

Szivattyú kavitációs vizsgálata

1. Bevezetés

Folyadékot szállító csővezeték rendszerekben számos helyen felléphet a kavitáció jelensége, mely során a helyi nyomás a folyadék telített gőznyomásáig csökken, ekkor gőz képződik. Csővezeték rendszerek esetén, jellemzően szivattyúknál, elzáró- és szabályozó szerelvényeknél fordul elő kavitáció, mely több szempontból is káros lehet. Egyrészt zaj- és rezgés hatásokkal a környezetet terheli, így rontva a komfortérzetet, másrészt fizikai roncsolást okoz a berendezésben. A mai modern könnyűszerkezetes épületekben a rezgések nagyon könnyen szétterjedhetnek és más gépet, berendezést is károsíthatnak. A kavitáció során keletkezett káros rezgések magát a kibocsátó gépet is roncsolják, üzemét negatívan befolyásolják. Kavitáció szempontjából igen kritikusak egy rendszerben a szivattyúk, amelyek szívó oldalán figyelhető meg a roncsolódás.

2. A kavitáció kialakulása

Ha a szállított folyadékban (ez leggyakrabban víz) az áramlás folyamán az abszolút nyomás a helyi telített gőznyomás alá csökken (szivattyú esetében tipikusan a járókerékbe belépésnél), a folyadék homogenitása megszűnik, és a fal mikro repedéseiben, apró lebegő szemcsék felületén gőz tartalmú buborékok keletkeznek, azaz a folyadék helyileg forrni kezd. Ezt a jelenséget nevezik kavitációnak, ami a szivattyúk jó működésének fizikai határa. A kavitáció jelentős rezgés és zaj forrása lehet, sőt az áramlástechnikai jellemzők is megváltozhatnak, a jelenség fokozódása során a berendezés károsodása sem kerülhető el.



1. ábra. Szivattyú járókerékén kavitáció okozta erózió

Fizikai kavitációról akkor beszélünk, ha a megjelenő buborékok egyedinek, különállóknak tekinthetők. Az áramlást határoló falak mikro repedéseit, a folyadékban lévő szilárd szemcséket, vagy folyadékból kivált gázbuborékokat kavitációs magoknak nevezzük. A gyakorlatban használt szivattyús rendszereknél mindig megtalálhatók nagy számban a kavitációs magok. A berendezések áramlástechnikai paramétereiben a keletkező néhány tíz-, vagy százmikronos nagyságú gőzbuborékok nem okoznak változást.

Amennyiben a buborékok egyesülnek, és összefüggő, jól megfigyelhető zónát alkotnak, akkor a jelenséget technikai kavitációnak nevezik. A kavitációs zóna az áramlást határoló szilárd felületen képződik, majd onnan leválik, de a falon újra képződik. A szivattyú hidraulikai jellemzőiben (szállítómagasság, térfogatáram, stb.) a technikai kavitáció megjelenése már komoly megváltozást idéz elő.

A superkavitációs állapot akkor következik be, amikor a technikai kavitáció során tovább csökken az áramlási tér nyomása. Ekkor már nemcsak egy-egy pontban keletkeznek gőzbuborékok, hanem nagyobb, összefüggő tartományban.

A fizikai vagy technikai kavitáció során keletkezett buborékokat az áramlás tovább sodorja, és egy nagyobb helyi nyomású térben, a gőzzel telt buborékokban kondenzáció lép fel, azaz a kavitációs magok összeroppannak, feltöltődnek folyadékkal. Ez gerjeszt jól mérhető rezgéseket a berendezésen, sőt bizonyos nagyságot elérve füllel is jól hallható sercegő, ropogó hangot hallat. Ha az üreg összeomlása a berendezés határoló falainak közelében történik, a periodikus mechanikai hatások a szilárd falat veszik igénybe, amelyeknek következménye lehet az 1. ábrán látható erózió.

