

A sportmozgások biológiai alapjai I.

Csoknya Mária, Wilhelm Márta (2011)

Izomszövet (tela muscularis)

Az *izomszövetek* mesodermális eredetűek. Nagyfokú kontrakciós képesség jellemzi őket. Az összhuzékonyság jellegzetes szerkezetéhez kötött, s ez a struktúra az izomsejtekben fénymikroszkóposan is felismerhető *myofibrilla*. Az egyes izomsejtek myofibrillumai fényfel szembeni viselkedése alapján nem egyformák, ugyanis vannak olyan sejtek, amelyekben ezek a fibrillumok teljes hosszukban egyformán és egyszeresen törnek a fényt (erre mondjuk azt, hogy símák), az ilyen sejteket tartalmazó szövet a *símaizomszövet*. Vannak olyan sejtek, melyekben a myofibrillumok a fényt egyszeresen (világos, izotrop) és kétszeresen (sötét, anizotrop) törő darabok szabályosan váltják egymást. Ezek a csíkok (sávok) a myofibrillumok hossz tengelyére merőlegesen (régi elnevezéssel harántul) helyezkednek el. Az ilyen fibrillumokat tartalmazó sejtek, ill. szövetek a *harántcsíkolt izomszövet*hez tartoznak.

Símaizomszövet

Az akaratunktól független működésű szervekben így pl. a bél falában található símaizom. A szövet orsó alakú sejtjei magánosan vagy csoportokban találhatóak. A símaizomsejtek néha végükön elágazódnak, vagy kihegyesedők. Centrális helyzetű sejtmagja pálca alakú, végei lekerekítettek. Sejthártyáját – elhatárolva más sejtektől – *sarcolemmának* sejtplasmáját *sarcoplasmának* nevezik. A *sarcoplasma* organellumai közül még az endoplasmaticus reticulumot illetik külön névvel, amit *sarcoplasmaticus reticulumnak* neveznek. A sarcoplasmában sok glikogén szemcse és myofilamentum található. Ezek finomabb fonalacskákból, nevezetesen aktin és myosin filamentumokból épülnek fel.

Az $1\ \mu\text{m}$ hosszú *aktin* és a *myosin* (hossza $150\ \text{nm}$) filamentumok a sarcoplasmában különböző irányba haladva egy rácsszerű hálózatot hoznak létre, ahol a rácsfonal találkozási pontjánál ún. *rögzítőlemezek* jönnek létre. A símaizom kontrakciós mechanizmusa nem teljesen tisztázott.

A símaizomszövet kontrakciójáért az ún. *vegetatív idegfonadék* a felelős. A vegetatív fonadék rostjai az ún. Schwann-sejtes idegrostok, vagy más néven *Remak rostok* (ld. „Idegrostok”), melyek az izomsejtek között elágazódva haladnak. Az idegrostok a símaizomsejteken végződnek. Fontos, hogy nem minden símaizomsejt kap közvetlen idegrosttól ingerületet, azaz nincs közvetlen beidegzése. Azok a sejtek is összehúzódnak, melyek nincsenek közvetlen kontaktusban az idegrostokkal, ingerületüket a mellettük levő közvetlenül beidegzett izomsejttől kapják. Ez úgy lehetséges, hogy a símaizomsejtek között egy sajátos sejtkapcsoló struktúra figyelhető meg. Ennek lényege, hogy a két sejt membránjának külső része egy darabon szorosan egymás mellé kerül, az extracelluláris tér szinte eltűnik. A két sejt cytoplasmája csatornafehérjékkel van összekapcsolva, melyeken keresztül az ionok átáramolnak. Ez a szoros sejtkapcsoló struktúra (*gap junction* = réskapcsolat) szinte ellenállás nélküli ingerületvezetést biztosít.

A különböző szervek símaizomszövetének sejtjei eltérő gazdagságú beidegzést mutatnak. A leggazdagabb a ductus deferens (ondóvezeték) símaizma, a bélizomzat közepes gazdagságú beidegzést mutat.

Harántcsíkt izomszövet

Ez az izomszövet tovább osztható váz- és szívizomszövetre.

Vázizomszövet

A mozgás aktív rendszerét felépítő izmok harántcsíkt *vázizmok*, mint pl. a törzs izmai, végtagok izmai. Szerkezeti egysége az *izomrost*, ami tulajdonképpen egy óriás sejt, amely úgy keletkezik, hogy a sok ezer magosztódást nem követi sejtsztésválás. A sejtet egy sejtthártya (*sarcolemma*) határolja, melyen kívül egy bazális membrán és reticuláris ill. kollagén rostborítás is megfigyelhető. A sejtthártya alatt perifériásan helyezkednek el a sejtmagok. A sejtplasmában (*sarcoplasma*) kötegekbe rendeződött *myofibrillumok*, közöttük sok mitochondrium, símafelszínű és kevés durva felszínű endoplasmaticus reticulum, és a sejtthártya alatti Golgi-apparátus is megfigyelhető.

A kötegekbe rendeződött myofibrillumok között a *sarcoplasmaticus reticulum* tubulusait figyelhetjük meg. A tubulusok egy része a myofibrillumokkal párhuzamosan fut, ezeket *longitudinális tubulusoknak (L- tubulusok)* nevezik. Az I és az A szakasz határán a sarcoplasmaticus reticulum gyűrűszerűen veszi körül a myofibrillumokat, ezért a tubulusoknak ezt a részét *terminális cisternáknak* nevezték el. A két terminális cisterna közé ékelődik a harántirányú *transversális tubulus (T tubulus)* rendszer. A T tubulus folytonos a sarcolemmával. A T rendszer oldalirányú összeköttetéseket létesít a szomszédos filamentumokkal. A sarcoplasmaticus reticulum két terminális cisternája és a közöttük levő T tubulus egy jellegzetes képletet az ún. *Porter-Palade triádot* adja. Funkcionális szerepét ld. később.

Az izomrostokban a myofibrillumok csíkoltságot mutatnak, azaz rajtuk sötét, a fényt kétszeresen törő *anizotróp (A-csík)* és világos, a fényt egyszeresen törő *izotróp (I-csík)* szakaszok szabályosan váltják egymást. Erősebb nagyítás mellett további csíkok különíthetők el. Minden I szakasz közepén egy „szitaszerű” képlet az ún. *Z-lemez* található, s minden anizotrop szakasz közepén még kissé világosabb *H-csík*. A *H-csík* közepén még egy sötétebb *M-csík* is elkülöníthető. Z-től Z-ig tartó myofibrillum rész a *sarcomer*. Ez a harántcsíkt myofibrillum szerkezeti egysége (3.34. ábra, A. és B. képei).

A harántcsíkoltság magyarázata

A fénymikroszkóppal felismerhető myofibrillumokat kétféle, nevezetesen az aktin és myosin filamentumok építik fel. Ezek összetételük mellett hosszúságukban, vastagságukban és elrendezésükben is eltérést mutatnak.

1./ A myofilamentumok típusai

A *myosin filamentumok* 150 nm hosszú és 1,5-2 nm vastagságúak. Két alegységből, nevezetesen a *nehéz és könnyű meromyosin*ból épülnek fel. A nehéz meromyosin két, egységenként 20 nm átmérőjű fejből és 40 nm hosszú fonalszerű részből áll. A könnyű meromyosin fonalmolekula, hossza 90 nm (3.35. ábra, A. kép).

