

## Felületi jelenségek

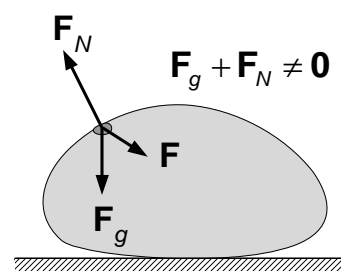
Számos tapasztalat mutatja, hogy egy folyadék szabad felszíne másképpen viselkedik, mint azt a hidrosztatika törvényei alapján várnánk. Ezt alátámasztó, könnyen megfigyelhető jelenségek például:

- víz felszínére óvatosan elhelyezett borotvapenge vagy könnyű fémpénz nem süllyed el,
- a folyadék bizonyos körülmények között stabil cseppeket képez,
- a folyadék felszíne az edény falánál nem vízszintes, hanem görbült,
- folyadékba mártott vékony csőben a folyadékszint nem azonos az edénybeli folyadékszinttel (emelkedés vagy süllyedés).

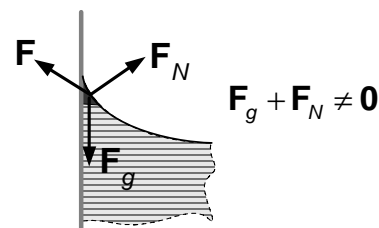
Úgy látszik tehát, hogy a felület közelében egy folyadékrezecske az eddig számba vett erők – a felületre merőleges nyomóerő és a tömegerők – mellett egyéb erők is fellépnek.

Csak így lehet például értelmezni, hogy egy sík, vízszintes felületen a higany stabil cseppet képez, hiszen a felületnél kiválasztott folyadékrezecske (a) ábra) a nehézségi erő ( $F_g$ ) és a felületre merőleges nyomóerő ( $F_N$ ) hatása alatt nem lehet egyensúlyban. Az egyensúlyhoz szükség van egy a folyadék belseje felé irányuló további erőre ( $F$ ) is.

Ugyanígy, a felületnél fellépő különleges erő fellépésével magyarázhatjuk, hogy egy üvegedény falánál az edényben lévő víz felkúszik az edény függőleges falára (b) ábra). Itt az egyensúlyhoz a folyadék és a szilárd fal találkozásánál lévő folyadékrezecske a fal felé irányuló erőnek kell fellépni.



a)



b)

Anélkül, hogy a jelenség molekuláris tárgyalásába belemennénk, megjegyezzük, hogy ezek az erők a felületnél elhelyezkedő molekulák aszimmetrikus helyzetéből adódnak. A csepp kialakulásánál például a felület egyik oldalán sűrűn elhelyezkedő folyadékmolekulák vannak, amelyeknek vonzó hatása sokkal nagyobb, mint a felület másik oldalán ritkán elhelyezkedő levegőmolekuláké. Ilyen aszimmetria következménye a folyadéknak az edényfalra való felkúszása is, csak a folyadék és a szilárd fal érintkezésénél a tárgyalt esetben a szilárd fal molekulái által kifejtett erők nagyobbak<sup>1</sup>. Ebből az értelmezésből az is kiderül, hogy egy folyadék határfelületi viselkedése nem egyszerűen a folyadék tulajdonságaitól függ, hanem attól is, hogy milyen anyag van a határfelület másik oldalán. A felületi jelenségek kvalitatív módon könnyen értelmezhetők a molekuláris kép alapján, de a jelenségek számszerű leírása ezzel a módszerrel nagyon nehéz.

A felületi jelenségek a molekuláris erők számba vétele nélkül is tárgyalhatók, ha a jelenségeket megfigyelve, méréseket végezve a felület viselkedését jellemző mennyiségeket vezetünk be. A továbbiakban ezt a fenomenológiai eljárást követjük, a molekuláris képet csak a jelenségek kvalitatív értelmezésénél használjuk.

<sup>1</sup> Hasonló aszimmetria minden határfelületnél jelen van, és emiatt a felület viselkedése az érintkező anyagok mindegyikében eltér a tömbi viselkedéstől. Egy szilárd test felülete is mutat felületi jelenségeket, de a szilárd anyagok sokkal kötöttebb atomelrendeződése miatt ezek szabad szemmel nem figyelhetők meg.

