



PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM
Műszaki és Informatikai Kar
Mérnöki és Smart Technológiák Intézet
Épületgépész- és Létesítménymérnöki Tanszék



VESZTERGOMBI ÁDÁM NORBERT

Szivattyúk hidraulikus kapcsolásának optimális vezérlése

TDK Dolgozat

Pécs, 2024

Tartalmi összefoglaló

A hatékony folyadékmozgatás napjainkban kulcsfontosságú a fenntartható energiagazdálkodás és a költséghatékony infrastruktúra kialakítása szempontjából. Az egyik ilyen megoldás a szivattyúk kaszkád vezérlésének optimalizálása, amely lehetővé teszi a rendszer rugalmasságának növelését és a költséghatékony működést. Ebben a dolgozatban a figyelmet a két, illetve egy szivattyúval történő rendszerüzemeltetés összehasonlítására összpontosítottam annak érdekében, hogy meghatározzam, milyen terhelés mellett érdemes be- és kiléptetni a második szivattyút. A dolgozatban bemutatott eredményeket az egyetemen található Grundfos mérőkörön történő mérésekkel is alátámasztom. Illetve, célom volt egy, az eredményekkel kiegészített jelleggörbe létrehozása, amely elősegíti a részterhelésen történő üzemeltetés költséghatékonyságának optimalizálását. Ezen diagramok összehasonlítása a későbbiekben egyszerűen ellenőrizhetővé teszi az eredeti szivattyú kiválasztás helyességét is. Ugyanis különböző szivattyúk összehasonlítása, a terhelések ismeretében, egyértelműen megmutatja, hogy a felvett villamos teljesítmény csökkenthető-e.

Inhaltsangabe / Executive Summary

Today, efficient fluid handling is key to sustainable energy management and cost-effective infrastructure. One such solution is to optimise the cascade control of pumps, allowing for increased system flexibility and cost-effective operation. In this thesis, I have focused my attention on comparing system operation with two pumps and one pump in order to determine the load conditions at which it is appropriate to start and stop the second pump. The results presented in the thesis are supported by measurements on the Grundfos measuring circuit at the university. Furthermore, my aim was to create a characterisation curve complemented with the results to help optimise the cost-effectiveness of operation at part load. The comparison of these charts will also allow easy verification of the correctness of the original pump selection in the future. Comparing different pumps, knowing the loads, will clearly show whether the electrical power input can be reduced.

Tartalomjegyzék

Bevezetés	5
1. Irodalom kutatás.....	6
1.1. Szivattyú jelleggörbe és a munkapont	6
1.2. Szivattyúk soros és párhuzamos kapcsolása	9
2. Szivattyúk kapcsolások optimális vezérlése	11
2.1. PTE MIK Grundfos mérőkör bemutatása	11
2.2. Grundfos szivattyú kiválasztó program	14
2.3. Hidraulikus kapcsolások optimalizálási folyamata.....	19
2.4. Az optimális vezérlés ellenőrzése mérésekkel.....	24
2.5. Az optimális vezérlés méréseinek hibaelemzése	34
Összefoglalás, következtetések, javaslatok	38
Ábrajegyzék	39
Irodalomjegyzék	40
Mellékletek	41

Bevezetés

A vízellátás és folyadékmozgatás hatékony megoldásainak keresése napjainkban kulcsfontosságú a fenntartható energiagazdálkodás és a költséghatékony infrastruktúra kialakítása szempontjából (1). Az egyik ilyen megoldás a szivattyúk kaszkád vezérlésének optimalizálása, amely lehetővé teszi a rendszer rugalmasságának növelését és a költséghatékony működést. Ebben a dolgozatban a figyelmet a két, illetve egy szivattyúval történő rendszerüzemeltetés összehasonlítására összpontosítjuk annak érdekében, hogy meghatározzuk, milyen terhelés mellett érdemes be- és kiléptetni a második szivattyút. Ez a téma rendkívül sok érdekes és gyakorlati aspektust rejt magában. Célunk az optimális terhelési szintek meghatározása, azaz, hogy milyen terhelési szinteknél költséghatékonyabb már két szivattyúval üzemeltetni az adott rendszert.

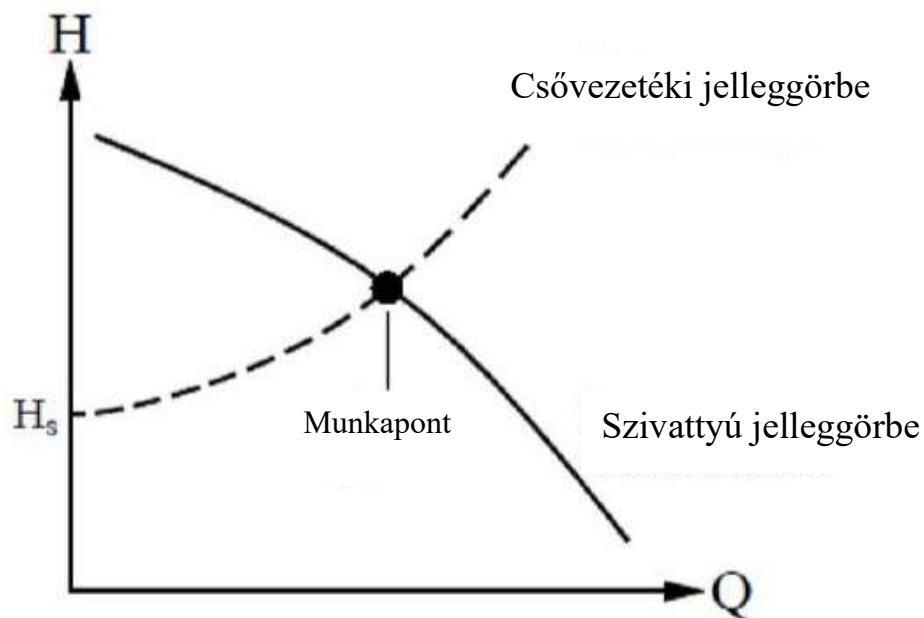
Ezen dolgozat elején áttekintjük a szivattyú szabályozás alapjait, a párhuzamos és soros kapcsolat előnyeit és hátrányait. Ezt követően részletesen bemutatjuk a rendelkezésünkre álló mérőkört, az itt található szivattyúkat vesszük számításaink alapjául, amelyek a későbbiekben mérésekkel ellenőrizhetőek lesznek. A szivattyúk jelleggörbéi alapján felállítjuk hipotézisünket, hogy mely munkapontok átlépése után lesz célszerűbb már két szivattyúval ellátni a jelentkező igényeket. Ezen munkapontokat precízen beállítjuk a mérőkörön és mérjük a villamos áram felvételt egy, illetve két szivattyú üzemelése során is. Várhatóan a mérési eredményeink közel azonosak lesznek a jelleggörbéről meghatározott értékekkel. A mérés lezárásaképpen hibaelemzést végzünk, amellyel kalkulálva levonjuk következtetéseinek a mérés, illetve a téma a kapcsán.

