

Fizikai Szemle 2006/12. B3.o.

## MEMBRÁN NANOCÖVEK

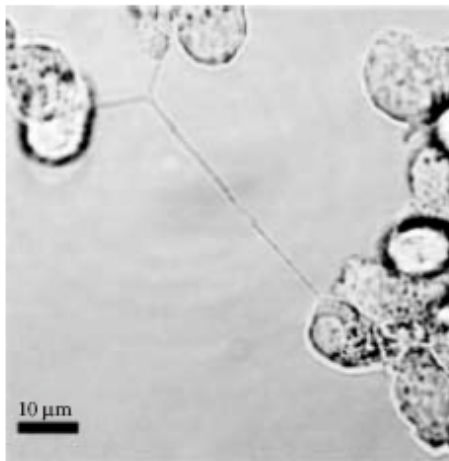
Az élő sejtek felépítésükénél fogva két alapvető csoportra oszthatók: a sejtmagot nem tartalmazókra (prokariótákra vagy más néven baktériumokra), valamint a sejttaggal rendelkezőkre (eukariótákra, ahová többek között az összes többsejtű élőlény sejtjei is tartoznak), [1. ábra](#). Ezen utóbbi csoport tagjainak további jellegzetessége, hogy bennük különféle sejt szervecskék találhatók, amelyek különböző biológiai feladatok ellátására szakosodtak. A sejt szervecskék általában nagy mennyiségű membránt (a sejt hártáéhoz 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 összfelülete több nagyságrenddel is meghaladhatja a sejt felszínét, 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 száz 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 hártáén is különféle csőszerű membránkitüremkedések (csillók, állábak stb.) fordulhatnak elő. Csak az utóbbi években derült fény arra, hogy bizonyos típusú sejtek (pl. immunsejtek, agysejtek, vesesejtek) képesek egymás közt nanocsöveket létrehozni, majd ezeken keresztül kommunikálni (különböző anyagok vagy jelek továbbításával), [2.](#)

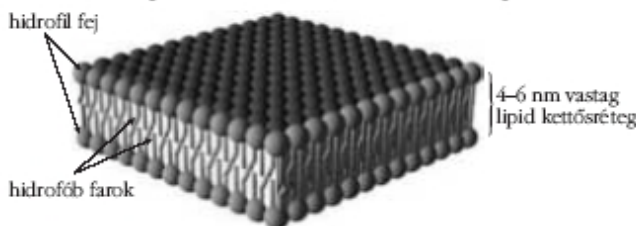
ábra. Mivel a nanocsövek gyorsabban létrehozhatók, távolabbra elérhetnek és könnyebben szállíthatók, mint a korong alakú struktúrák, feltehetően a dinamikusabban változó szerkezetű vagy a transzportfolyamatokban résztvevő membránstruktúrák esetén lehetnek hasznosak a sejtek számára.

2. *ábra.* Immunsejtek között feszülő membrán nanocsövek. Három cső a találkozásuk pontjában  $120^\circ$ -os szöget zár be egymással.



A membrán nanocsövek kialakulása nagyon egyszerűen leírható fizikai folyamat. Ezt tekintjük 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 farokrésze a membrán belseje felé, a hidrophil fejrésze 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 hőmérsékleten) a lipidmolekulák szabadon elmozdulhatnak. A viszkozitásuk egyébként körülbelül két nagyságrenddel meghaladja a vízét.

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



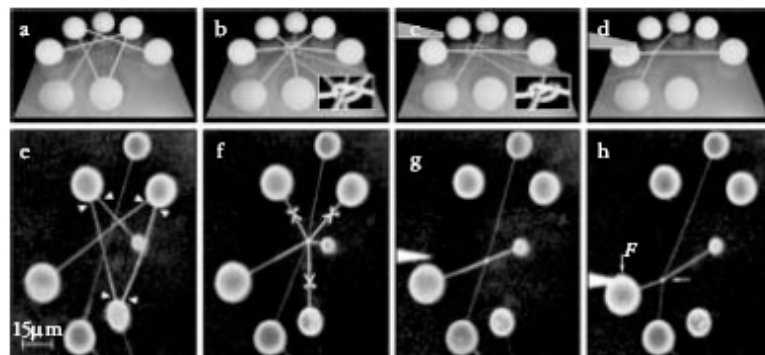
Membrán nanocsövek általában erősen lokalizált húzóerők hatására jönnek létre. Ez történhet úgy, hogy motorfehérjék (olyan molekulák, amelyek képesek a sejtvez szálai mentén haladni) egy kis felületen megragadják a membránt, és elkezdik a membrán síkjára merőlegesen húzni, vagy pedig úgy, hogy polimerizálódó 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  $\sigma$  felületi feszültség és a  $\kappa$  hajlítási merevség.

Ha ugyanis egy közelítőleg sík alakú membrándarabot egy pontjában meghúzza deformálunk, akkor ehhez először is többletfelületre van szükségünk. Mivel a membrán nyújthatatlan, ezt a többletfelületet vagy a membrán (termikusan gerjesztett) gyűrődéseinek kisimítása árán szerezhethetjük 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  $\sigma$  ( $\approx 10^{-6}$ – $10^{-3}$  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  $\kappa$  ( $\approx 10^{-20}$ – $10^{-19}$  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 szállra (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 síkja és a húzási pont között feszül.



4. ábra. Csomó kötése membrán nanocsőre oly módon, hogy (a és e) a megfelelő három vezikulumból (membránzsákból) 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).

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:

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

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 hosszegységenként

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

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  $120^\circ$ -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 sejtstruktúrák kialakulásának és átrendeződésének megértése szempontjából. Ugyanakkor a membrán nanocsövek alkalmasak 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