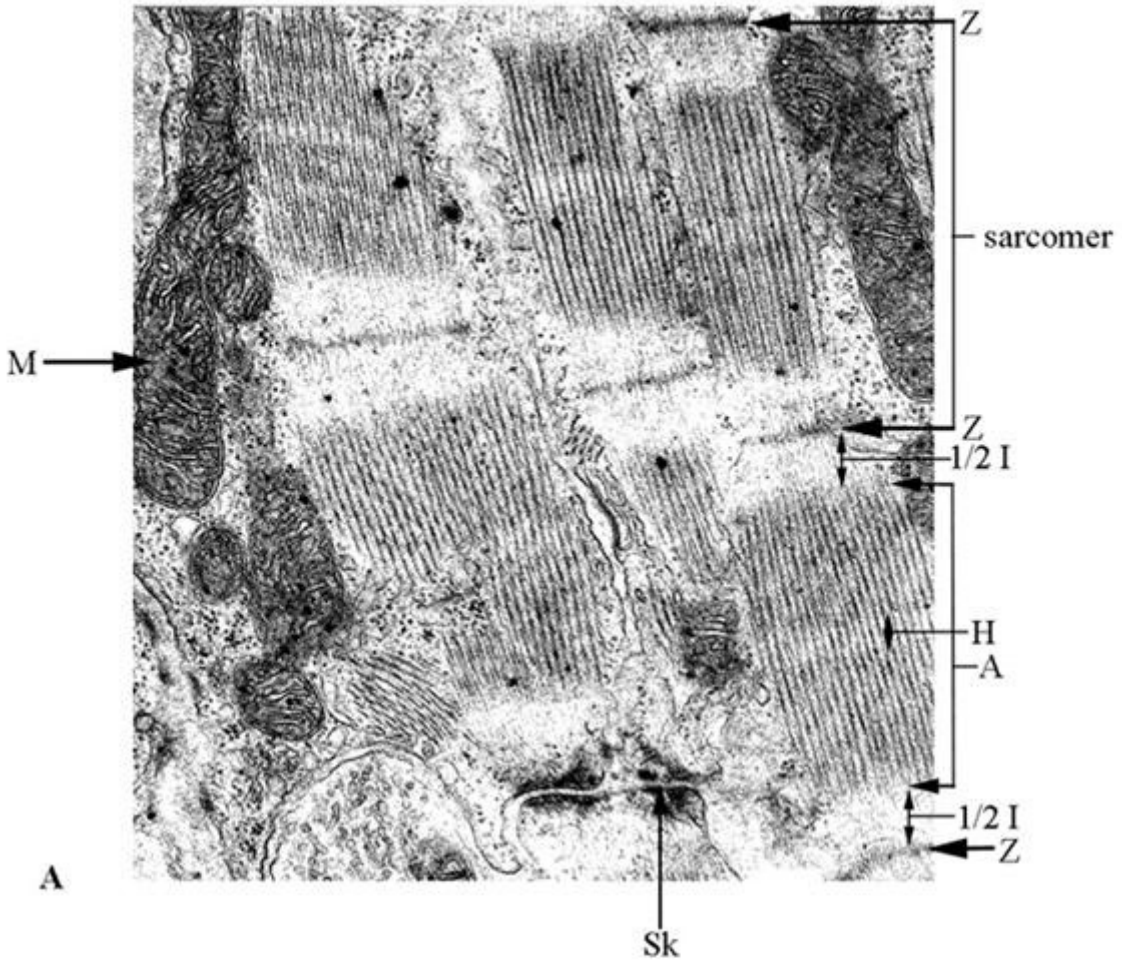
Az **aktin-filamentumok** vékonyak, 7 nm vastagok és 1 μm hosszúak. Globuláris alegységekből (**G-aktin**) felépülő kettős fonalak, amelyek spirálszerűen feltekerednek, és ezt **F-aktin**nak nevezzük (3.35. ábra, B. kép). Az F aktinra még egy hosszú, vékony ún. **tropomyosin (Tm)** molekula tekeredik, melyhez 40 nm-ként egy-egy globuláris **tropoin** molekula kapcsolódik.

2./ A myofilamentumok elrendeződése

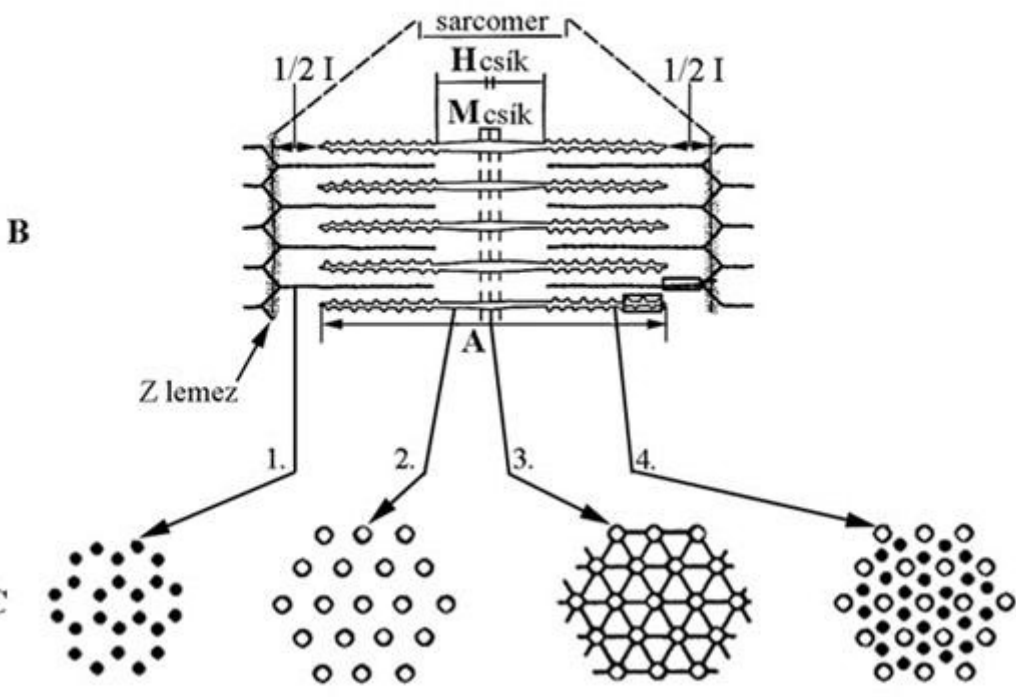
Az aktin filamentumok a világos izotrop csík közepén húzódó Z lemezek két oldalára rendeződnek. Így a teljes I csíkban csak aktin filamentumok vannak, de tovább futva kissé benyúlnak az anizotrop A csíkba is (3.35. ábra, B. kép).