Ha a szivattyú járókerék előtt a kavitációs buborékzóna a teljes keresztmetszetet kitölti, a folyadék oszlop megszakad, a szivattyú „elejti” a folyadékot, megszűnik a közeg szállítása. A folyadéknak a szívócső felől, a járókerék belépő élénél van a legkisebb nyomása. Itt léphet fel először a kavitáció. Az 1. ábrán jól látható, hol volt a járókerék belépő éle, ugyanis az erózió azt roncsolta meg.

3. Szívóképesség, jelleggörbék

Felmerül a kérdés, hogyan kerülhető el a gőzbuborék képződés okozta gond? Ehhez az előadáson megismerjük a berendezésben rendelkezésre álló $NPSH_a$ (available), illetve a szivattyú által a szállítandó térfogatáramnál rendelkezésre bocsátandó $NPSH_r$ (required) szívómagasságot. A definíció az alábbi:

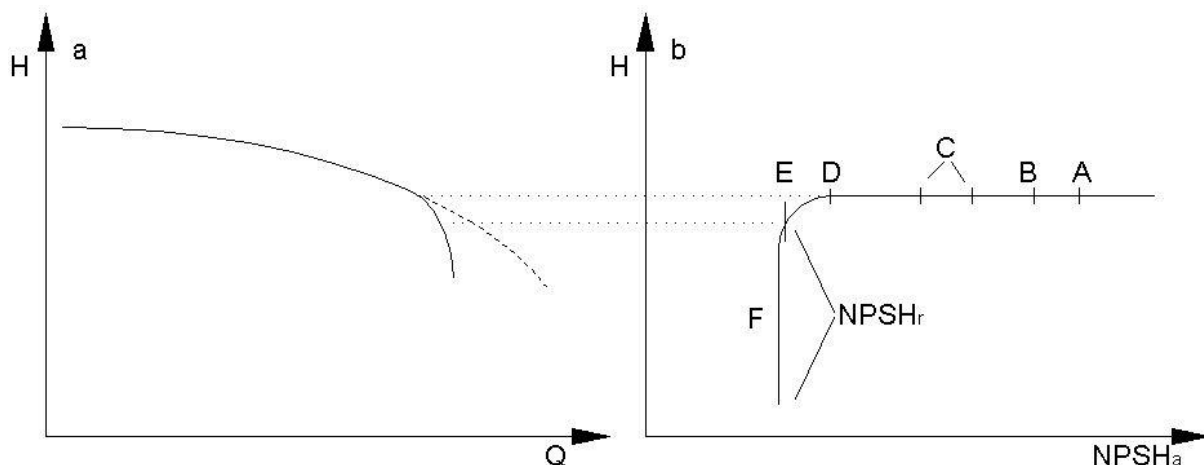
$$NPSH_a = \frac{p_0 - p_g(t)}{\rho g} - H_{sg} - e_s - h'_s(Q), \quad (1)$$

itt a szívóoldalon a vízfelszín feletti nyomást p_0 -al, a szállított közeg hőmérsékletéhez tartozó telített gőz nyomását $p_g(t)$ -vel, a szívóoldali vízszint mélységét a szivattyú szívócsőcsőjének középpontjától H_{sg} -vel, a szívócső középpontjának és a szivattyú forgástengelyébe eső referenciapontnak a szintkülönbségét e_s -sel jelöltük. (Ez esetünkben zérus, $e_s = 0$.) Végül $h'_s(Q)$ jelöli a szívócső veszteségmagasságát az összes benne lévő szerelvény veszteségmagasságával egyetemben. A technikai kavitáció mentes üzem határán éppen teljesül az $NPSH_a = NPSH_r$ egyenlőség. Az alábbi egyenlőtlenség betartásával elkerülhetők az üzemi problémák:

