

1. AZ ÉLET KELETKEZÉSE, A SEJTEK SZERVEZŐDÉSE

A Föld kialakulása és a prebiotikus környezet. A fossziliák jelentősége. A szerves molekulák eredete és szerveződése. A progenóta kialakulása. Az életfeltételek változása. A sejtalkotó makromolekulák.

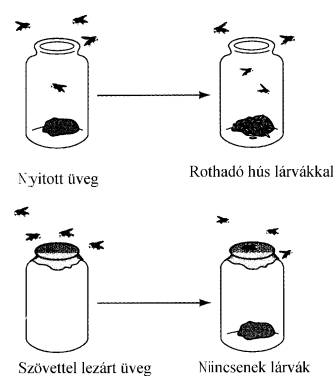
A sejt, mint az élet alapegysége. A pro- és az eukarióták általános jellemzői. Sejtszervecskék és funkcióik.

A fejezetet Szabad János egyetemi tanár jegyzete alapján módosította és összeállította Lippai Mónika.

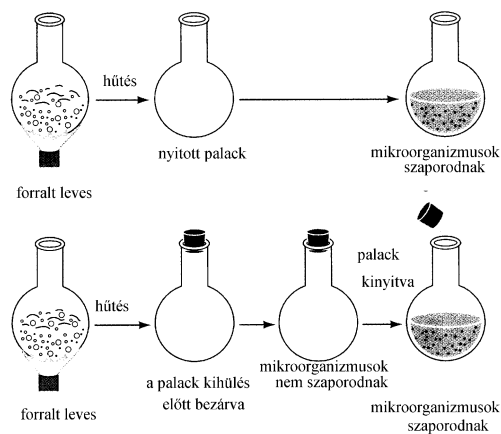
Bevezetés

Mindenkinek természetes, hogy élőlények születnek, élnek és meghalnak. Hogyan kezdődhetett az élet

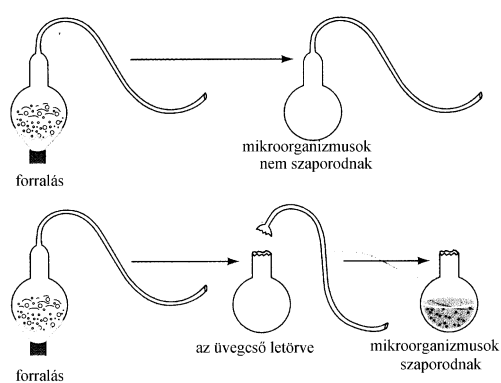
(a) Redi kísérlete



(b) Spallanzani kísérlete



(c) Pasteur kísérlete



körforgása?

1.1. ábra. Az élet spontán eredetéről szóló elképzeléseket cáfoló klasszikus kísérletek.

Az első élet kialakulása szervetlen anyagokból szerves molekulák, majd sejtyszerű struktúrák szerveződésével következhetett be (*abiogenezis*). Hol, hogyan, mikor történhetett ez meg? A kutatások fejlődése lehetővé tette, hogy ezekre a kérdésekre válaszul ma már tudományosan elfogadható hipotézis(ek)e)t lehessen felállítani.

A sejt fontosságát mi sem bizonyítja jobban, mint hogy minden életjelenség sejttel kapcsolatos és (legalábbis mindeztáig) minden sejt csak egy korábban létező sejtől származhat - azaz a sejt az élet alapvető szerveződési és funkcionális egysége. Milyen szerveződési és funkcionális jellegzetességeik vannak a sejteknek? Az alábbi fejezet a fenti kérdésekre adható válaszokat tekinti át röviden.

Korai kutatások az élet mibenlétével kapcsolatban

Az élet *ősnemzés*-eredetét, melyet Arisztotelesz (i.e. 384 – i.e. 322) is vallott, a XVII. század második felétől kezdve kezdték tudományos alapon megcáfolni. Izolált rothadó húsból nem képződnek légylárvák (Redi 1668). A sterilizált, lezárt tápoldatban nem keletkeznek mikroorganizmusok (Spallanzani, 1770 körül). Louis Pasteur híres kísérletei (1862) alapján mondta: *omne vivum e vivo* (minden élet életből származik; (1.1. ábra).

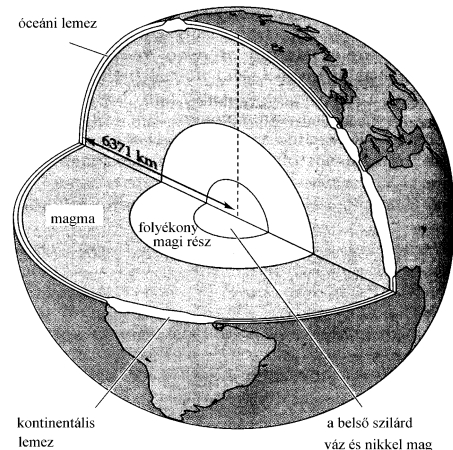
Az első mikroszkópot Robert Hook készítette 1665-ben. Leeuwenhoek 1676-ban látott először mikroszkópban élő sejteket, mikroorganizmusokat.

Ma már tudjuk, hogy minden élőlény sejt(ek)ből áll. Miből képződtek az első sejtek, és miből a sejteket alkotó szerves anyagok?

A Föld rövid története.

Az univerzum anyaga sok milliárd évvel ezelőtt kis térfogatban volt összehúzóva. Anyaga a „Nagy Bumm” (~13,7 milliárd éve) után szétszóródott, belőle galaxisok képződtek. A bolygók a gravitáció, valamint a szétszóródott részecskék aggregációja révén alakultak ki. A Föld mintegy 4,5 milliárd éves. Belső magja 3700 km sugarú, folyékony vas és nikkel alkotja. A magma 3000 km vastag, sűrű, olvadt szilikátokból áll. A magmán úszik a földkéreg, amely 5-40 km vastag (1.2. ábra). A külső rétegek nyomása, meteoritok becsapódása és a radioaktív bomlás hevítette fel.

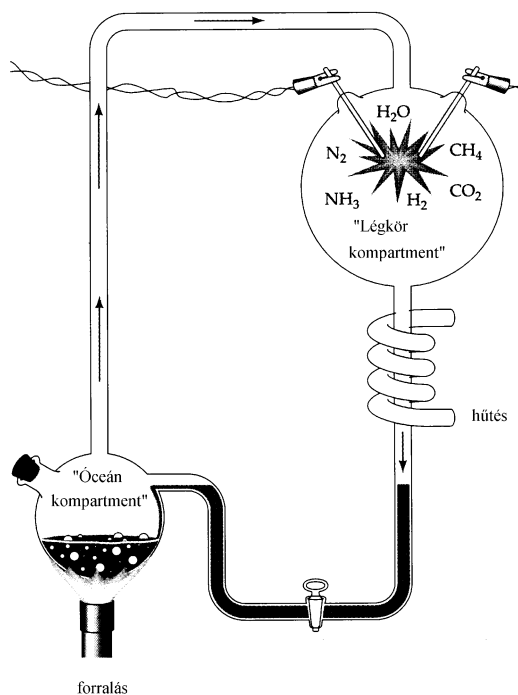
A legöregebb fossziliák, az élőlények geológiai korból megőrzött struktúrái 3,8 milliárd évesek. Az élet 4 milliárd éve keletkezhetett itt, a Földön. Hogyan?



1.2. ábra A Föld szerkezete.