### A felületben működő erők

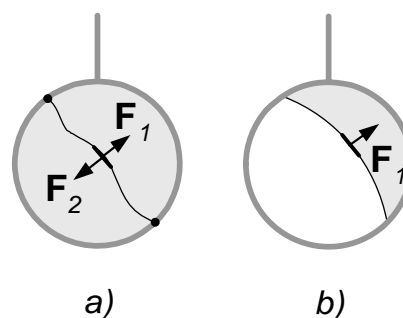
Említettük, hogy a felületi jelenségek a molekuláris kölcsönhatások számbavételével nehezen tárgyalhatók, a felületi jelenségek leírására más módszert kell keresnünk. Egyszerűbben érhetünk célhoz, ha a folyadék felületében működő, közvetlenül tanulmányozható *felületi erőket* vizsgáljuk meg, és ezek segítségével értelmezzük a felület sajátos viselkedését.

Ha a víz felszínén úszó tűt vagy alumínium pénzérmét alaposabban megfigyeljük, akkor láthatjuk, hogy a felület az úszó tárgyak alatt besüllyed, mint egy megfeszített rugalmas hártya. Ez a hártyaszerű viselkedés még világosabban látszik, ha létrehozunk egy vékony folyadékréteget, ami szinte csak felületből áll, és ezzel a hártyával végzünk kísérleteket.

#### KÍSÉRLET:

Kör alakú drótkeret két átellenes pontja közé cérnaszálát kötünk úgy, hogy a céna laza maradjon (a) ábra). Ha a keretet szappanoldatba mártjuk, akkor a kereten sík folyadék-hártya jön létre, és a cérnaszál ebbe a hártyába beágyazódik. Ha a keretet forgatjuk, akkor a cérnaszál a hártyában ide-oda úszik, láthatóan bármilyen helyzetben egyensúlyban van.

Ha a hártyát a cérnaszál egyik oldalán kiszúrjuk, akkor a maradék hártyarész összehúzódik, és megfeszíti a cérnaszálát.



A kísérletet úgy értelmezhetjük, hogy a vizsgált sík felületen kiválasztott tetszőleges vonaldarab mindkét oldalára (a cérnaszál egy vonaldarabjára is) fellép *egy felületi erő*, ami merőleges a vonaldarabra, és a felület síkjában működik. Mivel a vonaldarab mindkét oldalán ugyanolyan folyadékfelület van, a két erő egymás hatását kompenzálja, ezért egyensúly van (a) ábra: a cérnaszál egyensúlyban marad). Ezt az erőt úgy tudjuk közvetlenül észlelhetővé tenni, hogy a kiválasztott vonaldarab egyik oldalán megszüntetjük a folyadék-hártyát, így a másik oldalra ható erő egyedül marad, és a vonaldarabot a megmaradt felületrész irányába húzza (b) ábra).

A kísérletekből azt a következtetést is levonhatjuk, hogy a felületi erő a felületet csökkenteni igyekszik, a felület viselkedése egy megfeszített rugalmas hártyához hasonlít. A felületben működő, a felület méretét csökkenteni igyekvő feszültséget *felületi feszültségnek* nevezik.

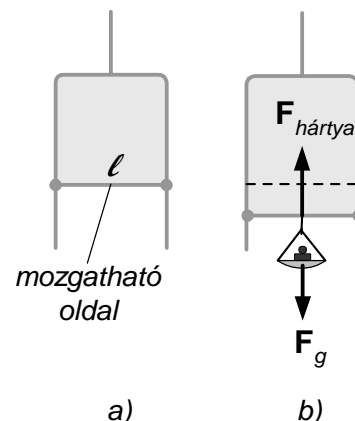
#### Felületi feszültség, felületi energia

A felületi feszültség jellemzéséhez a felületben fellépő erőket kell tanulmányozni. Ezeknek az erőknek közvetlen vizsgálatára a legalkalmasabb egy folyadék-hártya, amelynek segítségével az erők természetéről számszerű információkat is szerezhetünk.

Nagyon vékony folyadék-hártyát sűrű szappanoldatból, vagy speciális, erre a célra kifejlesztett folyadékból készíthetünk. Ezek a folyadékok egy drótkereten vékony hártyát képeznek, amit a felületi jelenségek vizsgálatára használhatunk. Közismert, hogy ezek az anyagok vékony hártyát képeznek egy vékony cső végén is, amiből befújással buborékok hozhatók létre. A buborékok szintén alkalmasak bizonyos felületi jelenségek vizsgálatára.