$$NPSH_r < NPSH_a. \quad (2)$$

Nagy nyomású kazán-tápszivattyúknál az irányadó $NPSH_a$ érték mintegy 1,5÷2-szerese az $NPSH_r$ értéknek, kivédve a tranziens üzemállapotokból és az üzemzavarokból adódó eltéréseket. Azért van szükség ezekre a biztonsági tartalékokra, mert a fizikai és technikai kavitációnak nincs éles határa. Míg az előbbi jelenség normál üzemben is előfordul (mivel a folyadék nem tökéletesen tiszta), enyhe erózió felléphet, de a hidraulikai jellemzőkben ez nem jelentkezik. A technikai kavitáció már észrevehető hatásfok csökkenéssel és jelentős roncsoló hatással jár, a két forma közötti átmenet folyamatos.

Ha elvégezzük a szivattyú jelleggörbe mérését, azt tapasztaljuk, hogy növelve a térfogatáramot, a jelleggörbe egy pontnál letörik, azaz a *2a. ábra* szaggatott jelleggörbétől elválik. Az elválási pontban kezd kialakulni a technikai kavitáció. Egy-egy állandó térfogatáramnál elvégezhető a leszívási mérés, azaz annak vizsgálata, hogy az adott térfogatáramnál mekkora a szivattyú $NPSH_r$ értéke. Kiindulásként tartjuk a szivattyú Q térfogatáramát állandó értéken. Az $NPSH_a$ értéke az (1) egyenlet szerint a szívóoldali paraméterek (pl. beépített fojtás) segítségével változtatható. Ahhoz, hogy a rendszerben Q =állandó fennmaradjon, a nyomóoldalon is be kell avatkozni. Ha a szívóoldalon nő a geodetikus szállítómagasság (H_{sg}), vagy a szívóoldali ellenállás (h'_s), illetve a szívótér nyomása csökken (p_0), akkor a nyomóoldali szabályozó szerelvényt nyitni kell, hogy a rendszer jelleggörbéje ne változzék. Ha az (1) képlet szerint az $NPSH_a$ értéket csökkentjük, és minden ilyen új számértéknél megmérjük a szivattyú H szállítómagasságát (pl. manométer segítségével), akkor egy kritikus $NPSH_a$ értéknél a H szállítómagasság jelentősen csökken, azaz a görbe letörik. Ezt szemlélteti a *2b. ábra*. A letörési értéknél lesz az adott Q =állandó értékhez tartozó $NPSH_r$ érték.



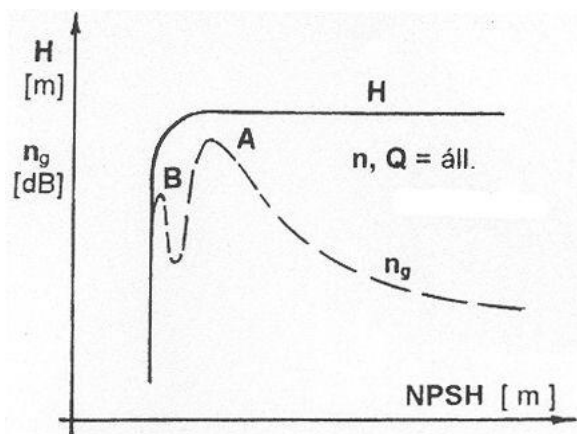
2. ábra. a, Jelleggörbe és b, leszívási görbe

A *2b. ábrán* látható $NPSH_a - H$ diagram **A** pontjában jelenik meg a kavitációra utaló enyhe ropogó hang. A **B** pontban a lapátok belépő élénél megjelenik a buborékhőz. A lapátok eróziós roncsolódása az egyre növekvő zaj mellett a **C** pontban indul meg. Látható, hogy a szivattyú jelleggörbéjén még semmilyen változást nem tapasztalunk, de a berendezés már károsodni kezd. A **D** pont jelenti azt a határt, ami után csökkentve az $NPSH_a$ értéket megindul a jelleggörbe esése (baloldali diagram). Az **E** pont jelenti a tűrhető kavitációs üzemet, noha jelentős letörés tapasztalható (3-5%). Az **F** pont környezetében a járókerék környezetében buborékfelhő áramlik. A szivattyú újra elcsendesedik, szállítómagassága leesik, hatásfoka romlik, bár teljesítményfelvétele is jelentősen lecsökken. Az eróziós roncsoló hatás is megszűnik. A szivattyú üzemelése nem megbízható, ugyanis bármikor „elejtheti” a folyadékot.