A myosin filamentumok az A csík teljes hosszát átérlik. Ott, ahol a myosin és az aktin filamentumok együtt vannak jelen az A csík sötétebb. Az A csík közepén csak myosin filamentumok vannak, s ez a darab adja a kissé világosabb **H csíkot**. A myosin láncá közepén megvastagszik, ez az **M csík** (3.34. ábra, B. kép). Ha a sarcomer különböző csíkjaiból készítünk keresztmetszetet, akkor jól megfigyelhető, hogy az I csíkban az aktin filamentumok a térben hexagonálisan rendeződnek (3.34. ábra, C1. kép). A H csíkban csak vastag myosin filamentumok találhatók hasonló elrendezésben. (3.34. ábra, C2. kép). Feltehetően az M csík területén kapcsolódnak össze a vastag myosin filamentumok (3.34. ábra, C3. kép). Az A csíkban kapcsolódik össze a kétféle filamentum, de egyúttal azt is megfigyelhetjük, hogy minden vastag myofilamentumot 6 vékony aktin, míg egy vékony aktin filamentumot 3 vastag myosin és 3 vékony aktin filamentum határol (3.34. ábra, C4. kép).

3.34. ábra - A sarcomer szerkezete



A



B

C

A: elektronmikroszkópos felvétel a harántcsíktolt izomból. **M:** mitochondrium, **Sk:** részlet két izomsejt kapcsolatából (Benedeczky István felvétele). **B:** a sarcomer hosszszelvényének sematikus rajza, **C:** az egyes csíkokban a myofilamentumok elrendeződése

Az izomösszehúzódnás molekuláris mechanizmusa

Az izom összehúzódnását a rostot beidegző idegsejt axonjának végbunkóiból felszabaduló acetilcholin (ACh) indítja el akcióspotenciál hatására. Az ACh a postsynapticus membrán transzmitter-függő ion-csatornáit megnyitja és Na^+ áramlik az izomrost plasmájába, ezzel akcióspotenciált generálva.

Az **akcióspotenciál** az izomrost membránján terjed tovább, majd a sejt belsejébe a T-tubulusok közvetítésével jut el. A **T-tubulusok** a sarcolemmán nyílnak és vakon végződnek a sarcoplasmában, párhuzamosan futnak a Z-lemezekkel (azok mindkét oldalán). A T-tubulusban terjedő akcióspotenciál az L-tubulusokra terjed át. A két tubulus membránja olyan közel van egymáshoz, hogy az akcióspotenciál „átugrik” egyikről a másikra. A tubulusokból felszabadul a Ca^{2+} , és beáramlik a sarcoplasmába.

A Ca^{2+} a troponin-tropomyosin komplex konformációs (térszerkezeti) változásáért felel.

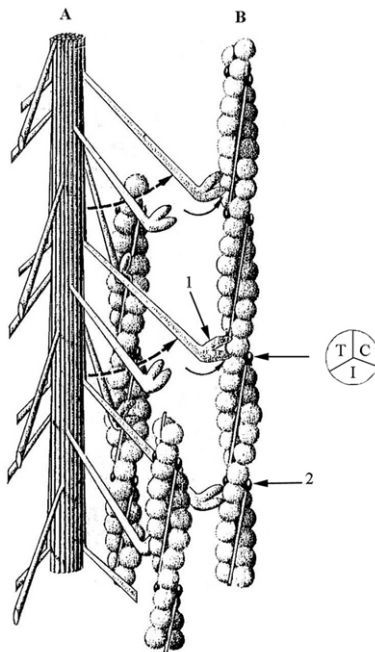
A tropomyosin láncon helyet foglaló troponin molekula-komplex, három kötőhellyel rendelkezik. A **troponin-T** a tropomyosinhoz rögzíti a troponint. A **troponin-C** a troponin molekula Ca^{2+} -kötő helye, a **troponin-I** az aktin-kötőhely (3.36. ábra). A sarcoplasmába áramló Ca^{2+} a troponin-C-hez kapcsolódik, ezzel elmozdítva a tropomyosin molekulát az aktin-filamentum árkából, miközben a troponin-I leválik az aktinról. Gyakorlatilag ez a két mozzanat (konformációs változás) teszi lehetővé az aktin és a myosin-fej összekapcsolódását azzal, hogy az akadályozó molekulát (tropomyosin, troponin-I) elmozdítja az aktin kötőhelyéről. Maga az izommozgás akkor jöhet létre, ha a myosin feje (a golfütő alakú molekula feje) kb. 45° -os szögben elmozdul, magával húzva az aktin filamentumot (3.34. ábra). Így az aktin-filamentumok az M csík irányába mozdulnak el.

Az aktin és a myosin összekapcsolódása energia befektetés nélkül is lejátszódik, a myosin fej elmozdulásához azonban energiára van szükség. Ezt biztosítja az ATP-bontásából származó energia. Az ATP bontó enzim, az ATP-áz a myosin-fejen található. Energia azonban nemcsak a myosin-fejének mozgatásához szükséges, hanem az aktin-myosin kötés felhasításához is. Az ilyenkor szétbontott kötés helyett a myosin újabb kötetést létesít a következő aktin-molekulával, így újra közelebb húzva a két I-csíkot egymáshoz (egy elmozdulás 10-30 nm-es csúszást jelent). Ezt hívjuk „**csúszó filamentum**” **modellnek**. Ez a folyamat mindaddig fenntartható, amíg folyamatosan rendelkezésre állnak a Ca^{2+} ionok, és van ATP bontás. Ilyen módon válik a kémiai kötésben tárolt energiából mechanikai és hőenergia. Az ATP bontásakor felszabaduló energia kb. 60%-a hővé alakul az izomműködés során.

Ha az aktin és myosin molekula éppen összekapcsolt állapotban van, és az ATP-hasítás elmarad, úgy az izom ebben a feszített helyzetben marad. Mivel ilyen állapot csak a halál beállta után jöhet létre, ezt hívjuk hullamerevségnek (rigor mortis). A maximális összehúzódnás a két I-csík találkozásáig tart, az izom maximális nyújtása akkor jön létre, amikor az utolsó myosin-fej kapcsolata az utolsó aktin molekulával kialakul. További nyújtás az izom szakadásához vezet, a két aktin-filamentum találkozásakor tovább folytatódó összehúzódnás már nem hatékony az izom-erő növelése szempontjából, mivel az A-csíkból myosin filamentummal ekkor már csak az egyik aktin filamentum találkozik. Az

akcióspotenciál hatásának megszűnésével a Ca^{2+} ion aktív transzport segítségével a cytoplasmából a sarcoplasmás reticulumba pumpálódik vissza. Ha a sarcoplasmában a Ca^{2+} -ion koncentrációja alacsony, a troponin-tropomyosin molekula újra elfedi az aktin kötőhelyeket, izommozgás ekkor nem lehetséges.

3.36. ábra - A myosin (A) és az aktin (B) myofilamentumok kontrakciós kapcsolata



A myosin feje (1) és az aktin molekula közötti kapcsolatot a troponin egység akadályozza meg. A troponin (2) térbeli elfordulása teszi lehetővé a kapcsolat létrejöttét

A rendszeres, hosszabb időtartamú edzés nagy terhet ró a sarcomerekre, így nagyon fontos feladat hárul a két filamentumot térben rögzítő molekulákra. Ezek közül legismertebb a Z-lemez, amely a sarcomerek határát jelzi. Alapvető feladata az aktin-filamentumok térbeli rögzítése. Alpha-aktininből épül fel. A Z-lemezeket a **desmin** tartja térbeli helyzetükben. Ez a molekula átér több sarcomert is, s így a Z-lemezek egymáshoz viszonyított helyzetének megtartásában is fontos feladata van. Hasonlóan fontos az M-csík (M-fehérje), amely a myosin filamentumokat rögzíti, s tartja megfelelő helyzetben, egymástól ugyanolyan távolságban. Ezen kívül több fehérjefonal rendszer rögzíti a myosin filamentumokat (C-, X- és H-fehérjék) melyek az M-csíkkal párhuzamos lefutásúak. Rájuk merőlegesen haladnak a **nebulin** nevű fehérjefonalak, amelyek az aktin filamentumok között futva meggátolják azok térbeli kilengéseit. Ez a gazdag fonalrendszer tehát biztosítja a sarcomer térbeli szerkezetének állandóságát nagy terhelés mellett is.