1. Irodalom kutatás

A szivattyúk kaszkád vezérlése nem csupán technikai, hanem gazdasági és műszaki kihívásokat is magában foglal, és megértése alapvető fontosságú a hatékony rendszerműködés és költséghatékony tervezés szempontjából. A szivattyúk kaszkád vezérlése olyan terület, ahol a műszaki mélység mellett a gazdasági aspektusok is meghatározóak. A rendszerek optimalizálása és a költséghatékonyság elérése érdekében számos változó áll szoros kölcsönhatásban egymással. Mivel a téma komplexitása magas, az alapok átismétlése elengedhetetlen azok számára, akik a kutatás ezen szakaszába mélyednek. Ebben a fejezetben áttekintjük a szivattyúzás alapjait, a szivattyúk jelleggörbáját, munkapontját és a párhuzamos, illetve soroskapcsolását, annak érdekében, hogy megteremtjük azt a szilárd alapot, amelyre a további részletező elemzéseket és eredmények értelmezését építhetjük.

1.1. Szivattyú jelleggörbe és a munkapont

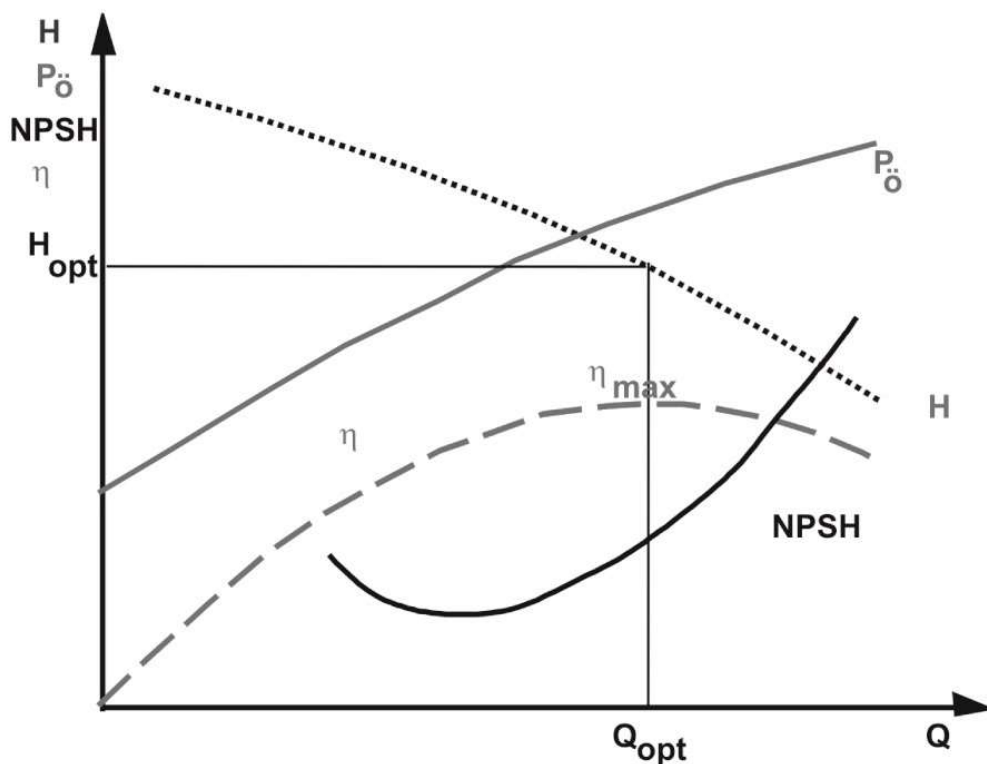
A szivattyú jelleggörbéje egy rendkívül részletes és informatív ábrázolás, amely szemlélteti a szivattyú teljesítményét változó működési pontokon keresztül (2). Ezen görbe elemzése kiemelkedő fontosságú a szivattyúrendszer tervezése, üzemeltetése és karbantartása során. Az ábrázolás a vízszintes és függőleges tengelyen elhelyezett pontokon keresztül mutatja be a szivattyú áramlási és nyomási karakterisztikáját. A vízszintes tengelyen az áramlás látható, míg a függőleges tengelyen a nyomás.



1. ábra: Szivattyú jelleggörbe
(forrás: <https://slideplayer.hu/>)

A határhelyek, amelyek a görbe elején és végén találhatók, jelzik a szivattyú maximális és minimális teljesítményét. Ezek az adatok alapvetőek a szivattyú biztonságos és hatékony üzemeltetése szempontjából.

A hatékonyság az optimális működési pont környékén a legmagasabb (3), de a görbe más területei is fontosak. Az áramlás növekedésével vagy csökkenésével a hatékonyság változik, és a jelleggörbe segít azonosítani a leghatékonyabb működési tartományokat.