A b. ábra mutatja, hogy az $NPSH_a$ függvényében mikor következnek be jelentős változások a szállítómagasságban. A letörés után (pl. F pont) már nem igaz a (2) egyenletben megfogalmazott feltétel, azaz a rendszer kavitál. Ki kell jelölni egy kritikus ΔH szállítómagasság csökkenést, ami nagyobb, mint a mérési hibakorlát. Ez a ΔH érték a szállítómagasság mintegy 2-3%-a szokott lenni. Több $Q = \text{állandó}$ feltételű mérést elvégezve a szivattyúra megkapjuk az $NPSH_r - Q$ függvénykapcsolatot, ami éppen olyan fontos üzemi jellemző, mint a $H - Q$ jelleggörbe.

A folyadékok gáztartalma kedvező is lehet a kavitáció okozta rezgésekre, erózióra. Néhány térfogat-százalékos folyadékból kivált, illetve külső téréből bevezetett gáz csökkenti a kavitációs zóna összeroppanásakor keletkező zajt, káros rezgéseket, roncsoló hatást. Ezt a megoldást azonban nem minden technológiai folyamatnál engedhetjük meg (pl. fűtészálázat, vegyi folyamatok). A közegben jelen lévő gáz adott tömegáram mellett a keverék kisebb sűrűsége miatt növeli a térfogatáramot. Az átáramló térfogatáram többlet a berendezés eredő ellenállását (h'_s) növeli, ami az (1) egyenlet szerint az $NPSH_a$ értéket csökkenti. A gáz (leggyakrabban levegő) rezgéscsökkentő hatásáról nem kell lemondani, ugyanis közvetlenül a szivattyú szívócsenk előtt bevezetve az $NPSH_a$ esése elkerülhető, a hatásfok azonban a többlet-térfogatáram miatt csökken.