Az első szerves molekulák eredete

Az ősi föld légköre redukáló jellegű volt (bár a redukáló hatás korábban feltételezett erősségét ma már vitatják), oxigént nem tartalmazott: a magmából és a földkéregből kiszabadult N_2 , CO_2 , H_2O , H_2 , NH_3 , H_2S , CO és CH_4 alkotta (O_2 csak nyomokban: más elemekkel alkotott vegyületeket). A légkör hűlésével víz csapódott ki. A villámlás, az ultraibolya sugárzás és a magas hőmérséklet a légköri gázokat egyszerű szerves vegyületekké alakította. Harold Urey és Stanley Miller (az 1950-es években) lombikban korai földi körülményeket teremtve elektromos kisülésekkel, viszonylag magas hőmérsékleten valósította meg szerves molekulák szintézisét (1.3. ábra). Berendezésükben a vízben („ősleves-hipotézis”) már rövid idő alatt is olyan vegyületek képződtek, mint pl. HCN , formaldehid, acetaldehid, ecetsav, hangyasav, urea, sőt aminosavak is (glicin, alanin, glutaminsav, aszparaginsav).



1.3. ábra Az Urey és Miller-féle berendezés működésének elvi alapjai.

Bár a mai elképzelések szerint az őslégkör összetétele különbözött az Urey és Miller által feltételezettől (kevésbé redukáló volt), a gázkomponensek módosításával szintén előállítható - akár még többféle - szerves vegyület. A reaktív vegyületekből, különösen a HCN -ből és a formaldehidből, könnyen képződnek olyan bonyolultabb molekulák, mint az adenin vagy cukrok.

A szerves molekulák szerveződése

Az évmilliók folyamán az ősóceánban felhalmozódhattak a szerves molekulák. A prebiotikus körülmények között képződő sokféle vegyület monomerjei könnyen polimerizálódhattak. A polimer molekulák sok fontos tulajdonsággal bírhatnak: reakciókat katalizálhatnak, replikálódhatnak,

információt tárolhatnak, aggregálódhatnak, emellett stabilak. Valószínű, hogy az első biológiai aktivitású polimerek RNS-szerű molekulák voltak, olyanok, mint a ma ismert *ribozimok*.

A ribozimok enzimatiszus aktivitású RNS-ek, az 1980-as évek elején fedezték fel őket – addig csak fehérjetermészetű enzimeket ismertek. Az *enzimek* olyan katalitikus aktivitású szerves molekulák, amelyek az életfeltételeknek megfelelő hőmérsékleten gyorsítják fel a kémiai reakciókat. Az enzimek szelektívek: a sok lehetséges kémiai reakció közül csak néhányat katalizálnak.

A különféle ribozimok eltérő folyamatokban vesznek részt, de sokféle ribozimmal nagyon sokféle enzimatiszus reakció katalizálható. Valaha ribozimok katalizálhatták az aminosavak polimerizációját is peptidekké, fehérjékké. A fehérjék sokfélesége teremthette meg az alapot további enzimatiszus folyamatokhoz, valamint a "sejtszerű" szerkezetek kialakulásához.

Alexander Oparin mutatta meg először (1924, 1936), hogy a különféle polimerekből ma is készíthetők olyan szerveződéses, úgynevezett koacervátumok, amelyek mutatnak bizonyos, a sejtekre jellemző tulajdonságokat. Például: szelektíven vesznek fel anyagokat környezetükből és alakítják át azokat, képesek anyagokat koncentrálni belsejükben, és arra is, hogy megszabaduljanak a felesleges anyagcseretermékektől. Mesterséges körülmények között, fehérjeszerű oldatok hűtéskor olyan, kb. $2\ \mu m$ átmérőjű cseppecskék formálódhatnak, amelyeknek kettős külső rétegük van, fehérjeszerű molekulákat abszorbeálnak, bimbóznak, osztódnak és önszervező képességük. (a legidősebb, 3,8 milliárd éves fossziliák mérete is $2\ \mu m$!).

Az őstengerben a kis agyagszemcsék felszíne katalizátorként segíthette a cseppecskék szerveződését. A poláros és apoláros csoportokat egyaránt tartalmazó molekulákból spontán képződhetnek határoló rétegek: a hidrofób természetű lipidek és/vagy fehérjék "membránokkal" burkolhatták be a koacervátum-cseppecskéket. Ezek alkalmassá válhattak a szelektív anyagfelvételre és -leadásra: a membránokon protonok pumpálódhatnak át, lehetőséget teremtve az energiatermelésre. A kettős láncú nukleinsavak (szintén polimerek) lehettek képesek a replikálódásra, olyan információk tárolására, amelyek a tulajdonságok átörökítéséhez szükségesek. Azok a koacervátumok szaporodhattak, amelyek át tudták örökíteni tulajdonságaikat "utódaikra".

A progenóta (proto-sejt) kialakulása

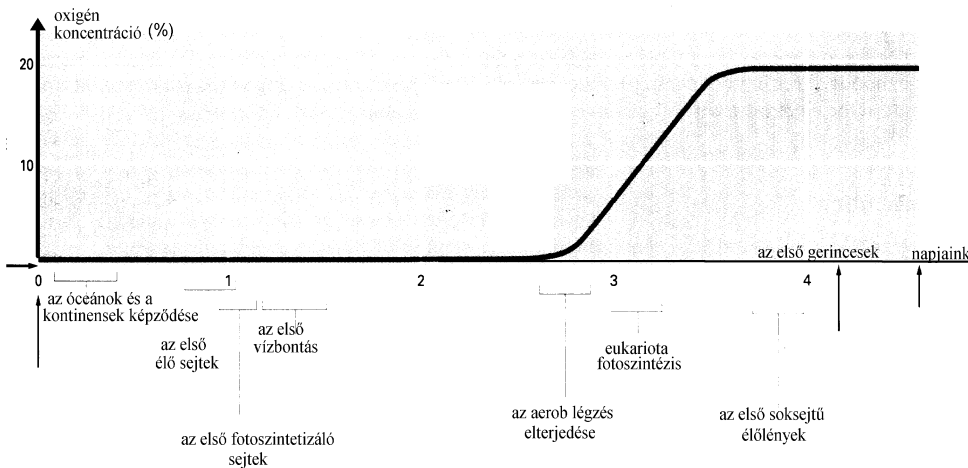
A DNS, valamennyi mai élőlény örökítő anyaga, membránnal körbezárt sejtyszerű struktúrában alakulhatott ki, RNS minta alapján. A progenóta (a proto-sejt) az első olyan élőnek tekinthető élőlény, amelyet membrán határolt, DNS-t (vagy az újabb elképzelések szerint előbb csak RNS-t) tartalmazott és tulajdonságait átörökítette utódaira. Az első progenóta kb. 4 milliárd éve képződhetett. A tudomány mai álláspontja szerint egyetlen egy progenóta az őse minden, a Földön valaha élt élőlénynek. Az örökítő anyag változásai, a mutációk biztosították a progenóta leszármazottainak azt a változatosságát, amelyek közül

természetes szelekció révén válogatódott ki az élet- és szaporodás-képesebbek.

A Föld képződésétől a progenóta kialakulásáig kb. 500 millió év telhetett el: volt esély a szerves vegyületek képződésére, a polimerek kialakulására, koncentrállódására, a különféle szerves anyagok kombinálódására: sok, egyenként kis, de nem nulla valószínűségű esemény bekövetkeztére. A közös eredetet egyebek mellett olyan tények bizonyítják, mint hogy minden élőlény sejt(ek)ből áll, minden élőlény örökítő anyaga DNS és sejtjeiket hasonló jellegű szerves vegyületek alkotják. Az élőlények eredetére vonatkozó, az utóbbi két évtized során felhalmozódott molekuláris biológiai/genetikai bizonyítékokról a kurzus utolsó előadásán lesz majd szó.