2. ábra: Szivattyú jelleggörbe

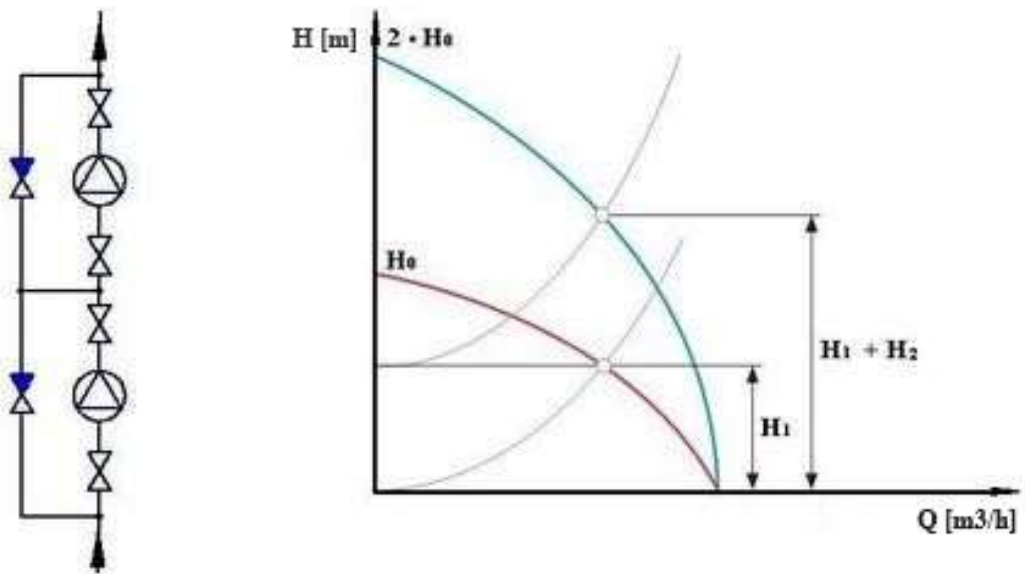
(forrás: <http://www.moe.hu/>)

Az NPSH követelmények, amelyek a kavitáció elkerülésére szolgálnak, a görbén ábrázolva vannak, és figyelmeztetnek a szivattyú működési környezetének fontosságára. Összességében a szivattyú jelleggörbéje tehát egy gazdag információforrás, amelynek átfogó értelmezése lehetővé teszi a szivattyúrendszer pontosabb tervezését, hatékonyabb üzemeltetését és hosszabb élettartamát.

1.2. Szivattyúk soros és párhuzamos kapcsolása

A szivattyúk sorba kapcsolása egy összetett rendszertervezési megközelítés, amely a folyadékmozgatás hatékonyságát és rendszerstabilitást célozza meg. Ebben a konfigurációban a szivattyúkat egymás után helyezik el, és a folyadék az egyik szivattyú által generált nyomás hatására áramlik tovább a következő szivattyúba. Ennek az elrendezésnek számos előnye van, beleértve a nyomásnövekedést, az egyenletes terheléeloszlást és a rendszer megbízhatóságának javulását.

A szivattyúk sorosba kapcsolásának egyik alapvető előnye a nyomásnövekedés. Ebben a konfigurációban a kimenő nyomások egyszerűen összeadódnak, így a rendszerben elérhető maximális nyomás növekszik. Ezáltal a sorosan kapcsolt szivattyúk rendszere hatékonyan kezelhet olyan alkalmazásokat, ahol magas nyomás szükséges.



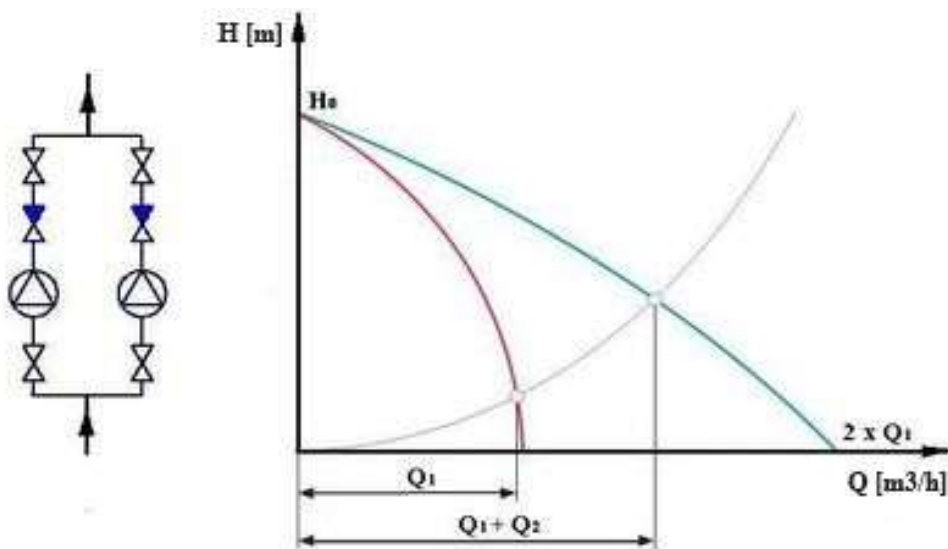
3. ábra: Szivattyúk sorba kapcsolása

(forrás: <https://www.nasos-pump.ru/>)

Az egyenletes terheléeloszlás egy további előnye ennek a konfigurációnak. A szivattyúk, mivel egymás után helyezkednek el, az áramlás terhelése egyenletesen oszlik meg közöttük, minimalizálva a terhelési különbségeket. Ez csökkenti az egyes szivattyúk elhasználódását, és növeli a rendszer megbízhatóságát.

A szivattyúk párhuzamos kapcsolása hidraulikai rendszerek tervezési megoldása, ahol két vagy több szivattyút egyszerre üzemeltetnek a folyadék térfogatáramainak kombinálásával. Ez a konfiguráció több előnnyel járhat a rendszer hatékonysága és megbízhatósága szempontjából, különös tekintettel a hidraulikai viszonyokra.