**KÍSÉRLET:**

Egy drótkeretet, amelynek egyik oldala szabadon csúszatható (a) ábra) szappanoldatba mártunk. A keletkező vékony, sík hártya egy meghatározott méretnél egyensúlyban van. Ha a mozgatható oldalra erőt fejtünk ki (pl. súlyt akasztunk rá), akkor a hártya megnyúlik (b) ábra), ha az erőt megszüntetjük, akkor eredeti méretére húzódik össze.



Ez a kísérlet is azt mutatja, hogy vékony folyadékréteg felülete rugalmas hártyaként viselkedik, megnyújtásához erőt kell kifejteni. Ebben az elrendezésben a felületet visszahúzó erőt meg is lehet mérni, hiszen az egyensúlyban egyenlő a súly által kifejtett erővel.

Ilyen hártyával végzett kísérletek azt mutatják, hogy a két párhuzamos felületet tartalmazó hártya  $l$  hosszúságú határoló oldalára fellépő  $F_{\text{hártya}}$  erő arányos a mozgattott oldal hosszával, de nem függ a hártya felületének nagyságától

$$F_{\text{hártya}} = 2 \sigma l.$$

A 2 szorzót azért írtuk be, mert ez az erő két felület megnyújtásához szükséges. Az egyik felületet határoló vonalra ható felületi erő tehát

$$F_f = \sigma l.$$

Itt  $\sigma$  a folyadék anyagától, és a folyadék felületével érintkező anyagtól függő arányossági tényező.

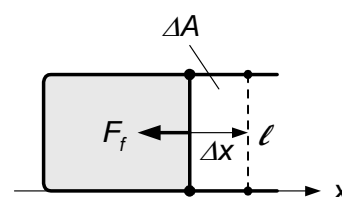
A felülettel kapcsolatos ismert jelenségeket és a különböző kísérletek eredményeit úgy tudjuk értelmezni, ha feltételezzük, hogy egy felületen kiválasztott elemi  $\Delta l$  hosszúságú vonaldarab mindkét oldalára ható  $\Delta F_f$  felületi erőt a

$$\Delta F_f = \sigma \Delta l$$

összefüggéssel adjuk meg. A  $\sigma$  arányossági tényezőt *felületi feszültségnek* nevezik<sup>1</sup> (SI egysége:  $\frac{N}{m} = \frac{kg}{s^2}$ ). Számértéke az egységnyi hosszúságú vonaldarabra ható erő nagyságával egyenlő.

Fontos tudni, hogy a felületi feszültséget nem egyszerűen a kérdéses folyadék tulajdonságai határozzák meg, hanem az függ a folyadék felületét körülvevő anyagtól is. Vagyis rendkívül pontatlan például az a kifejezés, hogy a „víz felületi feszültsége  $0,075 N/m$ ”. Ha a vízfelületet levegő veszi körül, akkor a felületi feszültség valóban  $0,075 N/m$ , de ha olaj, akkor  $0,021 N/m$ .

A kísérleteknek van egy másik értelmezési lehetősége is, ami azon a tapasztalaton alapul, hogy a felület megnöveléséhez munkát kell végezni, ami ideális esetben a felület összehúzódásakor visszanyerhető. Ebből kiindulva feltételezhetjük, hogy a felületnek energiája van, ami a felület növelésével nő. A *felületi energia* és a felület nagysága közötti összefüggéshez úgy juthatunk el, hogy kiszámítjuk a felületben működő erő által végzett munkát a felület megnövelésekor. Ha a mozgatható oldalú drótkerettel végzett kísérletünkben a mozgatható oldalt  $\Delta x$  távolsággal elmozdítjuk (ábra), akkor a felületi erő munkája



<sup>1</sup> Az elnevezés nem szerencsés, mert ugyanígy nevezik a felületben fellépő feszültséget is.

$$\Delta W_f = -F_f \Delta x ,$$

így a felületi energia

$$\Delta E_f = -\Delta W_f = F_f \Delta x .$$

A felületi erőre kapott korábbi kifejezést felhasználva az energiaváltozásra azt kapjuk, hogy

$$\Delta E_f = \sigma \Delta A = \sigma \Delta A ,$$

ahol  $\Delta A$  a felület nagyságának megváltozása. Ebben a felfogásban a felületi feszültség egysége  $\frac{J}{m^2}$  (ez természetesen megegyezik a korábban bevezetett  $\frac{N}{m}$  egységgel), számértéke pedig az egységnyi felületváltozással járó energiaváltozás nagyságával egyenlő.