A korai életfeltételek

Ózonréteg hiányában a földfelszín erős ultraibolya sugárzás érte, amelynek roncsoló hatása miatt élet csak árnyékban, iszapban vagy 5 méternél mélyebb vízben keletkezhetett. Az első élőlények oxigénmentes körülmények között éltek, *anaerobok* voltak. Anyag- és energiaforrásaik az óceán szerves molekulái voltak.



1.4. ábra. A légköri O₂-koncentráció változása a Föld története során, néhány fontosabb esemény feltüntetésével.

A szerves anyagok lassú fogytával elszaporodhattak azok az élőlények, amelyek az energiát (ATP-t) szerves anyagok (elsősorban a vulkanikus tevékenység miatt bőségesen rendelkezésre álló H₂S) oxidálásával, és/vagy a fényből nyerték. A már említett 3,8 milliárd éves maradványok is *anaerob fotoszintetizáló baktériumok* voltak. Az elektronakceptor azonban nem víz volt - ne felejtjük el, hogy a víz bontása során felszabaduló O₂ toxikus az anaerob élőlényekre! Ehhez más szerves molekulákat (pl. H₂S) használtak fel. Ezek az élőlények tehát képesek voltak szénforrásként CO₂-t használva, csak szerves anyagokból kiindulva szerveset készíteni. (Részletesebben lásd a 2. előadás anyagát.)

Elektronakceptoroként (és hidrogénforrásként) a vizet először az O₂ jelenlétét már eltűrő *cianobaktériumok* kezdték használni, kb. 3,2 milliárd éve (1.4. ábra). A cianobaktériumok által a vízből felszabadított O₂ csaknem 2 milliárd éven át nem halmozódhatott fel jelentősen a légkörben, mert az óceánok vizében oldott

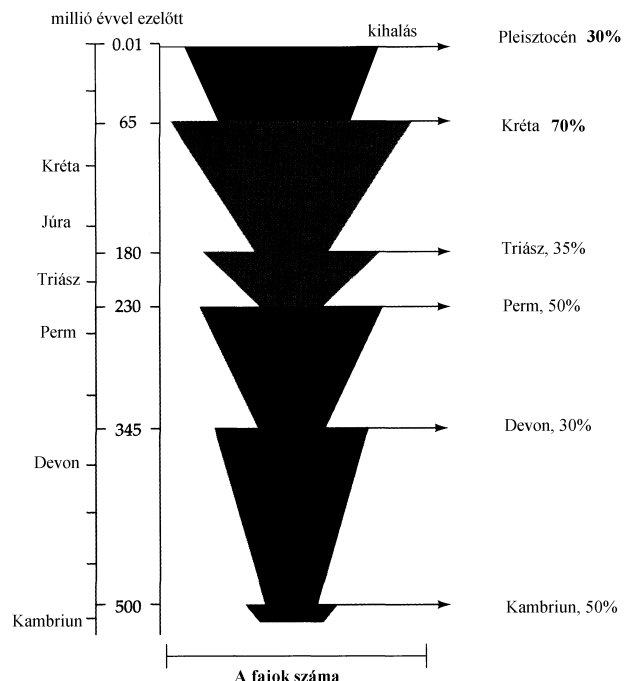
nagy mennyiségű Fe²⁺-t oxidálta Fe³⁺-á. A légkör O₂-koncentrációja csak kb. 1,5 milliárd éve kezdett nőni. Az O₂-koncentráció növekedtével nyílt lehetőség arra hogy az O₂ is elektronakceptoroként működhesen (mint az eukarióta élőlények mitokondriumában), és kialakulhasson az energiát hatékonyan termelő *aerob légzés*.

Ráadásul a légköri O₂ egy része az ultraibolya sugárzás hatására ózonná (O₃) alakult. Az ózon hatékonyan abszorbeálja az ultraibolya sugárzást, 500-600 millió éve lehetőséget teremtve az élőlények megtelepedésére a tengerek és a föld felszínén.

A Földet kb. 1,6-2 milliárd évvel ezelőttig csak prokarióta (sejtmag nélküli) élőlények népesítették be. Az *eukarióta* (valódi sejtmagvas) élőlények fejlődése valószínűleg csak ezután kezdődött. A sejtszervecskék, köztük az endoszimbionta eredetű kloroplasztok és a mitokondriumok kialakulása fontos esemény az evolúció folyamán. A soksejtű élőlények (~5-600 millió évvel ezelőtt) kialakulása után jött létre az élőlények mindannyiunk által jól ismert sokfélesége.

A „közel múlt” életfeltételei

Az életfeltételek bár lassan, de folyamatosan változnak a Földön. Mintegy 550 millió éve a szárazföld hat, az egyenlítő körül elhelyezkedő kontinensre tagolódott. Kb. 200 millió éve ezek egyetlen kontinenssé (Pangea) egyesültek. A Pangea később újra kontinensekre hasadt, amelyek az idők során elkülönültek, és lassan, de ma is sodródnak, torlódnak.



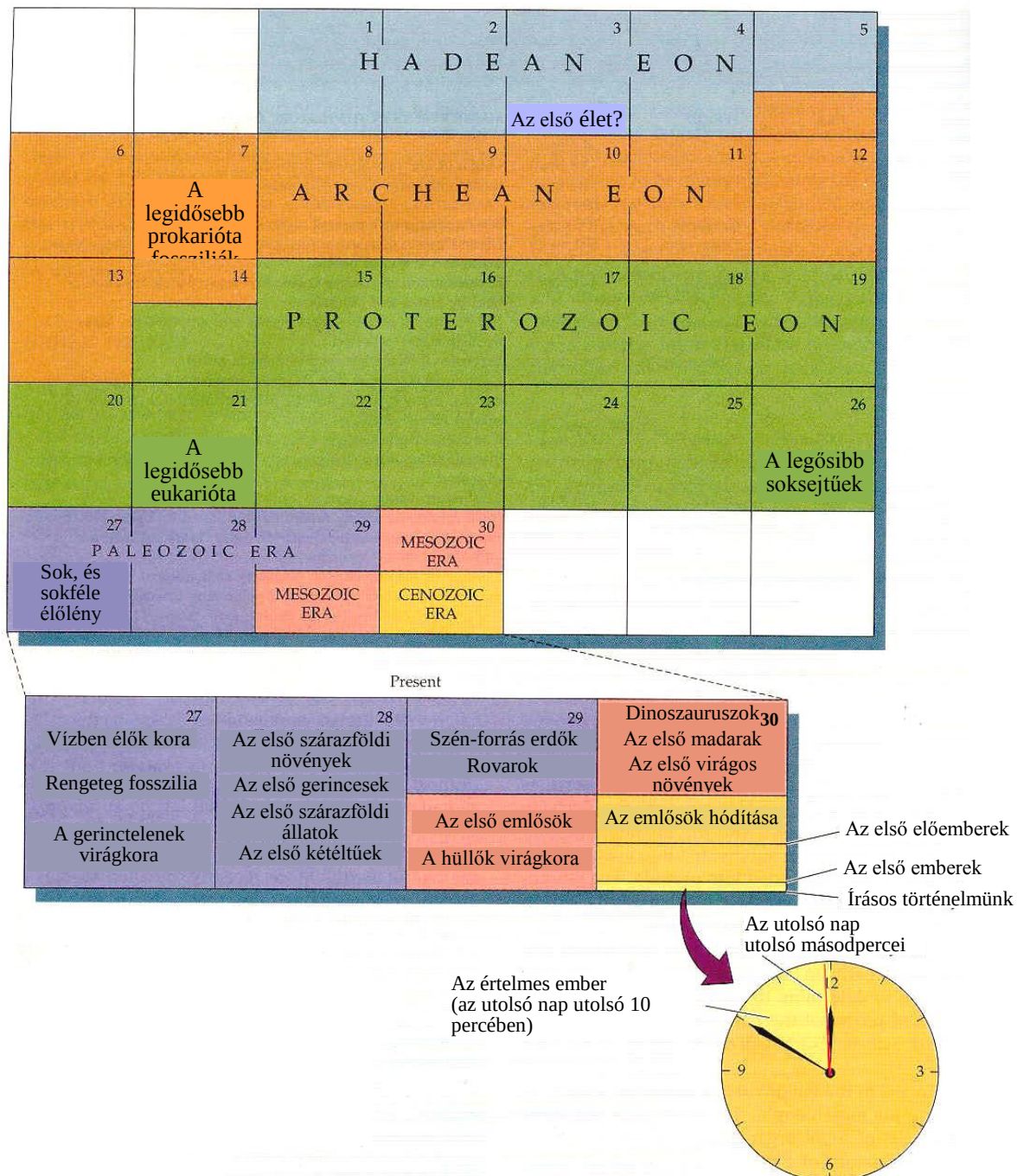
1.5. ábra. Az elmúlt 500 millió év során hatszor haltak ki tömegesen fajok -ezek a tömeges kihalások jelzik a földtörténeti korok határait.