Az egyik fő előnye a párhuzamos kapcsolásnak a folyadék térfogatáramok egyidejű összeadódása. A párhuzamosan üzemelő szivattyúk kombinált térfogatárama megnöveli az áramlást a rendszerben, ami különösen előnyös olyan alkalmazásoknál, ahol nagyobb térfogatáramra van szükség.



4. ábra: Szivattyúk párhuzamos kapcsolása

(forrás: <https://www.nasos-pump.ru/>)

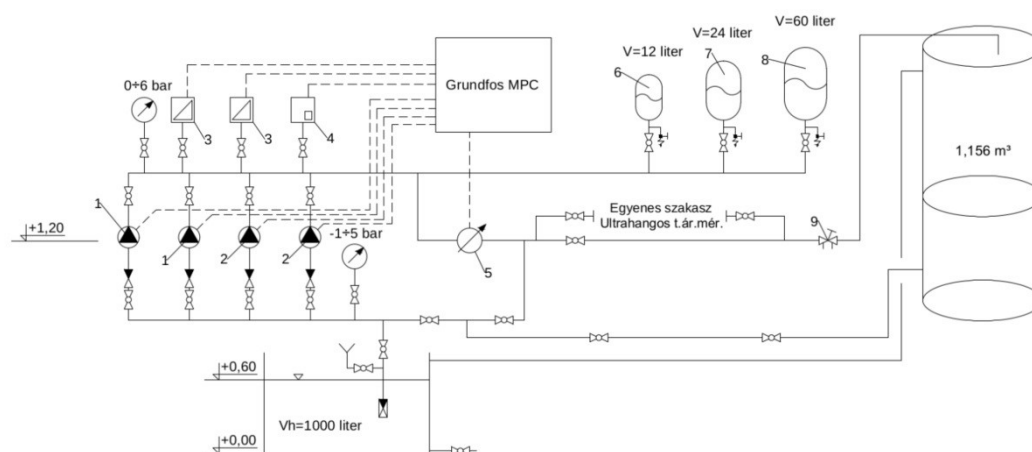
A rugalmasság szintén kulcsfontosságú az ilyen rendszerben. A párhuzamosan kapcsolt szivattyúkat könnyen lehet szabályozni az aktuális igényekhez. A szivattyúk be- és kikapcsolása, valamint a sebesség szabályozása lehetővé teszi a rendszer számára a változó terheléshez való dinamikus alkalmazkodást.

Minden esetben fontos mérlegelni a rendszer nyomáscsökkenését, amely a csövek és egyéb hidraulikai elemek okozhatnak. Az ilyen veszteségek minimalizálása és a pontos szivattyúk szinkronizációja elengedhetetlen a hatékony működés érdekében. Továbbá elengedhetetlenek a rendszeres ellenőrzések és karbantartások a megbízható és költséghatékony üzemeltetés fenntartásában.

2. Szivattyúk kapcsolások optimális vezérlése

2.1. PTE MIK Grundfos mérőkör bemutatása

A Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Karán végzett méréseket a Grundfos szivattyúk párhuzamos kapcsolású mérőkörén hajtottam végre. A mérőkör nemcsak a szivattyúk energia-felhasználásának vizsgálatára, hanem más kutatási feladatok elvégzésére is alkalmas. Ennek keretében különböző épületgépészeti szerelvények, idomok hidraulikai jellemzőit lehet mérni, továbbá vizsgálható a hálózati nyomás hatása a szerelvények vízkibocsátására.



5. ábra: Grundfos mérőkör

(forrás: [Szóke András: Nyomásfokozó szivattyúcsoportok energiafelhasználásának elemzése, 2016](#))

Sorszám	Megnevezés
1	Grundfos CRE 3-5 frekvenciaváltós szivattyú
2	Grundfos CR 1-7 állandó fordulatszámú szivattyú
3	Danfoss MBS 3000 nyomástávadó
4	Tival FF 4-8 Day nyomáskapcsoló
5	Grundfos VFI térfogatáram mérő
6	Grundfos GT-H-12V 12 literes tágulási tartály
7	Grundfos GT-H-24V 24 literes tágulási tartály
8	Grundfos GT-H-60V 60 literes tágulási tartály
9	Oventrop DN50 beszabályozó szelep

A mérőkör két szinten helyezkedik el. Alul található a rendszer lényegét alkotó szivattyúcsoportok, ide tartozik a két frekvenciaváltós CRE 3-5 és a további két állandó fordulatszámú CR 1-7 szivattyú. A szivattyúk előtt a szívóoldalon visszacsapó szelepek találhatók. Ezek a párhuzamos kapcsolásban kritikus szerepet játszanak, hogy amikor csak az egyikük működik, ne szívja le a vizet a másik szivattyúról. A földszinten találhatóak továbbá a mechanikus, kizárólag az ellenőrzést szolgáló manométerek, valamint két elektronikus nyomástávadó, amelyek az ellenőrző jelet küldik a vezérlőszekrény felé. Emellett a mérőkör rendelkezik két térfogatáram mérővel, valamint három hidrofor tartállyal is, melyek különböző méreteik révén eltérő rendszerjellemzőket tesznek lehetővé a szimuláció során. Ez a három tartály 12, 24 és 60 literesek, és külön-külön kizárhatók a rendszerből.

Az emeleten helyezkedik el egy többcsonkos, 1.16 m^3 -es nyitott víztartály, amelybe a nyomásfokozó szivattyú pumpálja a vizet. A víz a tartály tetején érkezik be, majd az alján távozik vissza a szivattyúk felé, ezzel egy közel zárt hurkot alkotva. Működés közben a víz áramlik ebben a hurokban, így vízpótlásra nincs szükség a mérések és szimulációk során. Az összes szerelvény gömbcsapokkal van körbevéve, biztosítva ezzel könnyű cserélhetőségüket. A nyomóoldali osztót és gyűjtőt alkotó vezeték 2" átmérőjű horganyzott acélból készült.