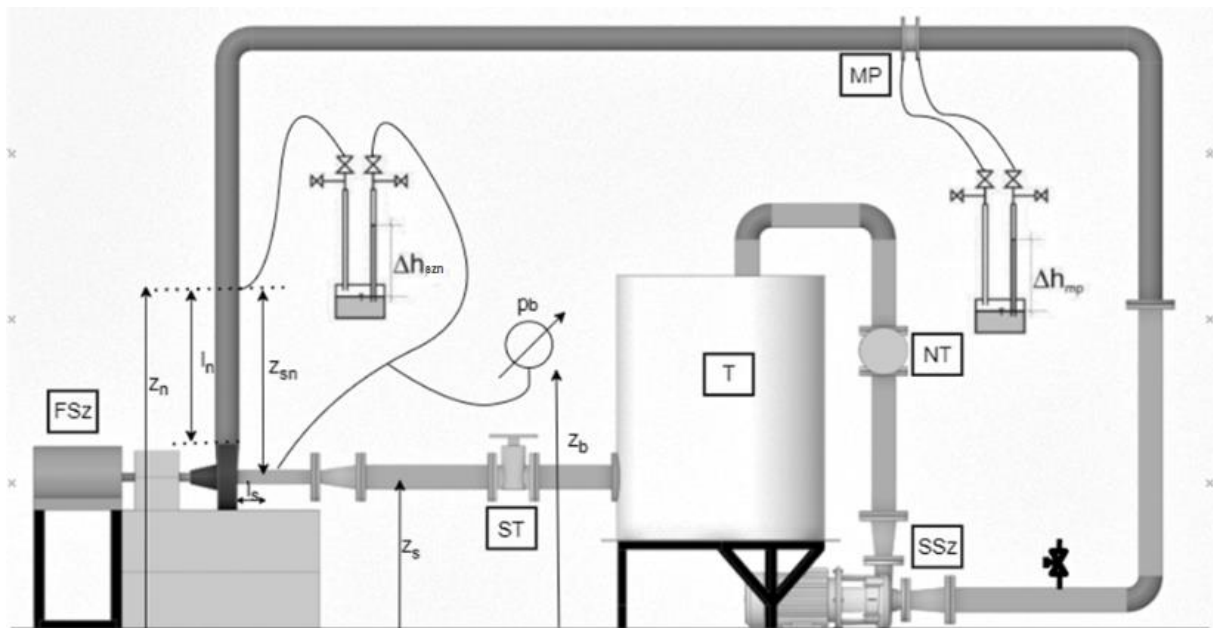
A kavitáció, az általa okozott rezgés alapján is detektálható. Ennek a módszernek az az előnye is megvan, hogy a kismértékű – fizikai – kavitáció is detektálható, ellentétben a hidraulikai paraméterekből történő detektálással, ami csak a technikai kavitációt mutatja ki. A vizsgálatot mindkét esetben állandó térfogatáram mellett, a szívócső ellenállásának növelésével – ezzel az $NPSH_a$ csökkentésével – kell elvégezni. A 3. ábra mutatja be az u.n. leszívási (szállítómagasság változása az $NPSH_a$ függvényében) görbét és a szivattyú csigaházán mérhető gyorsulásszint változását. Látható, hogy a zajszint vagy rezgésszint (n_g) már jóval a szállítómagasság letörése előtt megemelkedik, mely fizikai kavitáció – kis buborékok megjelenésére és összeroppanására, azaz igen erős eróziós hatású kavitáció – jelenlétére utal. Ez azonban a hidraulikai paraméterekben még nem jelentkezik.



3. ábra. A leszívási görbe és a rezgésszintek kapcsolata

4. Mérőberendezés

A 4. ábrán bemutatott mérőállomás egyfokozatú, plexi előlapon szivattyúra épült, és így lehetővé válik a szivattyúban kialakuló kavitációs áramlás vizuális megfigyelése. Az **FSz** jelű szivattyú a **T** tartályból szívja a vizet az **ST** tolózárán keresztül, mely a szívócső ellenállásának növelésére alkalmas. A szívó és nyomóoldali nyomást higanyos és Bourdon-csöves manométerrel mérjük, a vízhozam mérésekhez az **MP** mérőperemet építettük be. A plexi előlapon keresztül stroboszkóp lámpával világítjuk meg a hengeres lapátokkal készített nyitott járókereket. A stroboszkóp felvillanási frekvenciáját a fordulatszámmal azonos értékre beállítva a járókerék lapátok állni látszanak, és a lapát felületén kialakuló kavitáció szemmel jól érzékelhető.



4. ábra: A mérőberendezés vázlat

A szivattyú H szállítómagassága és a Q térfogatárama az ábra jelöléseinek megfelelő Δh_{szn} és Δh_{mp} értékekből az alábbiak szerint határozható meg:

$$Q = \alpha (D, d, Q) \frac{d_{mp}^2 \pi}{4} \sqrt{\frac{2g(\rho_{Hg} - \rho_{v\acute{z}})\Delta h_{mp}}{\rho_{v\acute{z}}}} \quad (3)$$

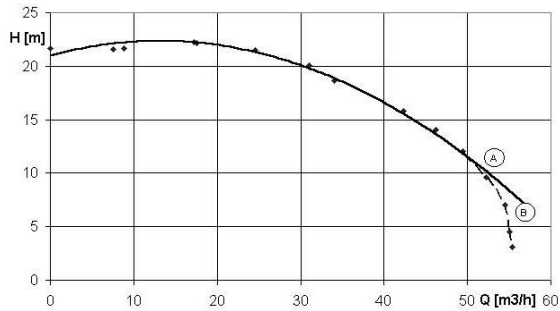
$$H = \frac{\rho_{Hg} - \rho_{v\acute{z}}}{\rho_{v\acute{z}}} \Delta h_{szn} + \frac{Q^2}{2g} \left[\lambda \left(\frac{l_s}{d_s A_s^2} + \frac{l_n}{d_n A_n^2} \right) + \frac{1}{A_n^2} - \frac{1}{A_s^2} \right] \quad (4)$$