Az évmilliók során változott (és változik ma is) a Föld klímája is. A Földnek a világűrben történő mozgása felmelegedésekhez, és olyan lehűlésekhez vezet, mint pl. a jégkorszakok. (Ma is az átlagosnál hidegebb korszakban élünk.)

Jelentős (és gyors!) lehűléshez vezettek a vulkánkitörések, és meteor-óriásokkal történt ütközések. A fossziliák tanulása alapján a Föld története során ezek a hirtelen bekövetkezett lehűlések fajok tömeges kihalásához vezettek (1.5. ábra). Mára a Föld története során valaha élt fajok több mint 99%-a kihalt. A környezeti feltételekhez alkalmazkodó, szaporodni képes élőlények élhettek tovább és származhattak tőlük utódok.

Evolúció egyhónapos skálán

Ha a Föld történetét egyetlen hónapba sűrítve szemléltetjük, egy nap kb. 150 millió évnél felel meg (1.6. ábra). A Föld képződését követően a szerves anyagok kialakulása és szerveződése után a progenóta, az első élőlény az 5. nap környékén alakulhatott ki. A legidősebb prokarióta fossziliák a 7., az eukarióták csak a 19-20. (fossziliák csak a 21.), a soksejtűek a 26. napról származnak. Az első szárazföldi növények és az állatok csak a 28. napon bukkantak fel. A dinoszauruszok a 29. nap délutánján élték fénykorukat, amikor az első emlősök is megjelentek. Az utolsó nap feljőttek ki a madarak és a virágos növények, késő délutánján az emberszábasú majmok. Az értelmes ember (*Homo sapiens*) a 30. nap utolsó tíz percének terméke. Írásos történelme pedig mindössze néhány másodpercnyi.



1. 6. ábra Az „élet kalendáriuma” harminc napba sűrítve.

A SEJTALKOTÓ MAKROMOLEKULÁK

1. Lipidek. Apoláros oldószerekben (pl. benzolban) oldódó, polárosokban (pl. vízben) nem oldódó, meglehetősen különböző kémiai szerkezetű molekulák. Funkcióikat illetően is szerteágazó természetű vegyületek. Különböző típusaik energiát tárolnak, membránok alkotói, hormonok, stb. A zsírok (egyszerű lipidek vagy trigliceridek) glicerín és zsírsavak (palmitin-, sztearin-, olaj- és linolsav) észterei, hatékony energiatárolók.

A foszfolipidekben a glicerín molekula két zsírsavval kapcsolódik, a harmadik zsírsav helyett vagy egy foszforsav-maradék (a foszfatidokban), vagy egy foszforsav-maradékon át egy töltött molekula kapcsolódik (a foszfatidil-kolinban például kolin, a foszfatidil-etanolaminban etanolamin). A foszfolipidek élettani szempontból rendkívül fontos tulajdonsága, hogy vannak hidofil és hidrofób részeik is. A biológiai membránok alapvető szerkezete két foszfolipid rétegből áll: a belső, hidrofób részét a hidrofób zsírsavláncok, két felszínét pedig a hidofil részek alkotják.

Az egyéb lipidek közül megemlítiük a karotenoidokat, a fényelnyelő pigmentek egyik családját. A β -karotin növényekben az egyik fényenergia-elnyelő pigment, egyben az A vitamin előanyaga. Az A vitamin egyik származéka (retinál) pedig az állatvilágban a fényérzékelésre általánosan használt pigment, a rodopszin egyik komponense.

A szteroidok némelyike membránalkotó, mások hormonok. A koleszterin, a membránok egy fontos összetevője, részben a májban képződik, részben a táplálékból (tejből, vajból és állati eredetű zsírokból) szívódik fel. A koleszterin-tartalom növekedése általában csökkenti a membránok fluiditását. A koleszterin az epesavak előanyaga is. A szív ereiben történő lerakódása ateroszklerózishoz, érlemezsedéshez vezethet. Koleszterinből képződnek a szteroid hormonok (tesztoszteron, ösztrogének, kortizon, ekdizon). A D vitamin is egyfajta szteroid, a kalcium-felszívódás és lerakódás fontos szabályozója.

2. Szénhidrátok. Az energiatárolásban és vázanyagként is fontos szerepet betöltő, szén, hidrogén és oxigéntartalmú, heterogén méretű molekulák. A legismertebb monoszacharidok a hat szénatomos glükóz (a fotoszintézis legfontosabb terméke), a fruktóz, a mannóz és a galaktóz, az ötszénatomos ribóz és dezoxiribóz (a nukleinsavak egyik alkotója). A diszacharidok közül a tejcukor (laktóz) és a háztartásokban használt répacukor (szacharóz), a poliszacharidok közül az állati sejtekben energiát raktározó glükogén, valamint a növényi sejtekre jellemző keményítő és cellulóz a legismertebb.

3. Fehérjék. Aminosavakból peptid-kötésekkel képződő polimerek. Az aminosavak oldalláncok alapján lehetnek hidrofób természetűek (valin, leucin, izoleucin, fenilalanin, metionin és prolin), hidrofilok (aszparaginsav, glutaminsav, lizin, arginin, hisztidin) vagy semlegesek (glicin, alanin, szerin, cisztein, triptofán, tirozin, treonin, aszparagin, glutamin). A fehérjék fontosabb funkciói a következők: lehetnek enzimek, szerkezeti elemek, hírvivő, jeltovábbító

molekulák, immunglobulinok és motorfehérjék. A fehérjék elsődleges szerkezetét az őket alkotó aminosavak sorrendje határozza meg. Másodlagos szerkezetüket olyan jellegzetes struktúrák adják (mint például az α -hélix, a β -lemez), amelyek alapjai az aminosav-oldalláncok közötti kölcsönhatások. A harmadlagos szerkezetet a fehérje-molekula térbeli rendeződése jelenti. A negyedleges szerkezet alapja a különböző fehérjék asszociációja funkcionális komplexekké.