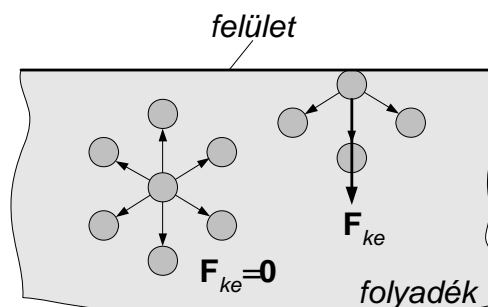
A felülettel arányos felületi energia létezése egyszerű fizikai magyarázatot ad arra, hogy a folyadékok a felületüket csökkenteni igyekeznek: a felület csökkenésével csökken a folyadék energiája.

A felület csökkenési tendenciáját számos kísérlet mutatja.

#### KÍSÉRLETEK:

- Ha egy vékony csővel szappanbuborékot fújunk, és a csövet nyitva hagyjuk, akkor a buborék összehúzódik.
- A síkidom alakú drótkereten sík hártya jön létre, de bonyolultabb drótvázakon is olyan hártyák alakulnak ki, amelyeknek a felülete az adott váz esetén a lehető legkisebb.

A felület csökkenési tendenciája a molekuláris kép segítségével szemléletesen is magyarázható. Egy folyadékban a molekulák egymást vonzzák. Ezt a jelenséget *kohézió*-nak, a fellépő vonzóerőt pedig *kohéziós erő*nek nevezik. A szomszédos molekuláktól származó kohéziós erők a folyadék belsejében átlagosan kompenzálják egymást ( $\mathbf{F}_{ke} \approx \mathbf{0}$ ), a felületen viszont ezeknek az eredője a folyadék belseje felé mutat ( $\mathbf{F}_{ke} \neq \mathbf{0}$ ), amint azt a mellékelt ábra szemlélteti. Ez azt jelenti, hogy a kohéziós erő a felületi molekulákat a folyadék belseje felé igyekszik elmozdítani.



A folyadék molekuláira a felületet körülvevő anyag molekulái is vonzóerőt fejtenek ki, ez a jelenség az *adhézió*, az ebből származó erő az *adhéziós erő*. Ha a folyadék felületét olyan anyag veszi körül, amely által kifejtett adhéziós erőknek a folyadék molekuláira kifejtett hatása elhanyagolható (pl. levegő) a kohéziós erőkhez képest, akkor a felületen lévő folyadékreszecskek a kohéziós erők hatására a folyadék belseje felé igyekeznek elmozdulni, vagyis a felület valóban csökkenni igyekszik.

A kohéziós erők egyúttal a felületre egy ún. *kohéziós nyomást* fejtenek ki. Ezt közvetlenül megmérni nem lehet, de közvetett adatok szerint ez a nyomás nagyon nagy, víz esetében nagyságrendben az atmoszférikus nyomás 10.000-szerese. Ez megmagyarázza, hogy a folyadékok kompresszibilitása kicsi, hiszen külső hatás nélkül is összenyomott állapotban vannak.

#### Görbületi nyomás

Eddig főleg olyan esetekkel foglalkoztunk, amikor a folyadék felülete illetve az azt modellező folyadékhártya sík volt. Ilyenkor egy felületelem szegélyére ható felületi erők a felület

síkjában vannak, tehát az eredőjük is ugyanebben a síkban van. Más a helyzet, ha a felület görbült. Ekkor a felületelemre ható felületi erők a felület érintősíkjában vannak, és eredőjüknek van a felületre merőleges összetevője is. Egy ilyen görbült felületelemre ható felületi erőket mutat vázlatosan a mellékelt ábra. A jobb áttekinthetőség kedvéért a felület metszetét is feltüntettük.

Ez azt jelenti, hogy egy görbült felületen mindig a homorú oldal felé mutató eredő erő lép fel. Az ebből az erőből származó, a homorú oldal irányában ható nyomást *görbületi nyomásnak* nevezik.

A görbületi nyomásra általános összefüggést lehet kapni úgy, hogy a felület kiválasztott helyén összegezzük egy felületelemre ható erőket, amiből a nyomás megkapható. A számítás eredménye az, hogy a görbületi nyomás a határfelület olyan helyén, ahol a legnagyobb és legkisebb görbületnek megfelelő két, ún. fő görbületi sugár  $R_1$  és  $R_2$  :

$$p_g = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Ha a felület a kiválasztott helyen gömbfelület részének tekinthető, akkor  $R_1 = R_2 = R$  , vagyis

$$p_g = \frac{2\sigma}{R}.$$

A gömbfelületre vonatkozó összefüggéshez energia-megfontolásokkal egyszerűbb úton is eljuthatunk. Ehhez először vizsgáljunk meg egy olyan esetet, ami méréssel is könnyen nyomon követhető: számítsuk ki, hogy mekkora munka kell ahhoz, hogy egy gömb alakú buborék sugarát – tehát a felületét is – megnöveljük, és mennyivel nő eközben a buborék felületi energiája.