A folyamatos energiaellátást az ATP molekula hasadásából származó energiának kell fedezni. Az izom **azonnali energiaraktárjai** között ATP molekulákat találunk, amelyek ATP-áz enzim segítségével 2-4 sec-ig biztosítják az izom-összehúzó energiáigényét ($\text{ATP} \rightarrow \text{ADP} + \text{P}_i = \text{foszfát}$). A másik molekula az azonnali energia-raktárak közül a **kreatin-foszfát (CP)**. Ennek a molekulának a hasításával is energia szabadul fel ($\text{CP} \rightarrow \text{C} + \text{P}_i$). A felszabadult **anorganikus foszfát** az ADP-hez kapcsolódva újra ATP-t alakít ki, míg az ATP bomlásakor képződött anorganikus-foszfát a kreatin molekulához kapcsolódik. A CP további 4 sec-ig

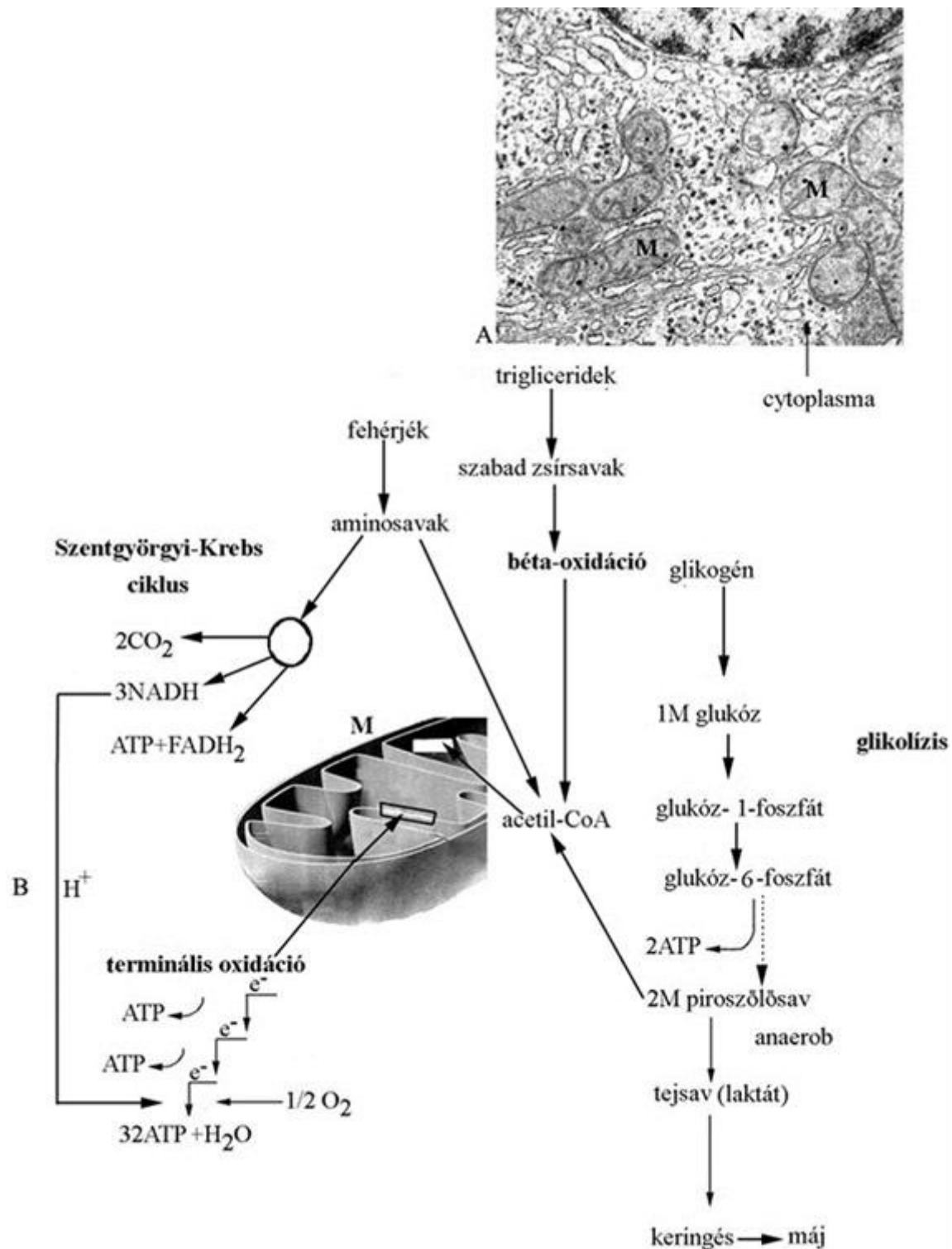
szolgálja az izom energiaigényét. Az ATP mennyisége genetikailag determinált, és nem változtatható. A raktározott CP mennyisége azonban némileg módosítható. További kb. 4 sec-ra elegendő mennyiséggel „tölthető” fel az izom cytoplasmája. A kettő együtt kb. 10-12 sec-ig szolgáltatja az energiát az izomműködéshez.

Maga a kreatin-kináz enzim a myosin fej közelében az M-csíkánál foglal helyet. Az első 10-12 másodpercben tehát nincs szükség sem külső energia-befektetésre, sem O₂-re. Így az izomműködés első fázisát **anaerob-alaktacid** (laktát = tejsav, *tejsavmentes*; ld. a vér) **follyamat**nak nevezzük (3.20. és 3.37. ábrák).

Az izom további működtetéséhez már egyéb *energiaforrásokra* van szükség. Ezek között a legfontosabb a *glukóz*. Az izomműködés kezdetén lecsökken a vér glukóz-szintje, a további energianyerés a **glikolízis** során valósul meg. A glikolízis az izom cytoplasmájában zajló lebontó folyamat (3.37. ábra, A. kép), melynek során a glukóz lebontása számos biokémiai lépésben történik (3.37. ábra, B. kép). Ezek közül a lebontás sebességét mindjárt az első lépés (glukóz → glukóz-6 P) határozza meg, így ezt sebesség meghatározó lépésnek nevezzük (rate limiting step). Ezt a folyamatot a **hexokináz-enzim** katalizálja, így mennyisége meghatározza a későbbi energianyerés sebességét. A glikolízis tizedik lépésében **piroszőlősav** (*foszfoenol-piruvát* → *piruvát*) keletkezik. Mindaddig a glikolízis O₂ hiányos közegben is lezajlik, s a hat szénatomos glukóz-molekula lebontásakor 4 ATP keletkezik. Ebből a glikolitikus folyamatok során 2 ATP molekula újra felhasználódik, így a folyamatsor nettó energianyerése 2 ATP glukóz molekulánként.