A szivattyú szívócsöve szűk, és az **ST** tolózárrel együtt olyan szívóoldali ellenállást jelentenek, hogy a jelleggörbe nagy térfogatáramokhoz tartozó részén már kavitáció alakul ki és a jelleggörbe itt letörik.

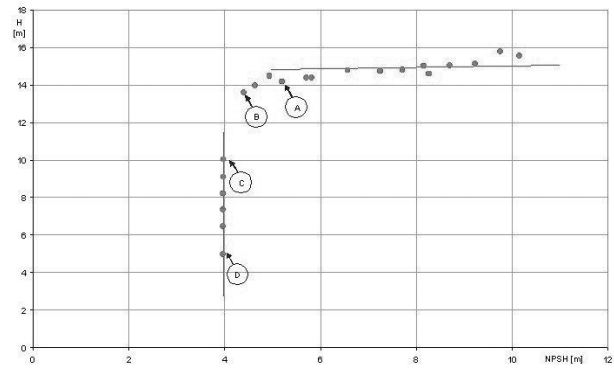
A mérés során a szivattyú $NPSH_r(Q)$ jelleggörbéjének pontjait kívánjuk meghatározni leszívási görbe mérés alapján. A $H(Q)$ jelleggörbe egy olyan pontjából indulunk ki, ahol a vizuális megfigyelések sem mutatnak buborék-keletkezést. A térfogatáram állandó értékének megőrzése érdekében zárunk a **ST** tolózárán és nyitunk az **NT** tolózárán. A H szállítómagasság változását az $NPSH_a$ függvényében ábrázoljuk. Az $NPSH_a$ értékét a következő összefüggéssel határoztuk meg:

$$NPSH_a = \frac{p_0 + p_b \cdot 10^5 - p_g}{\rho_{\text{víz}} g} + z_b - z_s + \frac{Q^2}{2g} \left(\frac{1}{A_s^2} - \frac{\lambda L_s}{d_s A_s^2} \right) \quad (5)$$

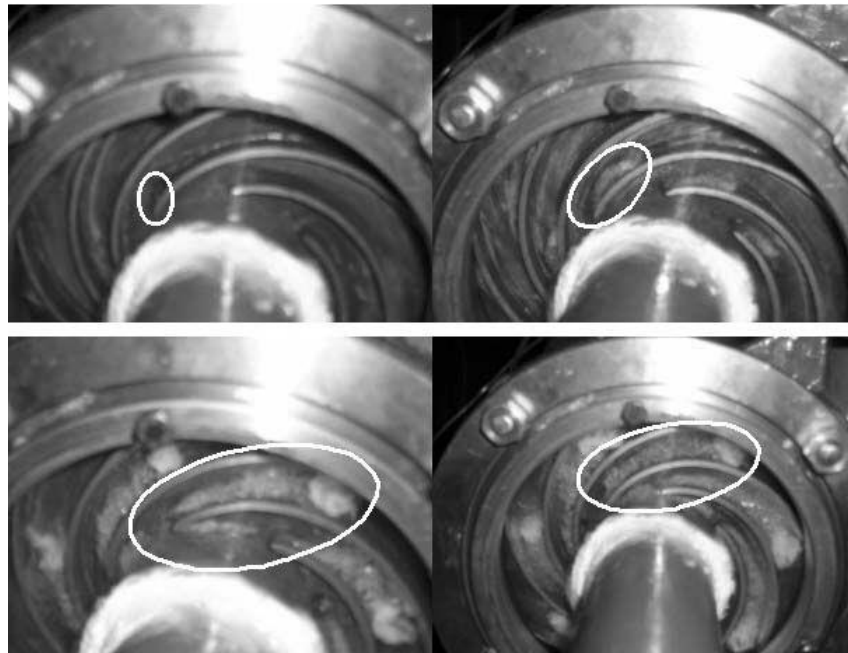
A szivattyú adott Q térfogatáramhoz tartozó NPSH_r értékét az a pont adja meg, ahol a szállítómagasság kb. 3% esést mutat. A kavitáció kialakulását egy ilyen, a szívócső ellenállását folyamatosan változtató méréssorozat esetén a plexi előlapos berendezésen vizuálisan is követni tudjuk.