Tudjuk, hogy a buborékban a felületet csökkenteni igyekvő, befelé mutató  $p_g$  görbületi nyomás jön létre. Tegyük fel, hogy az  $R$  sugarú gömb sugarát  $\Delta R$  értékkel megnöveljük, Ekkor a görbületi nyomás miatt végzendő munka nagysága

$$\Delta W_g = p_g A \Delta R = p_g 4 R^2 \pi \Delta R ,$$

az eközben létrejött energianövekedés pedig

$$\Delta E_f = 2\sigma \Delta A = 2\sigma [4(R + \Delta R)^2 \pi - 4R^2 \pi]$$

(a 2 szorzó a hártya két felülete miatt kell).

Mivel az energiaváltozás és a munka nagyságának meg kell egyeznie, azt kapjuk, hogy

$$p_g 4 R^2 \pi \Delta R = 2\sigma [4(R + \Delta R)^2 \pi - 4R^2 \pi].$$

Ebből egyszerű átalakítások után a

$$p_g R^2 \Delta R = 2\sigma (2R\Delta R - \Delta R^2)$$

illetve a

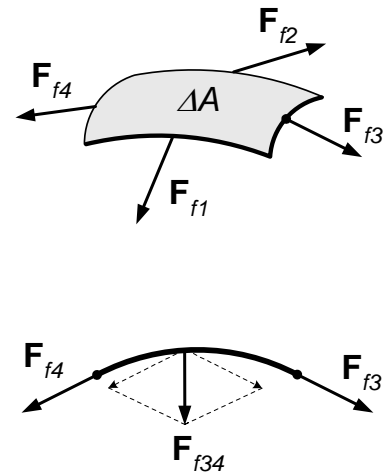
$$p_g R^2 = 2\sigma (2R - \Delta R)$$

összefüggést kapjuk.

Ha a sugár megváltozása nagyon kicsi, ( $\Delta R \ll R$ ), akkor végül a görbületi nyomásra a

$$p_g = \frac{4\sigma}{R}$$

összefüggést kapjuk.

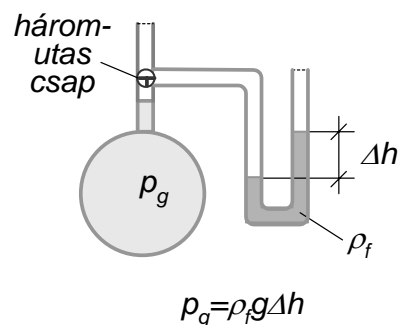


Ez az összefüggés a buborékban uralkodó túlnyomás mérésével kísérletileg is ellenőrizhető. A mérés elvét a mellékelt ábra mutatja.

A buborékban uralkodó nyomásra kapott összefüggés két felülettel határolt folyadékrétegre vonatkozik. Ha a fenti számítást egyetlen görbült felülettel határolt folyadék esetére végezzük el, akkor a felületi energia megváltozása feleakkora lesz, mint két felületnél, amiből következik, hogy a görbületi nyomás is feleakkora:

$$p_g = \frac{2\sigma}{R}.$$

Ezzel az összefüggéssel kiszámítható például, hogy egy folyadékcseppben mekkora a görbületi nyomás. Látható, hogy minél kisebb a csepp sugara, annál nagyobb a cseppet összenyomó görbületi nyomás. Példaként két adat: levegőben  $1\text{ mm}$  átmérőjű vízcseppben a *többlet-nyomás*  $p_g \approx 300\text{ Pa}$ , ami elhanyagolható az atmoszférikus nyomás ( $\approx 10.000\text{ Pa}$ ) mellett, de egy  $1,5\ \mu\text{m}$  átmérőjű higanycseppben  $p_g \approx 1.300.000\text{ Pa}$ , ami az atmoszférikus nyomásnak több, mint  $100$ -szorosa. Mindkét nyomás elhanyagolható a folyadékokban görbület nélkül is jelenlévő kohéziós nyomáshoz képest.