A következő lépés az izom-szövet oxigén-ellátottságán múlik. Amennyiben nincs elegendő O₂ a közegben a piroszőlősavból **tejsav** keletkezik. Itt a folyamat véget ér. Az energianyerésnek a készenlében lévő glukóz mennyisége, ill. az egyén tejsav-tűrő képessége szab határt. Ha glikolízissel nyerünk energiát az anaerob-kapacitásunkat használjuk ki. Ennek időtartama 30-180 sec-ig tartható fenn attól függően, hogy ki milyen edzettségi állapotban van. Mivel anaerob körülmények között a szőlőcukorból tejsav képződik, így a fázis **anaerob-laktacid** (3.37. ábra, B. kép). Ha azonban elegendő oxigén van jelen, akkor a piroszőlősavból acetyl-csoport képződik, amely a koenzim-A-hoz (KoA) kapcsolódva, mint acetyl-KoA a mitochondriumba szállítódik és belép a citrát-körbe (Szentgyörgyi-Krebs ciklus = citromsav-ciklus).

3.37. ábra - Fehérjék, zsírok, szénhidrátok szerepe az izomanyagcserében



A: Részlet egy sejt elektronmikroszkópos felvételéből. **B:** A cytoplasmában és a mitochondriumokban lejátszódó lebontófolyamatok. M: mitochondrium, N: nucleus

A *citrát-ciklus* körfolyamatai során részben energianyerés (2 ATP-nek megfelelő energia), részben CO₂ képzés zajlik. Ezt a sejtlégzés során képződött CO₂-t lélegezzük ki.

Az energianyerés szempontjából leglényegesebb lépés azonban a H^+ -ionok, és szabad elektronok képződése. A H^+ -ionok a citrát-ciklusban képződnek ($NADH + H^+$), míg az elektronvándorlás a **terminális oxidáció**ban zajlik. A terminális oxidáció a mitochondrium belső membránján helyet foglaló citochromokban játszódik le, amelyek az elektronok átadása révén egyre alacsonyabb energiaállapotba kerülnek. Az energia-szintek változásai következtében ATP szabadul fel. A folyamat végén a szállítódó H^+ -ionok és a légzési oxigén vízzé egyesül ($C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 = 6 CO_2 + 6 H_2O$).

A teljes sejtlégzés lezajlásakor 36 ATP molekula képződik, szemben a glikolízis során képződő 2 ATP- molekulával.

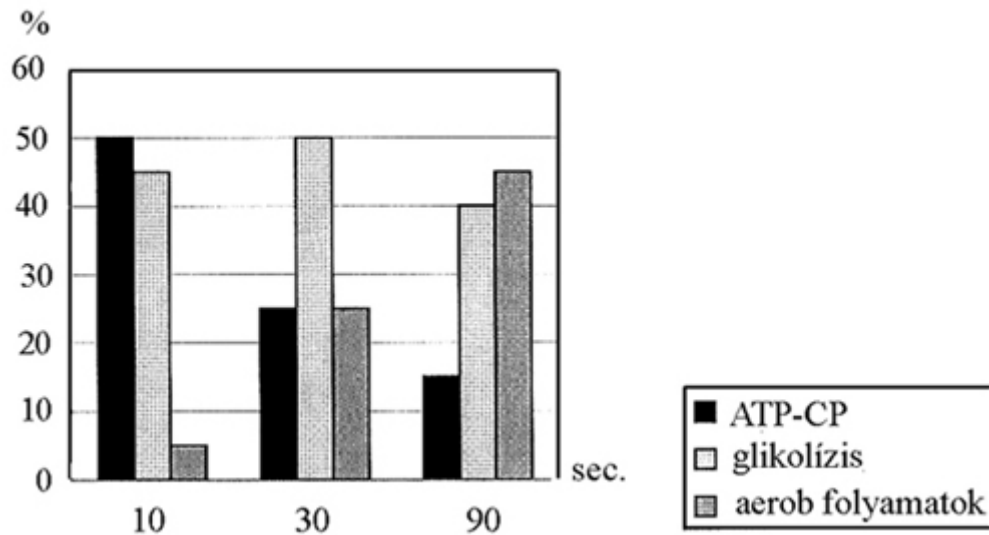
A nagy intenzitású izommunkák során tehát tejsav termelődik. Ez az izom cytoplasmájából a vérbe jut, majd onnan a májba kerül, ahol a **glukoneogenezis** során újra piruváttá vagy glukózzá alakul. Nagy terhelés során azonban a nagy laktát-tolerancia ellenére is növekedni kezd a vér tejsav-szintje. Az **aerob-anaerob küszöb** egyéenként változik, de többnyire 4 mmol/l-ben határozzák meg. Minél nagyobb az egyén anaerob kapacitása, annál magasabb a vér laktát-szintje terhelés után (8-9 mmol/l, extrém esetben 10 mmol/l fölötti). A valódi anaerob-kapacitást pl. a Wingate-teszt segítségével állapíthatjuk meg, melynek során 40 sec-ig maximális intenzitással teker a vizsgált személy egy kerékpár-ergométeren, utána meghatározzák a vér laktát-szintjét. Valódi **aerob kapacitás**ról a sejtlégzés szintjén öt perces terhelés után beszélünk. Az izom O_2 szükséglete sosem nulla egy terhelés során, de az anaerob-alaktacid és az anaerob-laktacid szakasz első felében az energianyerés nagyon kis százalékáért felelős. 90 másodperc után azonban már elég jelentős mértékben járul hozzá az energianyerés folyamatához. A valóságban tehát nem lehet csak egyik energiarendszertől fedezni az izomműködéshez szükséges ATP mennyiségét, de különböző időpillanatokban más-más energia-szolgáltató rendszer szerepe a nagyobb (3.37. ábra, B. kép).

A szervezet glikogén-raktárai jelentősek, így az abból képződő glukóz aerob körülmények között hosszú ideig képes az izom energia-szükségletet fedezni.

