

MEMBRÁN NANOCSÖVEK

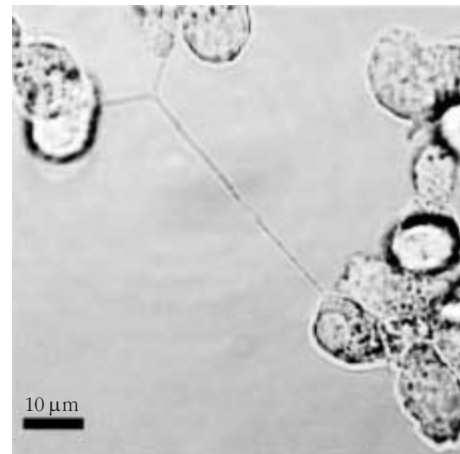
Az élő sejtek felépítésüknél fogva két alapvető csoportra oszthatók: a sejtmagot nem tartalmazókra (prokariótákra vagy más néven baktériumokra), valamint a sejttaggal rendelkezőkre (eukariótákra, ahová többek között az összes többsejtű élőlény sejtjei is tartoznak), *1. ábra*. Ezen utóbbi csoport tagjainak további jellegzetessége, hogy bennük különféle sejt szervecskék találhatók, amelyek különböző biológiai feladatok ellátására szakosodtak. A sejt szervecskék általában nagy mennyiségű membránt (a sejt hárfához hasonló felépítésű, néhány nanométer vastagságú lipid kettősréteget) tartalmaznak, hiszen a biokémiai feladatokat végző fehérjék jelentős része membránhoz kötődve működik. Ezek a membránstruktúrák meglehetősen nagy dinamikus alakváltozásokra képesek (a sejt életciklusa során vagy külső hatások következtében nemcsak átrendeződhetnek, de akár időnként el is tűnhetnek, majd újra felépülhetnek).

Mivel a sejt szervecskében található membránok összefülete több nagyságrenddel is meghaladhatja a sejt felületét, valamiféle kompaktifikációra szorulnak. Erre az egyik kézenfekvő lehetőség az, hogy a membránok lapos korong alakú képződmények szorosan pakolt halmazába rendeződnek (mint pl. az energiaátalakítást végző mitokondriumok belső membránja, vagy a fehérjék szintéziséért felelős durva endoplazmatikus retikulum, vagy éppen a fehérjék osztályozását végző Golgi-apparátus). Egy másik lehetőség a kompaktifikációra a mindössze néhány-szor tíz nanométer átmérőjű, de akár több mikrométer hosszúságú nanocsövek kialakítása. Ilyen nanocsövek hálózatából áll a sima endoplazmatikus retikulum. Nanocsövek találhatók a Golgi-apparátus bemeneti és kimeneti oldalán is, de még a sejt hárfáján is különféle csőszerű membránkitüremkedések (csillók, állábak stb.) fordulhatnak elő. Csak az utóbbi években derült fény arra, hogy bizonyos típusú sejtek (pl. immunsejtek, agysejtek, vesesej-

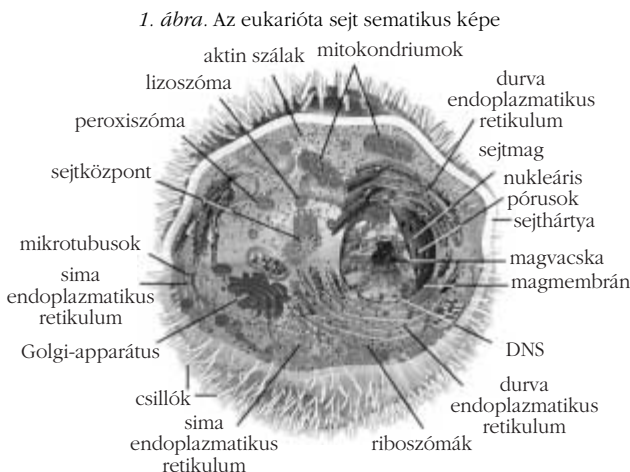
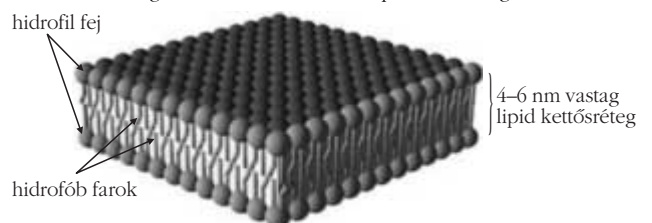
tek) képesek egymás közt nanocsöveket létrehozni, majd ezeken keresztül kommunikálni (különböző anyagok vagy jelek továbbításával), *2. ábra*. Mivel a nanocsövek gyorsabban létrehozhatók, távolabbra elérhetnek és könnyebben szállíthatók, mint a korong alakú struktúrák, feltehetően a dinamikusabban változó szerkezetű vagy a transzportfolyamatokban résztvevő membránstruktúrák esetén lehetnek hasznosak a sejtek számára.