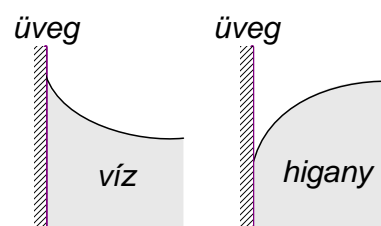


## Kapilláris jelenségek

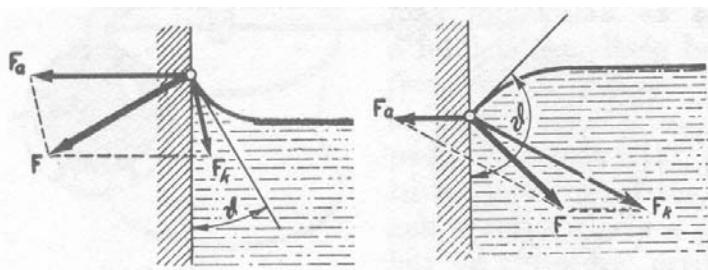
A felület különleges viselkedésének gyakorlati szempontból is fontos megnyilvánulása az, hogy folyadék és szilárd anyag vagy két különböző folyadék érintkezésénél a hidrosztatika törvényeinek ellentmondó jelenségek lépnek fel. Mivel ezeknek a jelenségeknek legszembetűnőbb és talán legfontosabb esete az, hogy a folyadékok nagyon vékony csövekben, ún. kapillárisokban rendellenesen viselkednek, ezeket a jelenségeket összefoglaló néven *kapilláris jelenségeknek* nevezik.

### Illeszkedési szög

Ha egy üvegedénybe töltött víz felszínét az edény falánál alaposan megvizsgáljuk, akkor azt találjuk, hogy a víz egy bizonyos magasságig felkúszik az edény falára, az edénybe öntött higany felszíne viszont eltávolodik az edény falától, és alacsonyabban helyezkedik el, mint az edény közepén (ábra). Rövidebben megfogalmazva: a víz a tiszta<sup>1</sup> üvegedényt *nedvesíti*, a higany viszont *nem nedvesíti*. A nedvesítés magyarázata az, hogy a víz- és az üveg molekulái között fellépő adhéziós erők

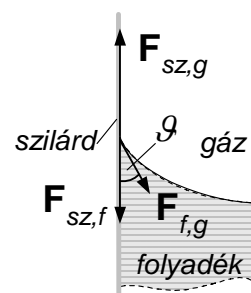


nagyobbak, mint a víz molekulái között fellépő kohéziós erők. A higany viselkedésének oka pedig az, hogy a higany molekulái között nagyobbak a kohéziós erők, mint a higany és az üveg molekulái között fellépő adhéziós erők. Ennek eredményeképpen a víz-üveg-levegő határvonalnál elhelyezkedő folyadékreszciskékre nagyobb vonzóerőt fejt ki az üvegfal, mint a víz és a levegő, ezért a részecskék a falhoz tapadnak, a higany-üveg-levegő határvonalnál elhelyezkedő folyadékreszciskékre viszont nagyobb vonzóerőt fejt ki a higany, mint az üvegfal és a levegő, ezért a részecskék a higany belseje felé mozdulnak el. A két esetben működő adhéziós- és kohéziós erőket, a folyadékfelület alakját és a kialakult  $\vartheta$  illeszkedési szöget mutatja sematikusan a mellékelt ábra (a nehézségi erő és a levegő által kifejtett erő az illeszkedés szempontjából elhanyagolható).



A szilárd falnál kialakuló folyadékfelület alakja abból a feltételből számítható ki, hogy a folyadék felületének mindenütt merőlegesnek kell lenni a felületnél kiválasztott folyadékreszciskére ható  $\mathbf{F} = \mathbf{F}_a + \mathbf{F}_k$  eredő erőre, ahol  $\mathbf{F}_a$  az adhéziós-,  $\mathbf{F}_k$  pedig a kohéziós erő. A felszín alakjának kiszámításához ismernünk és összegeznünk kellene a molekulák között ható adhéziós- és kohéziós erőket, amelyeket általában nem ismerünk. Az illeszkedési szög azonban egyszerűen meghatározható a felületi erők segítségével, amelyeket a felületi feszültségek ismeretében ki tudunk számítani.