4. Nukleinsavak. Kétféle típusát ismerjük: a DNS-t, és az RNS-t. Későbbi előadásokban szerkezetükről, funkciójukról még sok szó esik majd.

A sejtalkotó makromolekulák természetével részletesebben a biokémia tantárgy foglalkozik.

A SEJTEK KÖZÖS TULAJDONSÁGAI

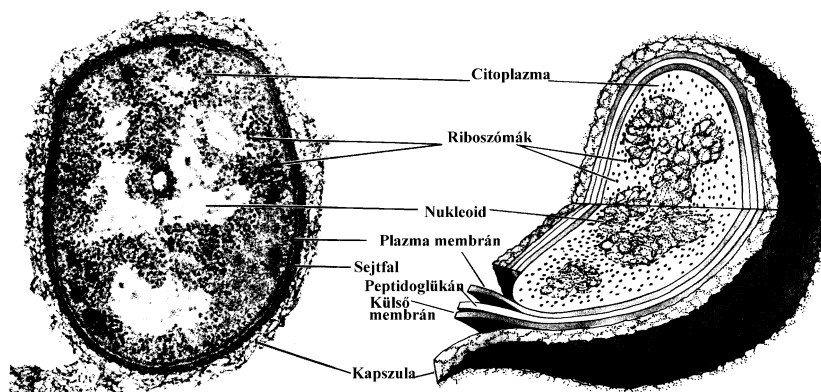
A sejt az élőlények szerveződési és funkcionális egysége. Minden élőlény sejt(ek)ből áll, és a ma ismert körülmények között sejt csak sejtől származik. Általában kicsik (térfogatuk $1-1000 \mu\text{m}^3$) – de vannak igen nagyok is, mint például a madarak tojásának „sárgája”, vagy az idegsejtek. Energiát vagy energiahordozó anyagokat használnak fel, és szelektíven vesznek fel és adnak le anyagot környezetükből és környezetükbe. A sejtek a genetikai információ kifejeződésének helyei.

A PROKARIÓTÁK

Egysejtű élőlények, a baktériumok alkotják ezt a csoportot. Nincs jól meghatározott, membránnal határolt sejtmagjuk (nevük is ezt jelenti), de egyéb, membránnal határolt sejtsejtszervecskéik sem. Legtöbbjük szabadon él, de vannak kolóniaképzők is közöttük. Az átmérőjük kb. $2 \mu\text{m}$, tömegük 10^{-12} gramm, egy átlagos állati sejt ezrednyi része. Generációs idejük rövid: a közönséges bélbaktérium (*Escherichia coli*) 37°C -on kb. 20 percenként osztódik. Alakjuk szerint legtöbbször gömbszerűek (kokkusok), bacilusok (pálcika), spirálisan tekeredők (spirocheták) vagy görbültek (vibrió). Belső váz híján plazmamembránjukon kívül védő és egyfajta külső vázat biztosító sejtfaluk van. Minthogy a baktériumokra jellemző összetételű sejtfalnak nincs eukarióta megfelelője, a baktériumokat sejtfaluk képződésének bizonyos antibiotikumokkal történő megakadályozásával is el lehet pusztítani.

A baktériumoknak két nagy csoportja ismert: az arche- (ős-), valamint az eu- („valódi”) baktériumok (ma már tudjuk, hogy ez az elnevezés hibás: valójában az archebaktériumok nem „ősibbek”). Sőt, az archebaktériumokat az utóbbi évtizedekben az eubaktériumoktól való különbözőségük miatt teljesen külön leszármazási csoportba sorolják.

Az *eubaktériumok* (általában ezeket nevezik egyszerűen „baktérium”-nak) sejtfalában murein (peptidoglükán), egyetlen, keresztbe kötött aminocuk-



1.7. ábra. Egy baktériumsejt szerkezete.

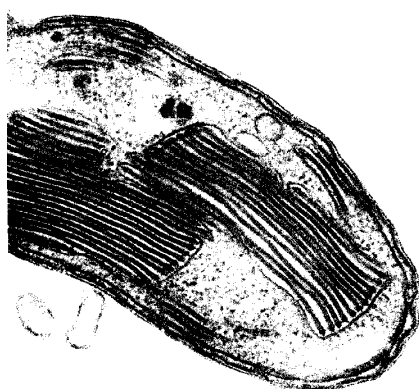
rokból képződött óriásmolekula található. A sejtfal szerkezete (illetve az ettől függő festékkötési képesség) alapján különböztetik meg a Gram-negatív és Gram-pozitív baktériumokat. Egyes eubaktériumok falát még védelmet biztosító nyálkás poliszacharidból álló kapszula is borítja (1.7. ábra).

Plazmamembránjuk, mint minden sejtben, elválasztja a környezettől, szabályozza az anyagáramlást. A fotoszintetizáló baktériumokban a plazmamembrán betüremkedik, réteges szerkezetet alkot, benne fotoszintetikus pigmentekkel (legtöbbször bakterio-klorofillal, a klorofill egy típusával; 1.8. ábra).

Vannak olyan baktériumfajok, amelyek ostorokkal, flagellumokkal változtatják helyüket. A flagellumok egy flagellin nevű fehérjéből állnak, mozgató szerkezetük turbinára emlékeztet (1.9. ábra) – teljesen különböznek a a szintén flagellumnak nevezett eukarióta ostor csillószervezetétől!

A pílusok a flagellumoknál hosszabb, üreges nyúlványok, némelyik baktériumfajban a sejtek tapadását segítik egy másik baktériumhoz, például a baktériumok párosodása, a konjugáció során (vagy akár az eukarióta sejtekhez, például fertőzéskor).

A nukleoid a citoszol nukleinsavakban és fehérjékben gazdag része, a baktérium kör alakú kromoszómáját tartalmazza (az *Escherichia coli* bélbaktérium egyetlen sejtje 2 µm "hosszú" és 0,8 µm "vastag" – míg kromoszómája 0,9 mm (!) hosszú).



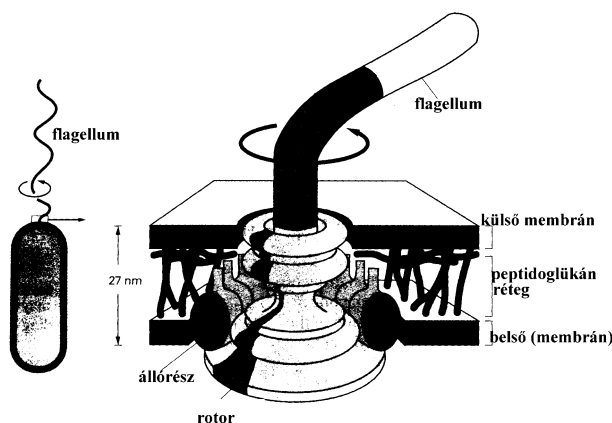
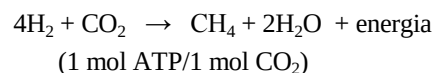
1.8. ábra. Sejthártya-betüremkedések egy cianobaktériumban.