5. ábra. Szivattyú jelleggörbe



6. ábra. Leszívási görbe



7. ábra. A kavitációs zóna fotói a 6. ábra A, B, C, D pontjaiban

5. Mérés menete

A mérés során egy – a mérést vezető oktató által megadott – térfogatáram melletti leszívási görbe felvétele a cél. A mérőberendezés ellenőrzése után az oktató a lent leírtaknak megfelelően elvégzi a mérés indítását. A mérést teljesen nyitott szívóoldali ST tolozárállástól indítjuk, a segédzivattyú nyomócsonkján levő NT tolozárak segítségével beállítva a kívánt térfogatáramot. A mérés során a szívóoldali tolozárát zárjuk, a nyomóoldali tolozárát megnyitjuk a térfogatáram állandó értéken tartása érdekében. Minden mérési pontban leolvassuk a manométer kitéréseket és vizuálisan megfigyeljük a látható áramképet. A kavitáció megjelenésétől kezdve megmérjük a buborékkal teli kavitációs zóna hosszát a lapátózásban. A mérés első felében a mérési pontokat a szívóoldali Bourdon-csöves manométer (4. ábra, p_b) segítségével vesszük fel, a letörés elérését követően pedig a szívó és nyomóoldal közé kötött differenciál manométert kell figyelni (4. ábra, Δh_{szn}). A leolvasott értékek alapján kiszámoljuk a H szállítómagasság és az NPSHa értékét az alábbi összefüggésekkel:

$$Q [m^3/h] = 3,2472 \cdot \sqrt{\Delta h_{mp} [mm]} \quad (6)$$

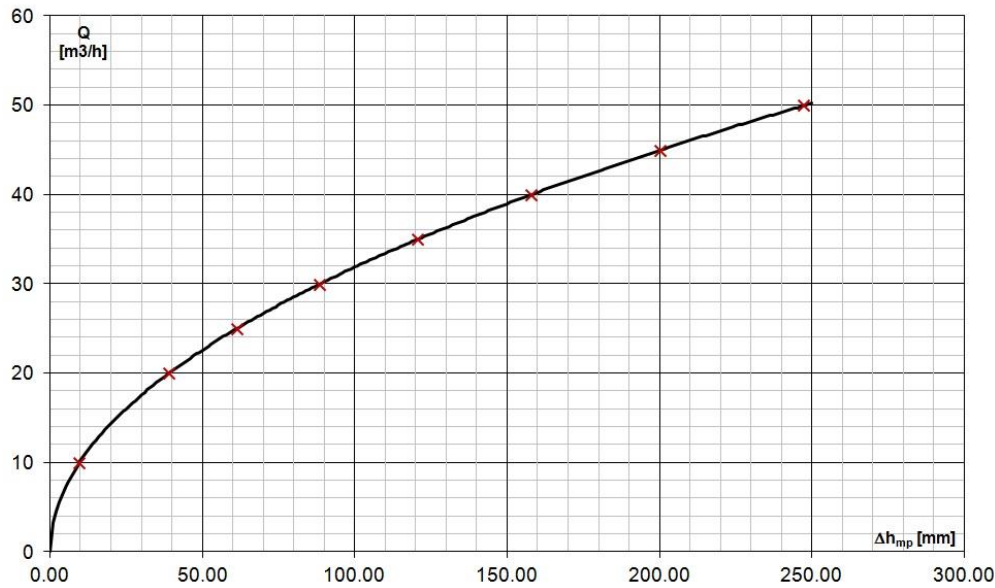
$$H [m] = 12,6 \cdot \frac{\Delta h_{szn} [mm]}{1000} - 10770 \left(\frac{Q [m^3/h]}{3600} \right)^2 \quad (7)$$