A három közeg (folyadék-szilárd-levegő) közös érintkezési pontjait megadó, a mellékelt ábra síkjára merőleges vonal mentén minden közeg-párnál fellép a vonalra merőleges, a határfelületet csökkentő erő, ami az adott határfelület érintője irányába mutat.



<sup>1</sup> Ha az üveg felülete zsíros, akkor nincs nedvesítés.

Ha a folyadékra ható térfogati erőket (itt a nehézségi erőt) elhanyagoljuk, akkor az egyensúlyi illeszkedési szöget a felületi erők egyensúlya határozza meg. A folyadék és gáz határán működő erőnek a falra merőleges komponensét a fal kompenzálja, az egyensúly másik feltétele pedig az, hogy a fallal párhuzamos összetevők eredője nulla legyen, vagyis

$$F_{sz,g} - F_{sz,f} - F_{f,g} \cos \vartheta = 0.$$

A vonalra ható felületi erők nagysága a közeg-párokra vonatkozó felületi feszültség és a vonal  $l$  hosszának ismeretében kiszámítható:

$$F_{sz,g} = \sigma_{sz,g} l \quad F_{sz,f} = \sigma_{sz,f} l \quad F_{f,g} = \sigma_{f,g} l.$$

Ezzel a függőleges irányú erőkomponensek egyensúlyi feltételéből azt kapjuk, hogy

$$\sigma_{sz,g} - \sigma_{sz,f} - \sigma_{f,g} \cos \vartheta = 0,$$

amiből az illeszkedési szög:

$$\cos \vartheta = \frac{\sigma_{sz,g} - \sigma_{sz,f}}{\sigma_{f,g}}.$$

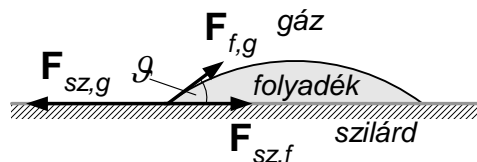
Mivel a  $\cos$  függvény értéke maximálisan 1 lehet, egyensúly csak akkor alakulhat, ha

$$|\sigma_{sz,g} - \sigma_{sz,f}| \leq \sigma_{f,g}.$$

Abban az esetben, ha emellett  $\sigma_{sz,g} > \sigma_{sz,f}$ , akkor  $\vartheta < \frac{\pi}{2}$ , a folyadék a falra felkúszik, a falat

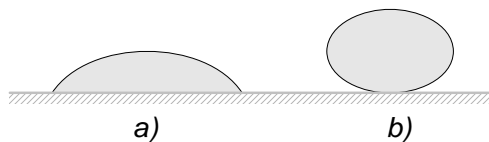
nedvesíti (pl. víz az üveget), ha pedig  $\sigma_{sz,g} < \sigma_{sz,f}$ , akkor  $\vartheta > \frac{\pi}{2}$ , a folyadék a fal mellett lesüllyed, a falat nem nedvesíti (pl. higany az üveget).

Tapasztalatból tudjuk, hogy különböző folyadékokból képződött cseppek egy szilárd, sík felületen különböző alakot vesznek fel: pl. a vízcsepp egy tiszta üvegfelületen szétterül, a higanycsepp pedig a felülettől elválk, azon gurulni is tud. Ezt a különbséget szintén a határfelületi viselkedéssel tudjuk értelmezni. Az ábrán feltüntettük a felületi feszültségek miatt fellépő erőket, amelyeknek egyensúlyi feltételét korábban már meghatároztuk:



$$\cos \vartheta = \frac{\sigma_{sz,g} - \sigma_{sz,f}}{\sigma_{f,g}}.$$

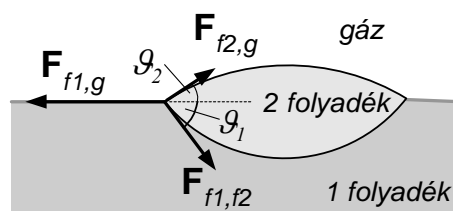
Eszerint a folyadékcsepp nedvesít, ha  $\sigma_{sz,g} > \sigma_{sz,f}$ , ilyenkor a csepp egyensúlyban a felületen kissé szétfolyik, míg a  $\sigma_{sz,g} < \sigma_{sz,f}$  esetben a folyadék a felületet nem nedvesíti, és a felülettől elválk. A két esetben kialakult cseppalakot a mellékelt ábra a) és b) része szemlélteti.