A konkrét mérés során csak a két darab CRE 3-5 szivattyúval üzemeltetett hidraulikai kört használtam fel, amely a felső víztartállyal kapcsolódott össze. A Grundfos MPC szekrény beállítása után a szivattyúk jelet kapnak, hogy mekkora nyomást kell előállítaniuk. Ezt a rendszer, a beépített nyomásérzékelője által, adott időközönként ellenőrzi és szükség esetén beavatkozik, csökkenti vagy éppen növeli a fordulatszámot. A térfogatáram az Oventrop szelep fojtásával, minimális ingadozással, jól beállítható. Így bármilyen tetszőlegesen választott munkapont könnyen és jó közelítéssel mérhető.

Miután a fent említett módon sikerült beállítani a mérendő munkapontot és a rendszer már lengésmentesen üzemel, a villamos fogyasztást és minden befolyásoló egyéb körülményt körültekintően feljegyeztem. A szivattyúk által felvett teljesítményt az alábbi, Voltcraft SEM5000 (VC-12936570) konnektoros energiafogyasztásmérővel állapítottam meg.



6. ábra: Voltcraft SEM5000 energiafogyasztásmérő

(forrás: <https://www.conrad.hu/>)

2.2. Grundfos szivattyú kiválasztó program

A Grundfos szivattyú kiválasztó programja egy rendkívül hasznos online eszköz, amely segíti a felhasználókat abban, hogy megtalálják az optimális szivattyút az adott alkalmazásokhoz. Az eszköz rendelkezik egy átfogó adatbázissal, amely tartalmazza a Grundfos által kínált szivattyúk teljes kínálatát, valamint ezekhez kapcsolódó technikai információkat.

A program használata egyszerű és intuitív. A felhasználóknak először meg kell adniuk az alkalmazásuk jellemzőit és követelményeit. Ez lehet például a szivattyú által szállított folyadék típusa, a szükséges teljesítmény, a nyomás- és áramlási követelmények, valamint az üzemeltetés környezeti feltételei.

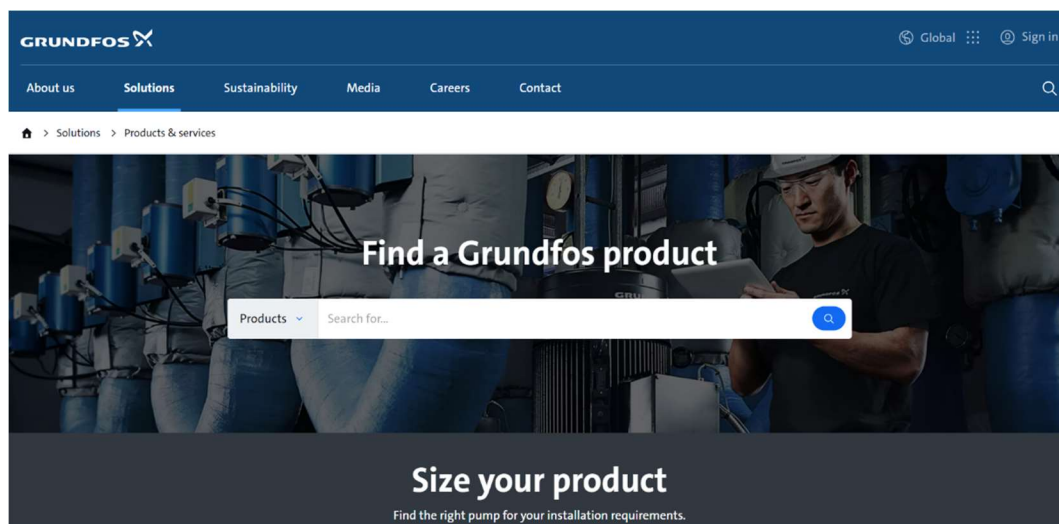
Miután ezeket az információkat megadták, a program számos opciót kínál a legmegfelelőbb szivattyú kiválasztására. Az ajánlott szivattyúk között lehet válogatni az alkalmazás igényeinek leginkább megfelelő típusok között, figyelembe véve például a teljesítményt, az energiahatékonyságot és a tartósságot.

Emellett a Grundfos szivattyú kiválasztó programja gyakran frissül, hogy megfeleljen az új termékek és technológiák piacra kerülésének. Ezáltal mindig naprakész és releváns információkat kínál a felhasználóknak az optimális szivattyú kiválasztásához.

Amennyiben meglévő rendszert szeretnénk ellenőrizni, ugyanilyen egyszerű módon kikereshető a beépített típus. A rendszerigényeit ugyanúgy megadva megkapjuk a szivattyú jelleggörbére illesztett munkapontot és minden hozzátartozó paramétert.

A rendszer már képes hidraulikai kapcsolásokat is kezelni, ami még egyszerűbbé teszi számunkra a dolgozatunk témájának választott optimalizálást. Ezt a folyamatot szeretném részletesen bemutatni, hisz a mérések hibaelemzéséből kiderült, hogy használható, helyes adatokkal tudunk már ebben a programban is számolni.

A <https://product-selection.grundfos.com/> weboldalon található a Grundfos szivattyú kiválasztó segédprogramja. A weboldalra belépve az alábbi kereső fogad minket:



7. ábra: Grundfos szivattyú kiválasztó segédprogram
(forrás: <https://product-selection.grundfos.com/>)

A szivattyútípusra rákeresve a program kilistázza számunkra a különböző cikkszámú variációkat:

