatjuk, hogy általában csak az idejét *vesztegeti* az, aki a hatósági személyeket *megvesztegetni* próbálja. Az is kétségtelen, hogy a költségekhez *hozzájárulni* (nem *járulni*) kell, és hogy az áruházak *lebonyolítják* a forgalmat, nem pedig *bonyolítják* (= összekuszálják). Az utolsó példamondatunkat pedig így kellene kijavítani: „... a rossz látásviszonyok *nehezítik* ott a közlekedést, de már nem tudják *megakadályozni*." (*Akadályozni*, azaz hátráltatni, gátolni, nehezíteni persze tudják, hiszen ez a mondat első részéből világosan kitűnik; de más dolog valamely cselekvést vagy folyamatot *akadályozni*, és egészen más *megakadályozni*, vagyis lehetetlenné tenni.) **Dr. Rozslay György**