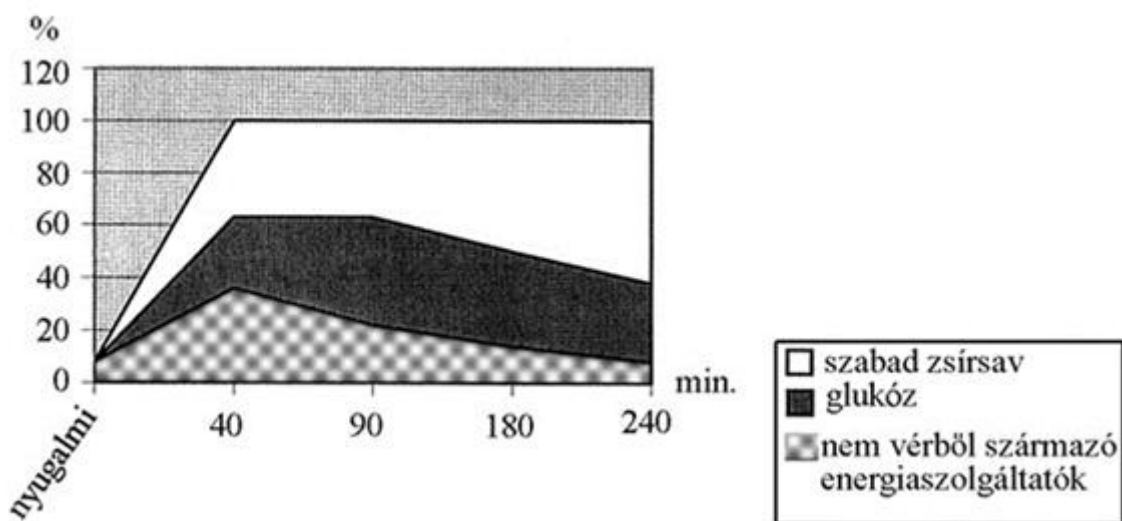
A szervezetben a legnagyobb energiraktár azonban a **zsírszövet** (3.37. ábra, B. kép). Trigliceridek formájában raktározódik a lipid nagy része. A trigliceridek szabad zsírsavakra bontása után kerül a zsírsav az izomsejtbe. A hosszú szénláncú zsírsavakból a sejtplasmában 2 szénatomos egységek keletkeznek. A folyamatot **β -oxidáció**nak nevezzük, az ezután következő lépések a továbbiakban a mitochondriumban zajlanak. Ennek során acetyl-csoportok keletkeznek, melyek a KoA-hoz kapcsolódva acetyl-KoA-ként a citrát-ciklushoz kapcsolódnak. Ne felejtjük el, hogy a citromsav ciklus csak megfelelő oxigén-ellátottság mellett működik, így zsírbontásról csak aerob körülmények között beszélhetünk. Ez pedig csak közepes tartós terhelés mellett lehetséges. Ugyanis 60%-nál nagyobb intenzitású terhelés során nő az anaerob kapacitás szerepe az izomműködésben. Másrészt a zsírok bontását a **lipázok** végzik (lipoprotein-lipáz, hormonsensitív-lipáz), amelyek csak hosszabb terhelés során aktivizálódnak. Ez edzetlen embernél 45-50 perces tartós terhelést, míg edzett embernél 30-40 perces terhelést jelent általában. A zsírbontó enzimek működésével nyert energia azonban sosem adja 100%-t az izom energiaszükségletének, kb. 60 perces folyamatos terhelés után tudja egy edzett ember energiaszükségletének kb. 50%-át a zsírok bontásából biztosítani (3.38. és 3.39. ábrák). Energetikai szempontból a lipidek bontása a szénhidrát bontásából származó energia többszörösét szolgáltatja. A hat szénatomos glükóz molekula bontásakor 36 ATP nyerhető. Az emberi szervezetben a zsírsavak többségét 16-18 szénatomos zsírsavak adják. Ideális esetet figyelembe véve 3 db 18 szénatomos zsírsav kötődik a glicerinhoz. Ebben

az esetben egy zsírsav lebontásával 3 x 36 ATP keletkezik. Az ideális triglicerid lebontásával tehát $3 \times 3 \times 36 + 18 = 324$ ATP nyerhető.

3.38. ábra - Az energiaszolgáltató rendszerek aránya



3.39. ábra - A hosszú ideig tartó aerob edzés energiaszolgáltató



Nem nehéz belátni, hogy a zsírok lebontása igen hosszú ideig képes szolgálni az izom energiaszükségletét. Valójában egy maratoni táv lefutásával veszít a szervezet 1 kg zsírt. Az átlagember **raktározott zsírtartalma** ennél lényegesen nagyobb. A referencia (ideális) férfi teljes zsírtartalma 12-15%, ebből esszenciális zsírtartalom 3-5%, az ideális nőé 20-25%, ebből az esszenciális zsír kb. 12%. Ez egy 70 kg-os referencia férfit figyelembe véve 8,5 kg zsír. Egy 57 kg-os nőt vizsgálva kb. 8,5 kg raktározott zsírmennyiség. A referencia-értékek az ideális eseteket mutatják. Nem kérdéses tehát, hogy a legtöbb embernek megfelelő energiaraktár áll rendelkezésére bármely mozgáshoz.

Mivel a kiürült zsírraktárak is gyorsan pótlódnak, így a szervezet zsír- és energiahiánya csak rendkívüli esetekben állhat elő. Ilyen eset a hosszútávfutóknál, országúti kerékpárosoknál és más extrém aerob-kapacitást igénylő sportágaknál fordulhat elő. Mérések szerint a profi férfi maratonisták testzsírartartalma 3-5% között változik. Az előző adatok ismeretében jól látszik, hogy zsírraktárak nem jelentősek. Emiatt glükóz-szintjük folyamatos szinten tartása érdekében szénhidrát-pótlásra van szükségük a táv lefutása során. Gyakran előfordul azonban, különösen amatőr-futók esetében, hogy a szénhidrát-pótlás nem megfelelő, s emiatt a szénhidrát és zsírraktárak kimerülésekor a szervezet a fehérjék bontásába kezd.

A *fehérjék* építőkövei az aminosavak. Ezek lebontásával izomfehérjéket is veszítünk, így az ebből nyert energia a szervezet számára már káros lehet. Az aminosavak bontásakor először az amino-csoportokat kell lehasítani a molekuláról (deaminálás), majd a maradék szénláncot képes a szervezet lebontani, és belőle energiát nyerni. Az amino-csoportok a szervezet számára fölöslegesek, s karbamidként (urea) a vizeletbe kerülve távoznak. Az aminosav szénláncának hosszától függően piroszőlősavat, vagy acetil-csoportokat képes a szervezet nyerni, amelyek ezek szerint két helyen is kapcsolódhatnak a sejtlégzés folyamatába. Így mind aerob, mind anaerob módon hasznosíthatók.

Összességében tehát jól látszik, hogy miért nevezzük a szénhidrátokat, fehérjéket és zsírokat **makro-nutriensek**nek, s az előbbi példák alapján az is, hogyan nyer az izom és minden más szövet energiát (ATP-t) a lebontásukkal.

A rendszeres edzés hatásai az izomra

A rendszeres edzés tehát mechanikai és biokémiai változásokat eredményez az izomműködésben. Ezeket szerkezeti, biokémiai és funkcionális változásokként szoktuk említeni.

Szerkezeti változások

- a. A rendszeres fizikai terhelés hatására nő a myofibrillumok száma (ez az izomrostok megvastagodásához vezet), ezen belül
- b. a myofibrillumok megvastagszanak.
- c. Az **izom kapillarizáltsága** fokozódik (ez javítja az izomsejt anyagcseréjét; vagyis a tápanyagokkal és oxigénnel való ellátottságát, ill. a salakanyagok gyorsabb leadását).
- d. A mitochondriumok száma nő (mivel a citrát-ciklus és a terminális oxidáció itt zajlik, ez az aerob kapacitás javulásához vezet).
- e. A sarcoplasma állománya nagyobb lesz (a fehérjefonalak munkájának mérhető következménye csak akkor van, ha a fehérjék megfelelő mennyiségű cytoplasmában vannak oldva).
- f. Nő a raktározott glikogén és trigliceridek mennyisége (bár ez a raktár nem növelhető jelentősen, az izom anyagcseréjében fontos szerepe van).
- g. Az energiaszolgáltatásban fontos szerepet játszó enzimek mennyisége megnő (pl. myosin ATP-áz; minél gyorsabb az ATP bontás és az így felhasználható energiamennyiség minél nagyobb, annál gyorsabb az izomösszehúzódnak).
- h. Nőhet a **raktározott kreatin foszfát** mennyisége (a különböző rövid ideig tartó, de nagy intenzitású izommozgások során az azonnali energiaraktárak növelése teljesítmény javulással jár).
- i. A Z-lemezek vastagsága változik (minél vastagabb az aktin filamentmokat rögzítő fehérje, annál nagyobb az ellenálló képessége nagy erőbehatásokra is).