The screenshot displays the Grundfos website's product selection tool. At the top, the Grundfos logo and navigation menu are visible. A search bar contains the text "CRE 3-5 A-A-A-E-HQQE". Below the search bar, the "Products" tab is selected, showing a list of results. The main content area is titled "Products" and features a "Filter list" on the left with various criteria like Product Range, Discontinued Products, Frequency, Phase, Shaft seal, IE Eff. Class, MEI, IP Class, Rated head, Rated flow, Pump housing, Pump inlet, Pump outlet, Pressure rating, Impeller, Approvals, and Product. The main area displays two product variants. The first variant, "CRE 3-5 A-A-A-E-HQQE", lists detailed specifications: Product No. 98389696, Frequency 50/60 HZ, Connect code A, Pump housing Cast iron, Phase 3, P2 0.75kW, IE Eff. Class IES, Pressure rating PN 16, Shaft seal HQQE, U 380-500V, Maximum ambient temperature 50°C, Material code A, Pump version A, Eta 1/1 85.9%, Rated flow 3.5m³/h, Rated head 35.6m, i 1,70-1,60A, Liquid max temp 120°C, Impeller Stainless steel, MEI 0.70, Model A, Motor protec ELEC, Motor type 80A, n 360-4000rpm, Pump outlet 1, Maximum permissible operating pressure 16bar, IP Class IP55, Pump inlet 1, Insulation F, Finnish LVI No. 4925676, Danish VVS No. 385941605, and Swedish RSK No. 5855667. The second variant, "CRE 3-5 A-A-A-E-HQQE", lists: Product No. 98390000, Frequency 50/60 HZ, Connect code A, Rated head 34m, i 4,70-3,90A. Images of the pumps are shown next to their respective specifications.

Filter list	Reset
Product Range	
Discontinued Products	
Frequency	
Phase	
Shaft seal	
IE Eff. Class	
MEI	
IP Class	
Rated head	
Rated flow	
Pump housing	
Pump inlet	
Pump outlet	
Pressure rating	
Impeller	
Approvals	
Product	

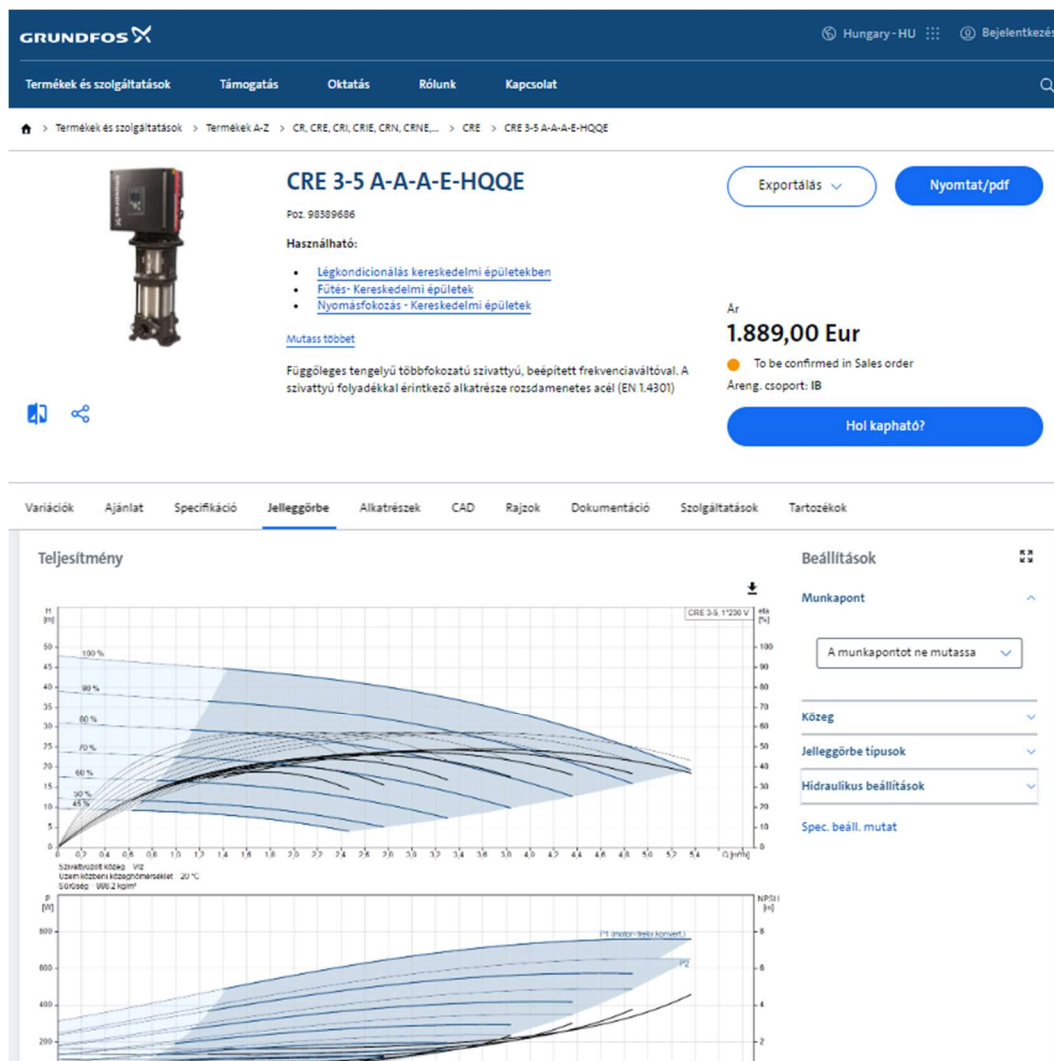
VARIANT			
CRE 3-5 A-A-A-E-HQQE			
Product No	98389696	Liquid max temp	120°C
Frequency	50/60 HZ	Impeller	Stainless steel
Connect code	A	MEI	0.70
Pump housing	Cast iron	Model	A
Phase	3	Motor protec	ELEC
P2	0.75kW	Motor type	80A
IE Eff. Class	IES	n	360-4000rpm
Pressure rating	PN 16	Pump outlet	1
Shaft seal	HQQE	Maximum permissible operating pressure	16bar
U	380-500V	IP Class	IP55
Maximum ambient temperature	50°C	Pump inlet	1
Material code	A	Insulation	F
Pump version	A	Finnish LVI No.	4925676
Eta 1/1	85.9%	Danish VVS No.	385941605
Rated flow	3.5m³/h	Swedish RSK No.	5855667
Rated head	35.6m		
i	1,70-1,60A		

VARIANT			
CRE 3-5 A-A-A-E-HQQE			
Product No	98390000	Rated head	34m
Frequency	50/60 HZ	i	4,70-3,90A
Connect code	A		