Az archebaktériumok sejtfala nem mureinből áll, ezért penicillinre érzéketlenek. Plazmamembránjukat

alkotó lipidek szerkezete teljesen eltérő, és fehérjeszintézisük is különleges (emiat például sztreptomycinre is érzéketlenek). Mindig anaerob körülmények között, nagy sótartalmú (halofilek), a szokásosnál magasabb hőmérsékletű (termofilek), vagy extrém savas közegben (acidofilek) élnek, és vannak metánképző fajaik is. A metánképző baktériumokból különösen sok él a fűevő emlősök emésztőrendszerében.

Becslések szerint a szarvasmarhák emésztő-rendszerében élő metánképző baktériumok évente 2 milliárd tonna metánt termelnek (a metán a CO₂ mellett az üvegház hatás fő okozója).

A metánképző archebaktériumok a következő reakció alapján termelnek energiát anaerob környezetben:



1.9. ábra. A baktérium ostorát (flagellum) forgató „turbina”.

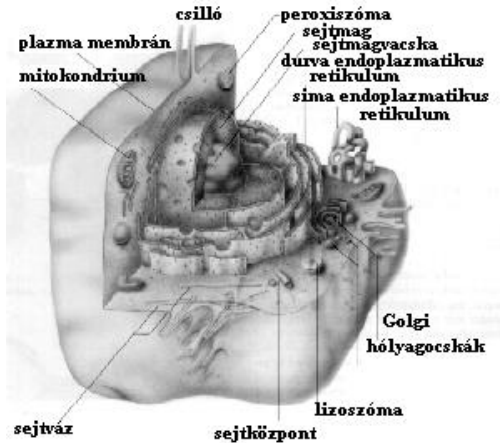
AZ EUKARIÓTÁK

Az eukarióták sejtjeiben jól elkülönülő sejtmag(vak) van(nak), és erősen jellemző a kompartmentalizáció: bennük a különféle biokémiai folyamatok térben elkülönülten zajlanak (1.10. és 1.11. ábrák). A citoplazma a sejtmag és a plazmamembrán (sejthártya) közötti állomány, részei a citoszol, amely a citoplazma folyékony komponense, és az organelumok (sejtszervecskék), melyek jellegzetes feladat elvégzésére specializálódott képződmények. A legtöbb organelumot membrán is burkolja, ezek szabályozzák a molekulák be-és kiáramlását, enzimeket tartalmaznak, védett közeget biztosítanak az adott sejtszervecskében zajló folyamatoknak.

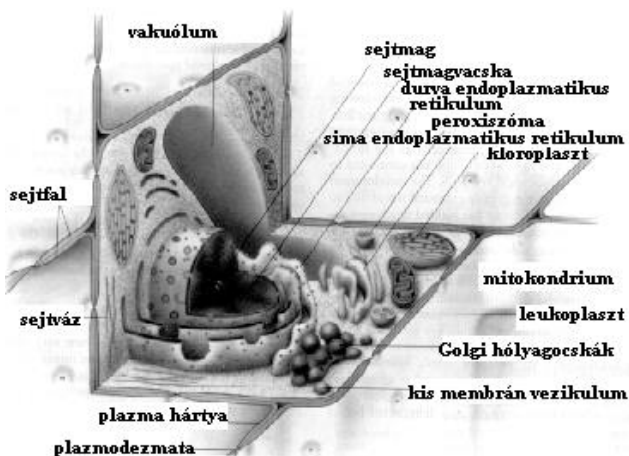
A sejtmag. Átmérője változó lehet, kb. 5-10 µm. Az örökítő anyag tárolásának, valamint az RNS-szintézisnek a legfőbb helye. A sejtmagot sejtmaghártya választja el a citoplazmától, amely kettős membrán, rajta sejtmagpórus-komplexekkel (1.12. ábra). A pórusokon

át történik a sejtmag és a citoplazma közötti anyagáramlás. A pórusok átmérője „csukott” állapotban kb. 9 nm, de például a riboszóma-alegységek kijutásakor 26 nm-esre nyílnak. A maghártya külső rétege az endoplazmatikus retikulummal folyamatos.

A *kromatin*, a kromoszómák anyaga a nyugalomban lévő sejtben a sejtmagot kitölti (1.12. ábra), de a sejtosztódások előtt mikroszkóppal jól látható képződményekké (úgynevezett metafázisos kromoszómákká, lásd később) szerveződik.



1.10. ábra. Egy állati sejt sematikusan.

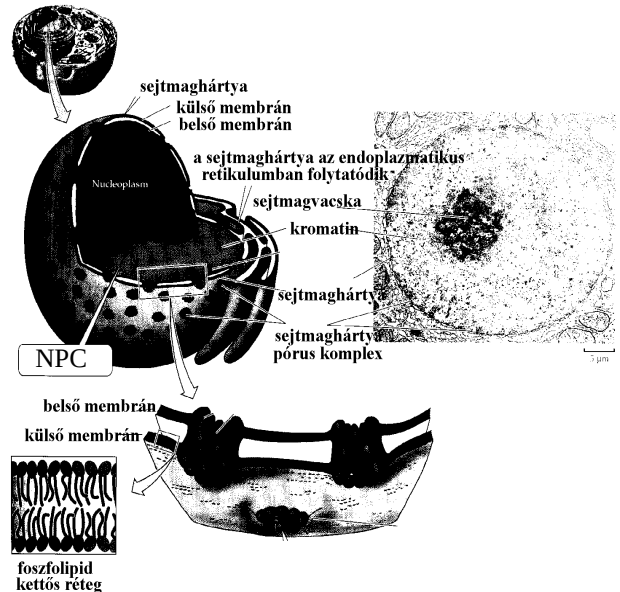


1.11. ábra. Egy növényi sejt sematikusan.

Mitokondrium

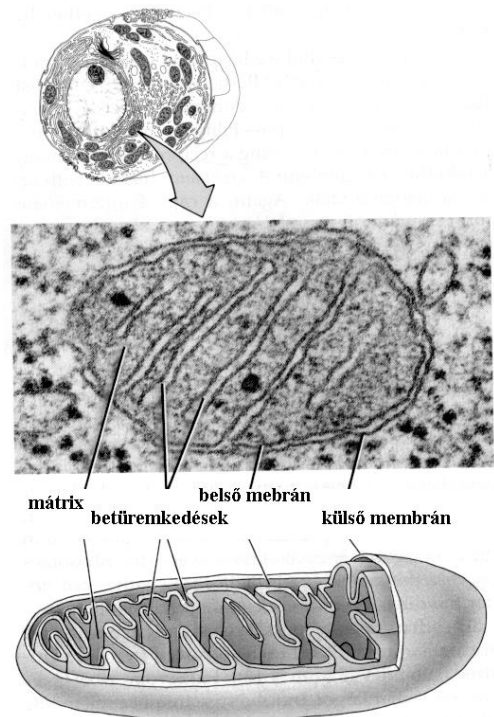
Az energiatermelő sejt szervecskék egyike (1.13. ábra). Mérete 2-8 μm , mint sok baktériumé. Két membrán burkolja: a külső sima, a belső betüremkedik a mitokondrium belsejébe. A mitokondriumok O_2 felhasználásával a sejt légzés során energiát termelnek, amely ATP-ben raktározódik. A mitokondriumok száma sejtenként egy és néhány százezer között változhat. Saját DNS-ük van, egy vagy néhány kópiában. A mitokondriális DNS (mtDNA) gyűrű alakú, és sokban hasonlít a baktériumok DNS-ére. A mtDNA a mitokondriális rRNS-eket, tRNS-eket és néhány mitokondriális fehérje szintéziséhez szükséges mRNS-t kódol. Az általánosan elfogadott elmélet szerint a mitokondriumok bakteriális eredetűek, *endoszimbiózis* eredményeként maradtak fenn az eukarióta sejtben (az endoszimbiózis egy élőlény létezése egy másik élőlényen belül, mindkét fél

hasznára.) A mitokondriumok ősei valószínűleg Gram-negatív, a ma élő alfa-proteobaktériumok osztályába tartozó aerob, heterotróf (lásd 2. fejezet) baktériumok voltak.