$$NPSH_a [m] = 10,61 + 10,19 \cdot p_b [bar] + 11799 \left(\frac{Q [m^3/h]}{3600} \right)^2 \quad (8)$$

A mérési adatokat az alábbi alakú táblázatba jegyezzük fel, ahol a fenti képletekkel ki tudjuk számolni a H és NPSHa értékeit is:

Ssz.	n [1/min]	Δh_{mp} [mm]	Δh_{szn} [mm]	p_b [bar]	megfigyelés	zónahossz [mm]	Q [m ³ /h]	H [m]	NPSH _a [m]
1.									
2.									
3.									

A számolt adatokból felvesszük az adott térfogatáramhoz tartozó leszívási görbét, melyen jelöljük a becsült zónahosszakat is.



8. ábra. Mérőperem beállítása adott térfogatáramokhoz

6. Mérési eredmények feldolgozás

A tanszéki honlapon, a tárgy adatlapján az alaki és a tartalmi követelmények (mérési eredmények feldolgozása, hibaszámítás, stb.) egyaránt megtalálhatók.

7. Felkészülés a mérésre

1. A mérés eredmények feljegyzéséhez szükséges táblázat elkészítése.
2. Milliméterpapírt kell hozni az ellenőrző diagram elkészítéséhez.
3. Ismerni kell a mérési tájékoztatót. A tájékoztató ismeretét a mérés kezdetekor ellenőrizzük.

8. Felkészülést ellenőrző kérdések

1. Ismertesse a kavitáció jelenségét, kialakulását!
2. Mi a fizikai, technikai és szuperkavitáció közötti különbség!
3. Írja fel a tanult $NPSH_a$ definícióját és magyarázza a tagokat!
4. Rajzolja le jellegre helyesen a leszívási jelleggörbét és ismertesse a fontosabb szakaszait!
5. Ismertesse a leszívási jelleggörbe mérésének menetét!
6. A leszívási jelleggörbe ismeretében milyen kritériumot tud felállítani az $NPSH_a$ értékére? Válaszát indokolja!
7. Ismertesse a mérés célját és a meghatározandó mennyiségeket!
8. Vácsolja és ismertesse a mérőberendezést!

9. Mérési feladatok

- 1) Számolja ki a szivattyú hasznos teljesítményét kavitációmentes üzem esetén és hasonlítsa össze
a) a technikai kavitációs üzem hasznos teljesítményével!
b) a szuperkavitációs üzem hasznos teljesítményével!

- 2) Válasszon villanymotort (fordulatszám mérése szükséges, a motort fordulatszámát frekvenciaváltóval szabályozzuk), ha a szivattyú hatásfoka
 - a) 85%!
 - b) 75%!

- 3) Számolja ki a szívócsonkban az abszolút nyomás értékét és hasonlítsa össze az adott környezeti hőmérséklethez tartozó telítési gőznyomás értékével
 - a) technikai kavitációs üzem esetére!
 - b) szuperkavitációs üzem esetére!

9. Irodalom

- [1] Dr Fűzy Olivér: Áramlástechnikai gépek és rendszerek, Tankönyvkiadó, Budapest, 1991
- [2] Józsa István: Örvényszivattyúk, Info prod kiadó Kft., 2003
- [3] Dr. Garbai László: Hidraulikai számítások az épületgépészetben és az energetikában, 11.5. fejezet, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2007.