- j. Erősödik az intramusculáris kötőszövet, ami védi az izmot a sérülésektől, ill. izometriás munkavégzésnél növeli az izomerőt).
- k. A rosttípusok aránya bár kis mértékben, de változtatható (ld. „Izomrost típusok”).

Biokémiai változások

- a. A hexokináz enzim aktivitása nő (glukóz → glukóz-6P átalakulást segítő enzim, a glikolízis lejátszódásának sebességét fokozza).
- b. A foszforiláz enzim gyors hatású.
- c. A citrát-ciklus és az elektron transzport enzimjei hatékonyabban működnek (több, gyorsabb, hatásosabb, ennek következtében nagyobb aerob kapacitás).
- d. A **tejsavdehidrogenáz** enzim összaktivitása csökken (kevesebb tejsav termelődik, így az izom, ill. a vér pH-ja lassabban tolódik el savas irányba).
- e. A myoglobin mennyisége nő (ld. később).
- f. A hormonsensitív lipáz és a lipoprotein lipáz mennyisége és aktivitása nő (ennek köszönhetően az edzett ember izma gyorsabban kezdi bontani a zsírsavakat energianyerés céljából, így több glikogént raktározva a terhelés során).

Funkcionális változások

- a. Az izom mechanikai munkája javul.
- b. A statikus izomerő nő az izometriás edzés során (ld. A mozgás aktív rendszere).
- c. Gyorsító nő (dinamikus gyakorlatok).
- d. Ízületi hajlékonysági tartalék növekedése (ez csak akkor jön létre, ha terhelés előtt és után megfelelő bemelegítéssel nyújtjuk az izmokat és inakat).
- e. Az izomtónus fokozódása. (Ez az erő növekedésével párhuzamosan jelentkezik és az izom előfeszítettségének fokozódását jelenti. Ha nem tartjuk meg az izom megfelelő nyújthatóságát, a későbbiekben gátolja az izom működését.)
- f. Az izom nyugalmi állapotában is enyhén előfeszített, így nyújthatósága normál physiologiás körülmények között nagyobb, mint összhúzóerőssége.

Izomrostok típusai

Bár a harántcsíkolt izom építőkövei minden esetben az aktin és a myosin, különbségeket tehetünk a különböző izmokat felépítő rostok között. Régen ezeket vörös és fehér rost névvel illették (3. táblázat). Ma már tudjuk, éppen biokémiai ismereteink gyarapodása révén, hogy ennél összetettebb a rostok működése és kategorizálása is. Alapvető különbség mutatkozott a myosin ATP-áz működésében. A nagy ATP-bontó kapacitású, savas pH mellett inaktiválódó rostokat **gyors rángású rostoknak** nevezték, míg az alacsonyabb ATPáz aktivitású, savas pH-nál stabilabbak a **lassú rángású rostok**. A két rost közötti különbség az akcióspotenciált követő összehúzódás sebessége. A gyors rángású rostok adott impulzusra nagy sebességgel húzódnak össze, míg a lassú rángású rostok összehúzódási sebessége lényegesen kisebb. A gyors rángású rostok azonban tovább bonthatók két altípusra, ugyanis az egyik típus gyorsabban húzódik össze, mint a lassú rostok, de a gyors rostoknál lassúbb, azaz egy köztes izomrost típus, amelynek a biokémiai és mechanikai tulajdonságai is eltérnek a másik két rosttípusától. Felosztásuk szerint tehát a következők lehetnek:

Az **FG (II. B izomrost)**, 3. táblázat) tehát a gyors rángású, glikolitikus (glikolízissel energiát nyerő) rostokat, a **FOG (II. A típusú izomrost)** a gyors rángású oxidatív és glikolitikus energiarendszerrel is működő, míg az **SO (I. típusú izomrost)** a lassú rángású oxidatív

rostokat jelenti. A három rosttípus munkabírása sem egyforma. Az FT/FG rostok gyors, nagy erő kifejtésre képesek, de fáradékony izomrostok, a FOG gyors, közepes erő kifejtésre képes, közepes gyorsasággal fáradó rostok, míg a SO lassan összehúzódó, nem fáradékony, a legnagyobb erő kifejtésre képes rosttípus. Az összehúzódás és elernyedés sebessége tehát az FG és az SO között igen jelentős (FG 15-20/30-40 ms; SO 50-60/150-200 ms).

Létezik egy ún. **C-típusú rost** is, melyről nem sokat tudunk. Ismert, hogy fontos szerepe van az izomrostok differenciálódásában a magzati és a születés utáni életben is. Ez a rost játszik szerepet sérülések, izomszakadások után a különböző rostok képzésében is, továbbá a C-típusú rostokból változtatható a **rostösszetétel** az izmokban. A rostösszetétel megváltoztatásának lehetősége már nagyon régóta foglalkoztatja az edzéseméleti szakembereket. Az egyénre jellemző rostösszetétel ugyanis genetikailag determinált. Ez azt jelenti, hogy minden ember izmaiban azonos típusú rostok vannak (a fent említett négyféle rost), de ezek eltérő arányban vannak jelen a különböző izmokban.

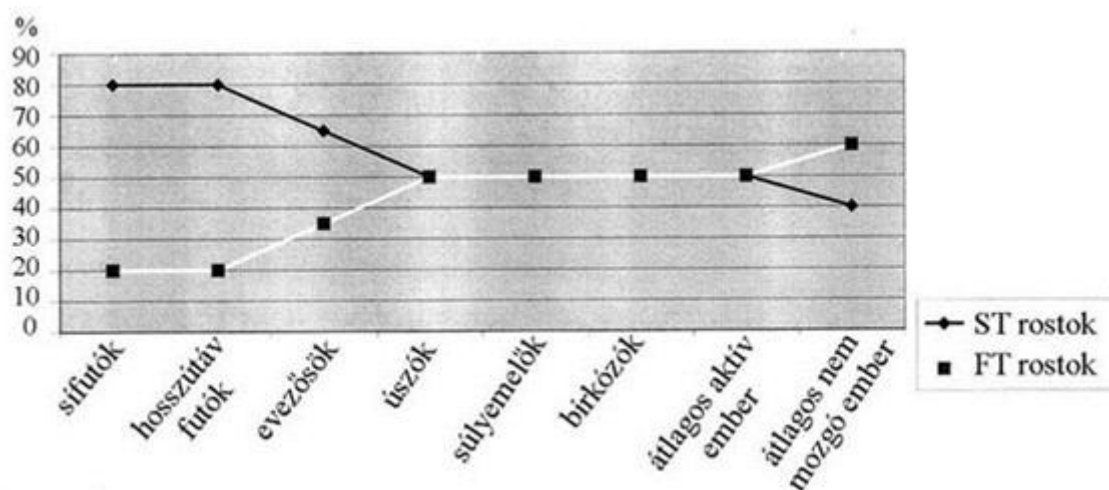
3.3. táblázat - Izomrost típusok és főbb jellemzőik