A membrán nanocsövek kialakulása nagyon egyszerűen leírható fizikai folyamat. Ezt tekintsük át részletesen a cikk hátralévő részében. Ehhez elég annyit tudnunk a membránokról, hogy jól közelíthetők kétdimenziós összenyomhatatlan (nyújthatatlan) folyadékként. Kétdimenziósként azért, mert mindössze két vékony lipidrétegből állnak (amelyben a lipidmolekulák hidrofób farkrészke a membrán belseje felé, a hidrophil fejrészke pedig kifelé mutat), *3. ábra*, és ezek együttes (tipikusan 4–6 nm) vastagsága messze elmarad a membránfelületek egyéb jellemző méretétől (pl. a másik két irányú kiterjedésétől vagy a görbületi sugarától). Összenyomhatatlannak azért tekinthetjük őket, mert minden egyes lipid molekulára egy jól meghatározott méretű felületegység jut (1–2%-nál nagyobb felületváltozást a membrán nem bír ki). Folyadékként pedig azért kezelhetjük, mert a membrán síkjában (a sejtek működését lehetővé tevő hőmér-

2. ábra. Immunsejtek között feszülő membrán nanocsövek. Három cső a találkozásuk pontjában 120°-os szöget zár be egymással.



3. ábra. A biológiai membránokat alkotó lipid kettősrétegek szerkezete.



sékleten) a lipidmolekulák szabadon elmozdulhatnak. A viszkozitásuk egyébként körülbelül két nagyságrenddel meghaladja a vízét.

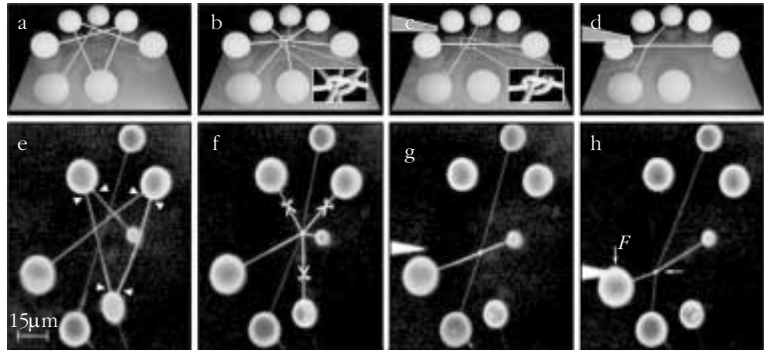
Membrán nanocsövek általában erősen lokalizált húzóerők hatására jönnek létre. Ez történhet úgy, hogy motorfehérjék (olyan molekulák, amelyek képesek a sejtvázaszálai mentén haladni) egy kis felületen megragadják a membránt, és elkezdik a membrán síkjára merőlegesen húzni, vagy pedig úgy, hogy polimerizálódó szálak elérik a membránt, és azt elkezdik nyomni. Már csak az a kérdés, hogy a lipidmembránoknak milyen fizikai tulajdonsága teszi lehetővé az ilyen hosszú cső alakú kitüremkedések kialakulását, hiszen a hétköznapi tapasztalatunk azt sugallja, hogy ha egy lapot vagy lepedőt egy pontban megragadva elkezdünk deformálni, akkor valami kúpszerű képződményt kapunk. A válasz abban rejlik, hogy a membránok deformációját alapvetően a következő két rugalmas paraméter határozza meg: a σ felületi feszültség és a κ hajlítási merevség.

Ha ugyanis egy közelítőleg sík alakú membrándarabot egy pontjában meghúzva deformálunk, akkor ehhez először is többletfelületre van szükségünk. Mivel a membrán nyújthatatlan, ezt a többletfelületet vagy a membrán (termikusan gerjesztett) gyűrődéseinek kisimítása árán szerezhetjük be, vagy a membrán egy távoli részétől vonhatjuk el (pl. letapadt felületdarabok felszakításával), vagy a membránnal esetleg kapcsolatban lévő lipidtartályból nyerhetjük ki. A lényeg, hogy ehhez energiát kell befektetnünk, amelynek felületegységre jutó nagyságát jellemzi a σ ($\approx 10^{-6}$ – 10^{-3} N/m) felületi feszültség. Bár ez a paraméter szoros analógiában áll a közismert határfelületi (pl. víz–levegő) feszültséggel, a fentiek alapján jól látható, hogy fizikai eredete egészen más.