1.12. ábra. A sejtmag. NPC = sejtmagpórus- komplex.

A *sejtmagvacscsa* (nukleolusz) a sejtmagon belül jól látható képződmény, száma fajonként állandó. A sejtmagvacscsa a riboszómák összeszerelésének helye, a DNS rRNS-t kódoló szakaszai, rRNS (riboszomális-RNS), valamint a riboszomális fehérjék találhatóak itt.



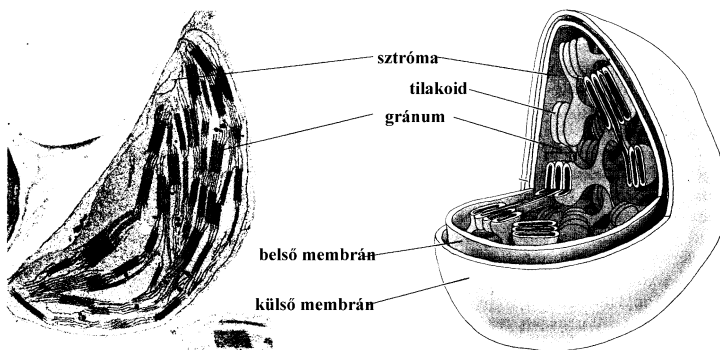
1.13. ábra. Egy mitokondrium felépítése.

Plasztiszok

A plasztiszok növényekben található sejt szervecskék (1.14. ábra). Méretük, 3-5 μm . A plasztiszok közül a zöld *kloroplasztok* a legismertebbek.

A kloroplasztokban történik a fotoszintézis. Egy sima külső membrán burkolja őket, belső membránjukról pedig pénztekerccsszerűen elrendezett zsákokcák (*tilakoidok*) fűződnek le, hasonlóképpen, mint a cianobaktériumokban (1.8. ábra). A tilakoidok tartalmazzák a fotoszintetikus pigmenteket. A kloroplasztoknak a mitokondriumokhoz hasonlóan saját DNS-ük van, szintén gyűrű alakú. A plasztisz-DNS is rRNS-ek, tRNS-ek és néhány kloroplaszt fehérjéhez szükséges mRNS szintézisét kódolja.

A kromoplasztok színesek (vörösek, narancsszínűek és sárgák). A leukoplasztok színtelenek, keményítőt vagy növényi zsírokat tárolnak. A plasztiszok a mitokondriumokhoz hasonlóan endoszimbiózis eredményeként kerültek az eukarióta sejtbe, és a fotoszintetizáló cianobaktériumokból származtatják őket.



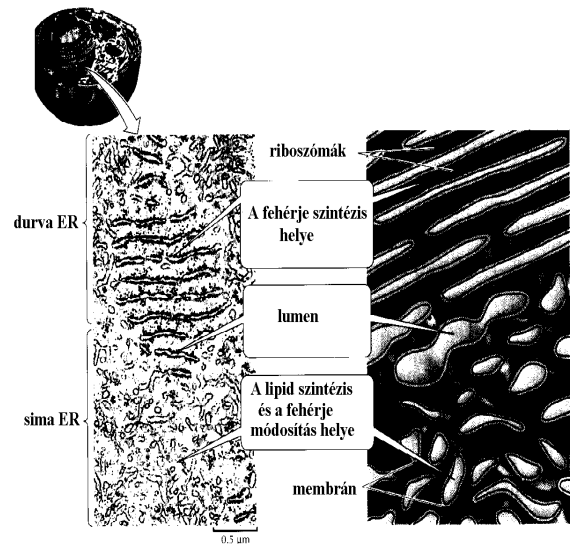
1.14. ábra. Egy kloroplaszt felépítése.

Endoplazmatikus retikulum (ER)

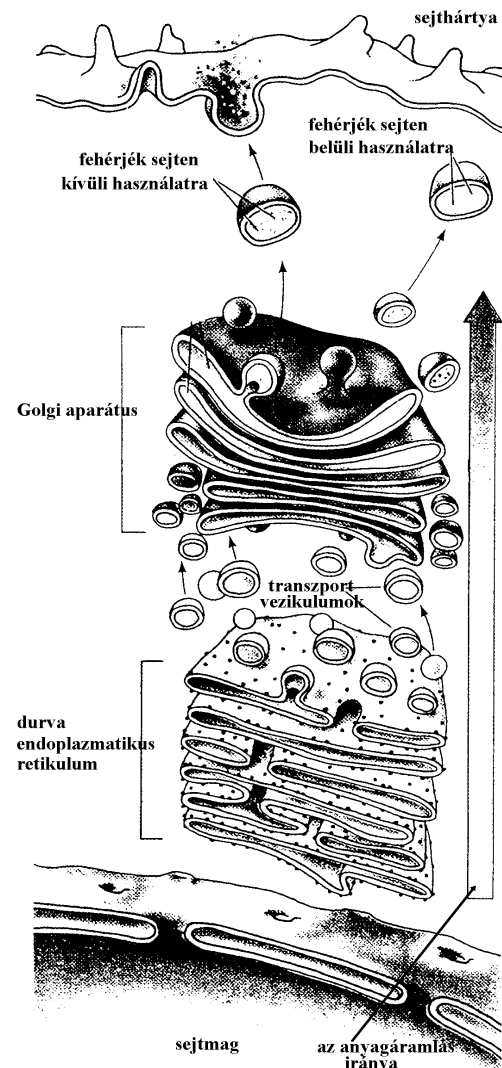
Csővek és ellaposodott zsákok összefüggő hálózata (1.15. ábra), határoló membránja a külső maghártyával folyamatos. Az úgynevezett *durva ER* (rough ER, RER) külső felszínén riboszómák ülnek (innen kapta a nevét). Olyan fehérjék szintézise történik itt, amelyek az úgynevezett szekréciós utat követik: a sejtben kívülre jutnak, vagy például beépülnek a plazma membránba. A(a citoszolban levő „szabad” riboszómákon pedig olyan fehérjék szintetizálódnak, amelyek vagy a citoszolban maradnak, vagy más sejtszervecskébe, például a sejtmagba vagy a mitokondriumba importálódnak. A RER-rel folyamatos, de riboszómáktól „mentes” *sima ER* (smooth ER, SER) fontos események helye: itt módosulhat sok, a RER-en képződött fehérje, itt történik a lipidek és a szteroid hormonok szintézise, és számos mérgefajta itt bomlik le.

Golgi-készülék

Nevét felfedezője, Camillo Golgi nyomán kapta 1898-ban. A Golgi-készülék ER-hez közelebbi „cisz-felszíne” olyan membrán-határolt hólyagocskákból, *vezikulákból* áll össze, amelyek az ER-ről fűződnek le. A túlsó „transz-felszín” elosztóállomás, az innen leváló vezikulák a fehérjéket a megfelelő rendeltetési helyükre – *exocitózissal* a sejtben kívülre, a plazmamembránba vagy a liszoszómákba (lásd később) szállítják. A két felszín között néhány lapos zsák, *ciszterna* található, bennük a cisz-transz irányban keresztülhaladó, a szekréciós utat követő fehérjék és lipidek intenzív módosítása zajlik (1.16. ábra).