	II. B típusú rost	II. A típusú rost	I. típusú rost
Szín	Fehér rost	Piros rost	Vörös rost
Myoglobinn tartalom	Nincs	Kis mennyiségben	Nagy mennyiségben
Rost átmérő	Legvastagabb	Közepesen vastag	Legvékonyabb
Összehúzódás sebessége	Leggyorsabb, FT	Közepesen gyors	Leglassúbb, ST
ATPáz aktivitás	Legnagyobb	Közepes	Legkisebb
Z-csík	Vékony	Közepesen vastag	Legvastagabb
Mitochondrium szám	Legkevesebb	Több	Legtöbb
Oxidatív enzimek (citrát-ciklus, terminális oxidáció) mennyisége	Legkevesebb	Közepes mennyiségben	Legtöbb
Glikolitikus enzimek	Legtöbb	Közepes mennyiségben	Legkevesebb
Kapillarizáltság	Legkisebb	Közepes	Legnagyobb
Fáradás	Gyorsan bekövetkezik	Lassabban következik be	Legkésőbb következik be
Új nevezéktan	FG	FOG	SO

Mivel a rostok másféle biokémiai enzimrendszerrel rendelkeznek, így alapvetően meghatározzák, és behatárolják az egyén fizikai teljesítőképességét, ill. a különböző sportágakbeli sikereit is. Ha azonban az izomrostok egymáshoz viszonyított aránya változtatható, úgy a kevésbé tehetséges emberek, ill. a hátrányosabb genetikai háttérrel született sportolók esélyei is megnövelhetők. Ez tehát a C-típusú rostok differenciálásával lehetséges. Sajnos azonban ez a változás nem mérvado egy versenysportoló életében, ugyanis a C-rostok 3-4%-ban vannak jelen az izmokban. Élsportolóknál ez a változás nem dönti el egy jelentősebb verseny kimenetelét, ha mindenki képes ugyanakkora változást elérni. A

rostösszetételre vonatkozó genotípus tehát valószínűsíti a különböző sportágakbeli sikereket, illetve rátermettséget. Egyetlen izmunkban sincsenek tisztán ST vagy FT rostok, hanem ezek keverten fordulnak elő. Fontos azonban megjegyeznünk, hogy különböző izmainkban funkciójuk szerint más-más arányban lehetnek jelen. Egy sportoló teljesítményét alapvetően a kar és a láb izmai befolyásolják. Így ha az izomrost-összetételét akarják meghatározni izombiopsziát alkalmazva elsősorban a comb-izmait (m. quadriceps) vizsgálják. Ha az ST rostok vannak többségben, akkor a sportolónak elsősorban a nagy aerob kapacitást igénylő sportok nyújthatnak sikereket, míg a FT rostok nagyobb aránya az anaerob kapacitást igénylő sportágakban előnyös (3.40. ábra). Fontos megjegyeznünk, hogy ezek csak megközelítő adatok, egy-egy sportág kiemelkedő képviselőjénél ennél szélsőségesebb értékeket is mértek már. A gyors rostok 50% feletti aránya nem valószínű, mivel a ST rostok szerepe nemcsak a sportmozgásokban jelentős, hanem ezek a rostok felelősek a test megtartásáért is. Ha a FT rostok aránya megnőne az illető a felegyenesedést, egy helyben ülést stb. nem lenne képes kivitelezni. Ennek ellentmondanak azonban az utóbbi évek sportélettani közleményei, melyek szerint vizsgáltak olyan sprintereket is, akiknél 20%-ban voltak csak a ST rostok, míg a FT rostok 80%-ban voltak jelen. Igaz, ezen belül kb. fele-fele arányban találtak FG és FOG rostokat. A különböző rosttípusok aránya életkoronként is változik.

3.40. ábra - Rosttípusok megközelítő aránya különböző sportágak élsportolóiban



A prenatális életkorban kb. 50%-ban találtak I. típusú (ST) rostokat, míg kb. 25-25% volt a II. (FT) rostok és a C-típusú rostok aránya. Születéskor a II. típusú rostok kb. 45%-ban, az I. rostok kb. 40%-ban, míg a C rostok kb. 15%-ban voltak jelen. Az első életév végére a C-rostok már csak 3-4%-s arányban voltak megtalálhatók. Ez az arány életünk végéig megmarad. Az első év végére az éppen járnai tanuló gyermekben az ST rostok aránya volt nagyobb (kb. 55%), majd felnőttkorra ez az arány ismét változott a IIB típusú rostok javára. Serdülőkorban érdekes módon a három fő rosttípus (I, IIA, IIB) kb. azonos arányban volt jelen a comb izmaiban. Ezek az adatok rávilágítanak a kamaszkori rendszeres testmozgás jelentőségére, hiszen ha a rostok aránya nem is változik, a különböző rosttípusok enzimszisztemjeinek módosítása jelentősen befolyásolja majd az egyén fizikai teljesítőképességét. Különösen fontos ez akkor, ha figyelembe vesszük, hogy mind aerob, mind anaerob kapacitással rendelkező rostok ebben az életkorban vannak jelen a legnagyobb arányban a szervezetben.

Szívizom

A harántcsíkolt izomszövet egy másik formája. Morphológiai egysége az *elágazó szívizomsejt*. Ebben a sejtben egy centrális helyzetű sejtmag található. A szívizomsejtek egymással kapcsolatban vannak, ez a kapcsolat a fénymikroszkóppal látható **Eberth-féle vonal**. Myofibrillumai harántcsíkolttságot mutatnak. A myofibrillumok között, mint a vázizomszövetnél is, sok a mitochondrium, glikogén, Golgi-apparátus valamint símafelszínű sarcoplasmaticus reticulum. A sejteket kívül bazális lamina határolja, amihez mind kollagén, mind reticuláris rostok kapcsolódnak. Ez a sejtfelépítés a szívizom legtöbb sejtjére igaz, melyek feladata az összehúzódás és elernyedés. Ezért szokták munkaizomzatnak is nevezni.

Emellett a szívizomzatban található speciális ún. **ingerületképző és vezető szívizomsejt csoportok**, ami ugyancsak elágazó, harántcsíkoltat mutató izomsejtekből áll, de a sejtek kétmagvúak, a harántcsíkoltat nem olyan éles, mint amit a mechanikai munkaizomsejtekénél megfigyeltünk. A sejtek igen sok glikogént tartalmaznak.

Ingerképző és ingervezető rendszer: a **sinus csomó** és a **pitvar-kamrai rendszer** (ld. Sportmozgások biológiai alapjai II. „Keringési rendszer” c. fejezetben).

Myoepithel

A **myoepithel** T alakú epithel sejtekből épül fel, ahol a sejt alsó kiszélesedő részében található a myofibrillák, míg a felső rész a sejtmagot tartalmazza. Ilyen sejtek található pl. a szemben, pontosan a pupilla tágítását végző musculus dilatator pupillae-ban.