Mivel a membrán egy kétdimenziós folyadék, az érintősíkjával párhuzamos nyírással szemben nem tanúsít rugalmas ellenállást, csak a síkra merőleges hajlítással szemben. Ez utóbbit jellemzi a κ ($\approx 10^{-20}$ – 10^{-19} J) hajlítási merevség, amely felületegységenként $(\kappa/2)C^2$ energiával bünteti a membrán C görbületű meghajlítását.

Hogy egy szemléletes képet kapjunk a nanocsövek keletkezéséről, először csak a felületi feszültségnek a felületet csökkentő hatását vegyük figyelembe. A minimális felülettel jellemzett konfigurációhoz akkor jutnánk el, amikor a membrán teljesen visszahúzódna az eredeti síkjába, és a húzási ponthoz már csak egy infinitezimálisan keskeny (zérus felületet hordozó) szállal kapcsolódna. Ahogy azonban a membrán kezd ráhúzódni erre a képzeletbeli szálra (bármilyen is legyen a kiindulási konfiguráció), a görbülete egyre csak nő. Ekkor válik meghatározó szerepűvé a hajlítási merevség, amely egy ponton megállítja az összehúzódást. Az eredmény pedig egy egyenes keresztmetszetű cső (a végeitől eltekintve), amely a membrán síkjára és a húzási pont között feszül.

Ennek a csőnek egyszerűen kiszámolhatjuk a sugarát. Annyit kell csak tennünk, hogy felírjuk egy R sugarú (vagyis $C = 1/R$ görbületű) és L hosszúságú henger rugalmas energiáját:



4. ábra. Csomó kötése membrán nanocsőre oly módon, hogy (a és e) a megfelelő három vezikulumból (membránszákból) kifutó csöveket a tövüknél fogva párosával összeolvasztjuk, majd miután az így keletkező Y-elágazások középre befutnak, (b és f) a maradék három csövet is elvágjuk (felső képsor: illusztráció, alsó képsor: kísérlet).

$$E(R, L) = \left[(\kappa/2) (1/R)^2 + \sigma \right] 2\pi R L,$$

majd minimalizáljuk R szerint. Ebből

$$R_0 = \sqrt{\kappa/(2\sigma)}$$

adódik a cső sugarára, amely tipikus paraméterértékek esetén (pl. $\sigma = 5 \cdot 10^{-5}$ N/m és $\kappa = 4 \cdot 10^{-20}$ J) valóban mindössze néhány száz nanométer nagyságú. Ha most az R_0 -ra kapott formulát visszahelyettesítjük a henger rugalmas energiájába, akkor az

$$E(R_0, L) = 2\pi \sqrt{2\sigma\kappa} L$$

kifejezésből kiolvashatjuk, hogy a nanocsövek hosszegységként

$$f_0 = 2\pi \sqrt{2\sigma\kappa}$$

energiát tárolnak, vagyis éppen ekkora húzóerő szükséges a létrehozásukhoz. Tipikus paraméterértékekre ez tíz pikonewton körüli erőt jelent, amelynek azért nagy a biológiai jelentősége, mert már akár egyetlen polimerizálódó szál vagy néhány molekuláris motorfehérje is képes kifejteni. Az, hogy a nanocsövek mentén egy ilyen állandó nagyságú feszítőerő lép fel, jól látszik három cső találkozásánál, ahol is az erők egyensúlya miatt a csövek úgy állnak be, hogy egymással páronként 120° -os szöget zárjanak be.

Végezetül érdemes megemlíteni, hogy membrán nanocsöveket és egész nanocsőhálózatokat mesterségesen (pl. optikai csipesszel vagy mikropipettával) is elő lehet állítani. Ezek segítségével tanulmányozhatjuk a membránok dinamikáját és rugalmas tulajdonságait (pl. különféle lipidek és membránfehérjék jelenlétében), amelyek nagyon fontosak a sejtekben található különféle sejtzervecskék kialakulásának és átrendeződésének megértése szempontjából. Ugyanakkor a membrán nanocsövek alkalmazásak lehetnek új nanotechnológiai eljárások kidolgozására is, például nagyon kis mennyiségű folyadékok jól kontrollált módon történő mozgatására, keverésére. A nanocsövek egyébként meglepően stabil struktúrák, még azt is könnyedén kibírják, ha csomót kötünk rájuk (4. ábra).

Derényi Imre

ELTE, Biológiai Fizika Tanszék