1.15. ábra. Az endoplazmatikus retikulum.



1.16. ábra. Az endoplazmatikus retikulum, a Golgi-készülék és az exocitózis kapcsolata (az ábrán nem látszik, de az ER és a sejtmaghártya külső membránja egymással folyamatos).

Az *exocitózis* és az *endocitózis* anyagok kiválasztását illetve felvételét jelenti a környezetbe, illetve a környezetből vezikulák segítségével (1.16. ábra). A pinocitózis folyadék, a fagocitózis szilárd anyagok felvételét jelenti. A fagocitózis sok egysejtű lény táplálkozási módja, és soksejtűekben az immunrendszer egyes sejtjeinek fontos képessége.

A vezikulák közvetítésével zajló anyagtranszportról, a szekréciós útról és az endocitózisról a második félév során bővebben lesz szó.

Lizoszómák

A Golgi-készülékből származó, 1-3 μm átmérőjű, erősen savas (pH 4,5) beltartalmú sejt szervecskék. A *lizoszómákat* egyrétegű membrán burkolja. Legalább negyven különféle, savas közegben hatékony emésztőenzim van bennük. A fehérjék, nukleinsavak, lipidek és poliszacharidok bontását végzik.

A növényi sejtek általában egyetlen, óriási *vakuóluma* a lizoszóma megfelelője. Különböző anyagok vizes oldataival töltöttek, egyrétegű membránnal burkoltak. Gyakran tartalmaznak toxikus vagy kellemetlen ízű anyagokat. Növényi eredetű gyógyszereink nagy hányada a vakuólumokban raktározott anyagokból származik. Vannak tartalék-tápanyagokat raktározó vakuólumok is, és vakuólumok tartalmazzák például a szíromlevelek színanyagát.

Peroxiszómák

A peroxiszómák 0,2-1,7 μm átmérőjű, szintén egyetlen membránnal burkolt organellumok. A kémiai reakciókban elkerülhetetlenül képződő toxikus peroxidokat, például a H_2O_2 -t bontják, és zsírbontás is zajlik bennük. A glyoxiszómák speciális peroxiszómák, a csíranövények sejt szervecskéi. Bennük alakulnak át a magban elraktározott lipidek szénhidrátokká.

Sejtváz

Olyan fehérjék együttese, amelyek (i) biztosítják a sejt alakját, (ii) a sejten belüli elmozdulásokban és (iii) magának a sejtnak a mozgásában játszanak szerepet. Alkotó molekuláik típusai, méretük és funkciójuk alapján három sejtvázalkotó ismeretes: a *mikrotubulusok*, a *mikrofilamentumok* (az aktinváz) és az *intermedier filamentumok*.

A *mikrotubulusok* 24 nm átmérőjű, hosszú, lyukas, el nem ágazó csövecskék. Egy-egy α - és β -tubulinból álló tubulin dimerekből képződnek polimerizációval. Szerepük alapvető a sejtosztódás során az úgynevezett orsófonalak kialakulásában, az idegsejtek axonjának és dendritjeinek képződésében és a bennük zajló transzportban, a csillók és az ostorok felépítésében, valamint a sejten belüli anyagtranszportban. A sejten belüli mikrotubulus-hálózat legtöbbször a *sejtközpontból*, a centroszómából indul ki.

A *mikrofilamentumok* vagy aktin filamentumok 7-8 nm átmérőjű, aktin monomerekből felépülő citoplazmaalkotók. A sejt mozgásának, alakváltozásainak fontos

részvevői. Olyan folyamatokban vesznek részt, mint az izomösszehúzódás, a citoplazma-áramlás, vagy a sejtek szétválása a sejtosztódások végén. A mikrofilamentumok nemcsak a mozgások, hanem a sejtalk stabilizálásának is fontos elemei.

Az *intermedier filamentumok* 8-12 nm átmérőjű, fehérjék polimerizációjával felépülő rostos, kötélszerű képződmények. Stabilizálják a sejt struktúráit, rugalmasságot biztosítanak, de ellenállnak a külső erőknek, elsősorban nagy szakítószilárdságuk révén. Legismertebbek a *keratinból* felépülő intermedier filamentumok. Belőlük jönnek létre például a haj, a pata vagy a bőr külső rétegének alkotói. A *laminok* a sejtmaghártyához belülről kapcsolódva rögzítik a sejtmagot. Vannak olyan intermedier filamentumok, amelyek a jellegzetes harántcsíkolt izomszerkezetet stabilizálják.

A sejtváznak az intracelluláris folyamatokban illetve a sejtek alakváltozásában és mozgásában betöltött szerepe szintén a második félévben lesz részletesebben bemutatva.

Eukarióta sejtfal

A sejtfal az eukariótákban is a plazmamembrán külső felszínén képződik bizonyos egysejtűekben, gombákban és növényekben. Jelenléte (a sejtre gyakorolt nyomása, a turgor miatt) szabályozza a víz be- és kiáramlását. De figyellem, az állati sejteknek nincsen sejtfala!

Növényekben elsősorban cellulóz, lignin és szuberin alkotja. A növényi sejtek között a sejtfalon átvívelő plazmahidacsok, úgynevezett plazmodezmaták teremtenek kapcsolatot (1.11. ábra). A gombák sejtfalát kitin alkotja.

A többsejtű élőlények kialakulása

A valódi soksejtűek kialakulása kb. 5-600 millió éve kezdődött, a légkör oxigéntartalmának növekedését követően (1.4. ábra). A többsejtű élőlények az eukarióta egysejtűekből fejlődtek, a legvalószínűbb, ma elfogadott mechanizmus szerint egyetlen sejt utódsejtjei együtt maradtak, kolóniát képeztek, majd differenciálódtak. A sejtek közötti munkamegosztás biztosította a kolónia jó alkalmazkodó képességét. A mai is élő *Volvox* zöldalga sejtjei hasonló társulásban élnek. A soksejtűség olyan, korábban ismeretlen génfunkciók kialakulását feltételezi, mint amilyenek például a sejtek együtttartásához, kommunikációjához vagy a sejt differenciációhoz szükségesek.

ÖSSZEFOGLALÁS

A korai földi körülmények alkalmasak voltak arra, hogy szerves anyagok képződjének, szerveződjenek. Nagyon valószínű, hogy a Földön valaha élt minden élőlény egyetlen élőnek tekinthető organizmus, a progenóta leszármazottja. Az élőlények sokféleségének az örökítő anyag, a DNS változékonysága és a változó életfeltételeket képviselő természetes szelekció az alapja.

A sejt minden élőlény létezésének elemi alapegysége. A sejtek közös tulajdonsága, hogy bennük jellegzetes felépítésű makromolekulák látnak el szerkezeti, enzimatikus és információt tároló feladatokat. A prokarióta sejtek egyszerűbb (de nem kevésbé hatékony!) élőlények, az eukarióták a kompartmentalizáció következtében bonyolultabb szervezettségűek. Mindkét sejtípus az evolúció győztese: olyan funkciók ellátására alkalmasak, amelyek kb. 4 milliárd éve biztosítják az élet folyamatosságát a változó életfeltételek közepette.