8. ábra: Szivattyú típus találatok

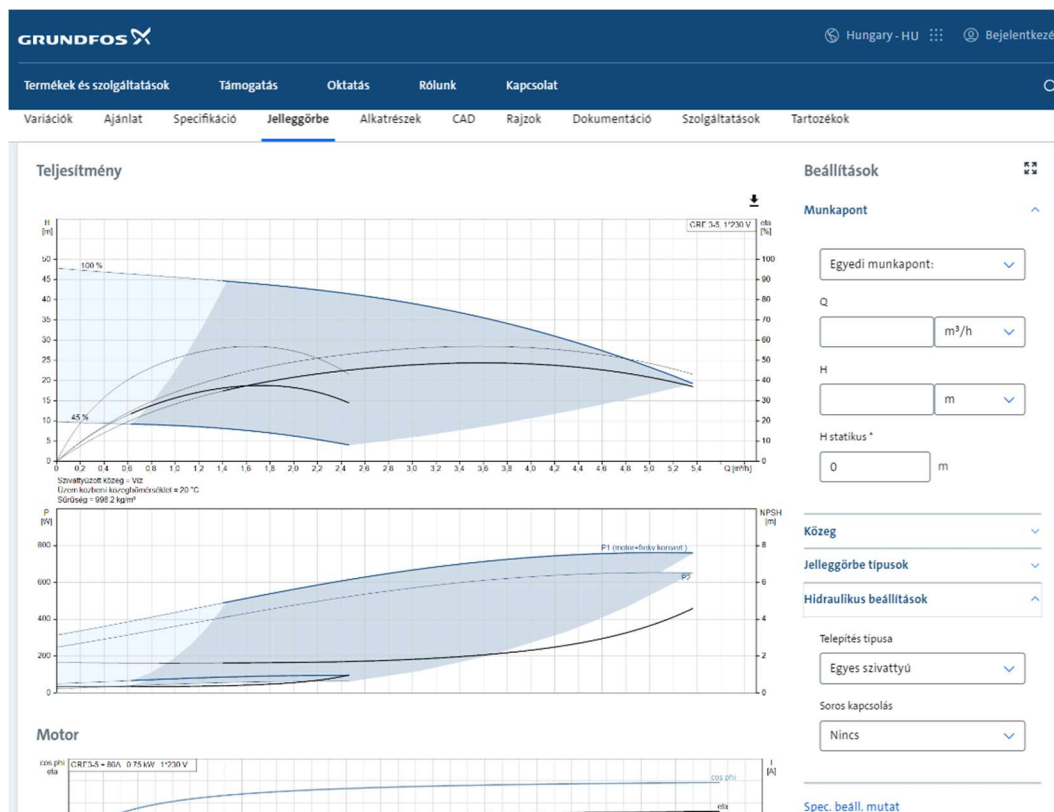
(forrás: <https://product-selection.grundfos.com/>)

A számunkra megfelelő szivattyút kiválasztva már ellenőrizhetjük a jelleggörbe fölött, hogy ezen berendezés alkalmas-e a legjobban ellátni a jelentkező igényeket.



9. ábra: A szivattyú jelleggörbe menüpontja
(forrás: <https://product-selection.grundfos.com/>)

Ebben a menüben a jobb oldalon megadható a kívánt munkapont, illetve a hidraulika beállítások alatt kiválasztható a kapcsolás. Lehet egy szivattyús, de lehet akár 15 darab párhuzamosan kapcsolt vagy akár 6 darab sorosan kapcsolt azonos típusú szivattyúval számolni. Illetve vizsgálható soros kapcsolás egy darab eltérő típusú szivattyúval is.



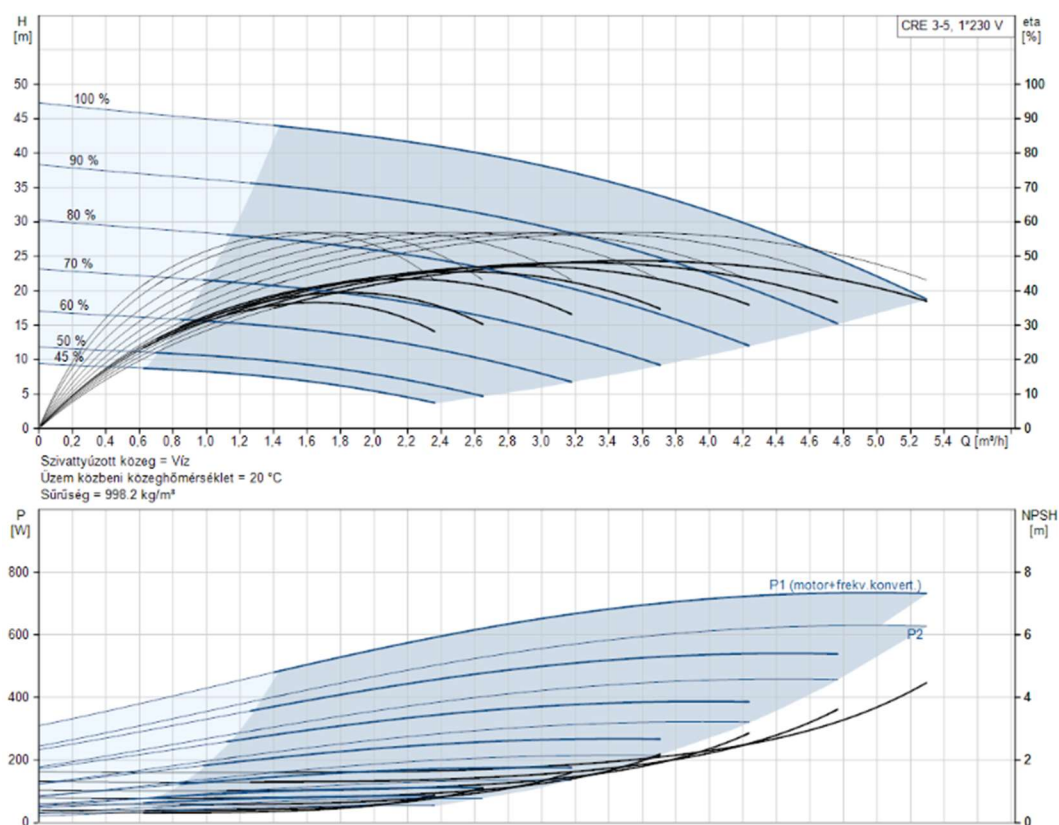
10. ábra: A szivattyú munkapont és hidraulika beállítások megadása