Abban az esetben, ha  $\frac{\sigma_{sz,g} - \sigma_{sz,f}}{\sigma_{f,g}} > 1$  (pl. a többi felületi feszültséghez képest nagyon nagy a

$\sigma_{sz,g}$  érték), akkor nem alakul ki egyensúly, a folyadék teljesen szétfolyik a felületen.

Érdekes és gyakorlati szempontból is fontos az az eset, amikor egy folyadék egy másik folyadék felületén úszik. Az ilyenkor kialakuló viszonyokat mutatja szematikusan az ábra. A fenti gondolatmenetet követve az egyensúlyi feltételére most azt kapjuk,





hogy

$$\sigma_{f1,g} - \sigma_{f2,g} \cos \vartheta_2 - \sigma_{f1,f2} \cos \vartheta_1 = 0.$$

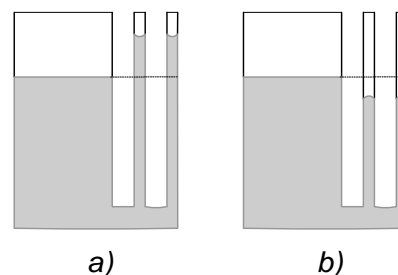
Ennek alapján vizsgáljuk meg, hogy mi történik egy vízfelületre került olajcseppel. Ebben az esetben a felületi feszültségek:

$$\sigma_{f1,g} = 0,073 \frac{N}{m} \quad \sigma_{f2,g} = 0,038 \frac{N}{m} \quad \sigma_{f1,f2} = 0,021 \frac{N}{m}.$$

Mivel  $\sigma_{f1,g} > \sigma_{f2,g} + \sigma_{f1,f2}$  az egyensúlyi feltétel nem teljesülhet, az olajcsepp tehát teljesen szétfolyik a víz felületén.

### Kapilláris emelkedés és süllyedés

Egy edény falánál kialakuló illeszkedési viszonyok és az ebből eredő görbületi nyomás következtében vékony csövekben (kapillárisokban) a folyadékok nem követik a közlekedőedényekre vonatkozó törvényeket: vékony csőben egy nedvesítő folyadék szintje magasabb-, nem nedvesítő folyadéké pedig alacsonyabb, mint nagy felületű edényben. Az előbbi jelenséget *kapilláris emelkedésnek* (a) ábra), utóbbit *kapilláris süllyedésnek* (b) ábra) nevezik. Tiszta üveg kapillárisban kapilláris emelkedést mutat például a víz, és kapilláris süllyedést mutat a higany.



Egyszerű becsléssel kiszámíthatjuk az emelkedés- illetve süllyedés mértékét. A számítást a kapilláris emelkedés példáján mutatjuk be a mellékelt – az áttekinthetőség kedvéért eltorzított – ábra segítségével.

Ha a folyadék a csőben  $h$  magasságba emelkedett fel, akkor a folyadékoszlop súlya miatt egy lefelé ható erő működik, amelynek nagysága a felemelt folyadékoszlop súlyával egyenlő:

$$G \approx \rho_f g h r^2 \pi.$$

Ezt az erőt ellensúlyozza a görbült felület homorú oldala felé, tehát felfelé mutató emelőerő. Ennek számításánál feltételezzük, hogy a csőben a folyadék görbült felülete egy  $R$  sugarú gömbfelület része, de a gömb sugara nem egyezik meg a cső  $r$  sugarával (vagyis az illeszkedési szög nem nulla). Az emelőerőt a görbületi nyomás segítségével becsüljük meg, feltételezve, hogy ez a nyomás a cső keresztmetszetével azonos sík felületre hat (a felület valójában görbült és ezt szigorúan véve figyelembe kellene venni):

$$F_{emelő} \approx p_g r^2 \pi.$$

Egyensúlyban  $F_{emelő} = G$ , vagyis

$$p_g \approx \rho_f g h.$$

Ha figyelembe vesszük, hogy a kapilláris nyomás  $p_g = \frac{2\sigma}{R}$ , és  $R = \frac{r}{\cos \vartheta}$ , akkor azt kapjuk, hogy

$$\frac{2\sigma \cos \vartheta}{r} \approx \rho_f g h.$$

Ebből az emelkedési magasság

$$h \approx \frac{2\sigma \cos \vartheta}{\rho_f g r}$$

Ez az összefüggés a felületi feszültség durva mérésére is alkalmas, hiszen a többi mennyiség több-kevesebb pontossággal megmérhető, így a felületi feszültség kiszámítható (pontosabb mérési módszerekkel a laboratóriumban találkoznak).