(forrás: <https://product-selection.grundfos.com/>)

Amennyiben meglévő rendszert és üzemállapotokat szeretnénk vizsgálni, ebben a menüpontban megtudunk határozni minden üzemeltetési jellemzőt. Ezek alapján már könnyen kiválaszthatjuk az adott üzemállapothoz tartozó legoptimálisabb működést. Végül a szivattyúk vezérlőjén keresztül meg tudjuk adni, az optimális léptetéshez tartozó fordulatszámokat.

2.3. Hidraulikus kapcsolások optimalizálási folyamata

A szivattyúk adatlapja alapján minden információt meg lehet találni a Grundfos honlapján. Jelen esetben a CRE 3-5 A-A-A-E-HQQE (Poz. 98389686) jelölésű szivattyú jelleggörbéje számunkra a legfontosabb.



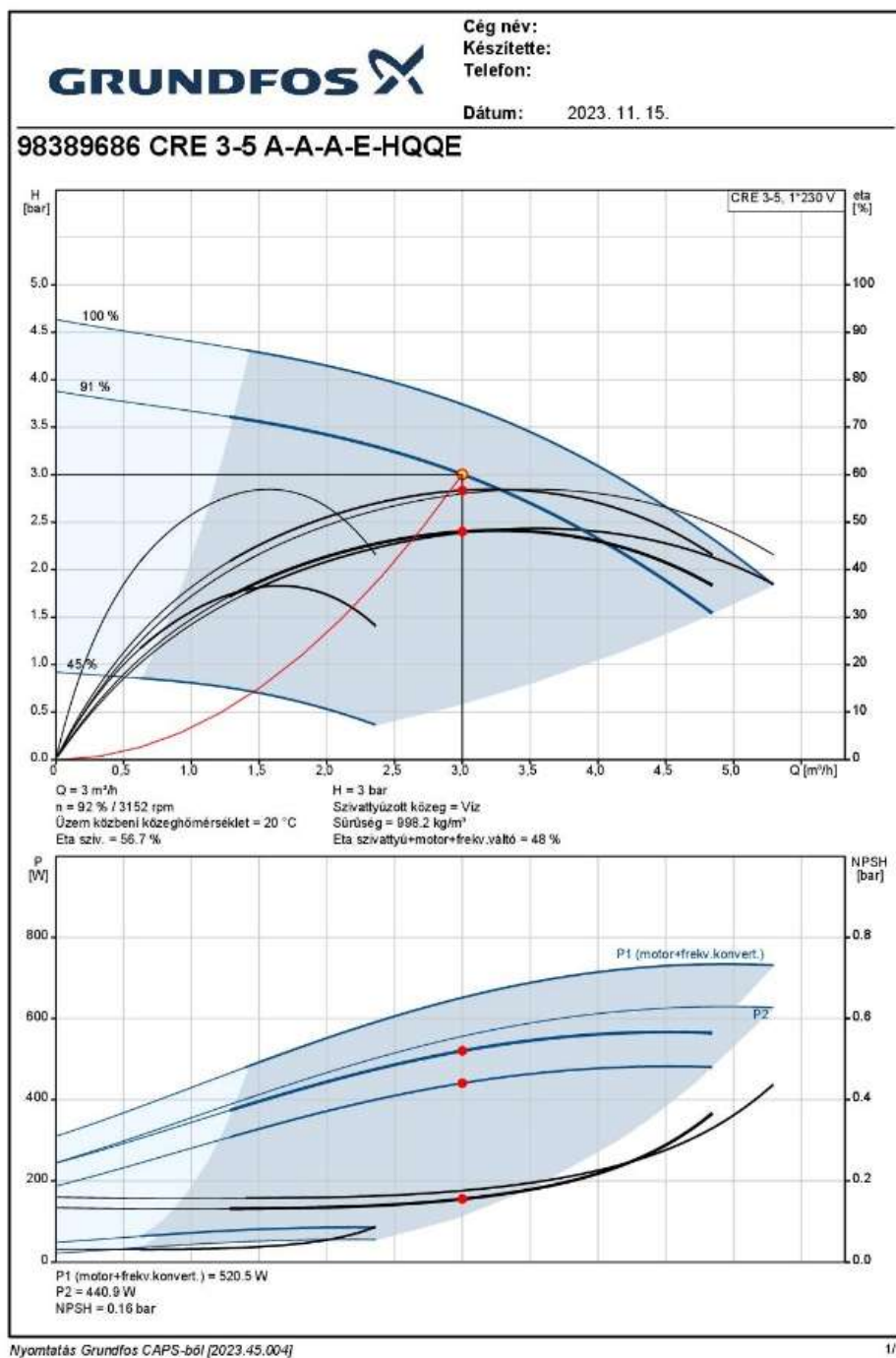
11. ábra: CRE 3-5 A-A-A-E-HQQE (Poz. 98389686) típusú szivattyú jelleggörbéje

(forrás: <https://product-selection.grundfos.com/hu/>)

Jól látható, hogy a frekvenciaváltós szivattyúk esetén különböző jelleggörbék tartoznak az egyes fordulatszámokhoz (4). Természetesen ezen fordulatszámoknál történő üzemeltetés esetén a hatásfok és a villamos teljesítményfelvétel is változik (5) (6) (7). Ez nagyban befolyásolja a fogyasztást és ezáltal a költséghatékonyságot is. Tehát célunk a beépített szivattyúkat az optimális állapothoz lehető legközelebbi pontban üzemeltetni.

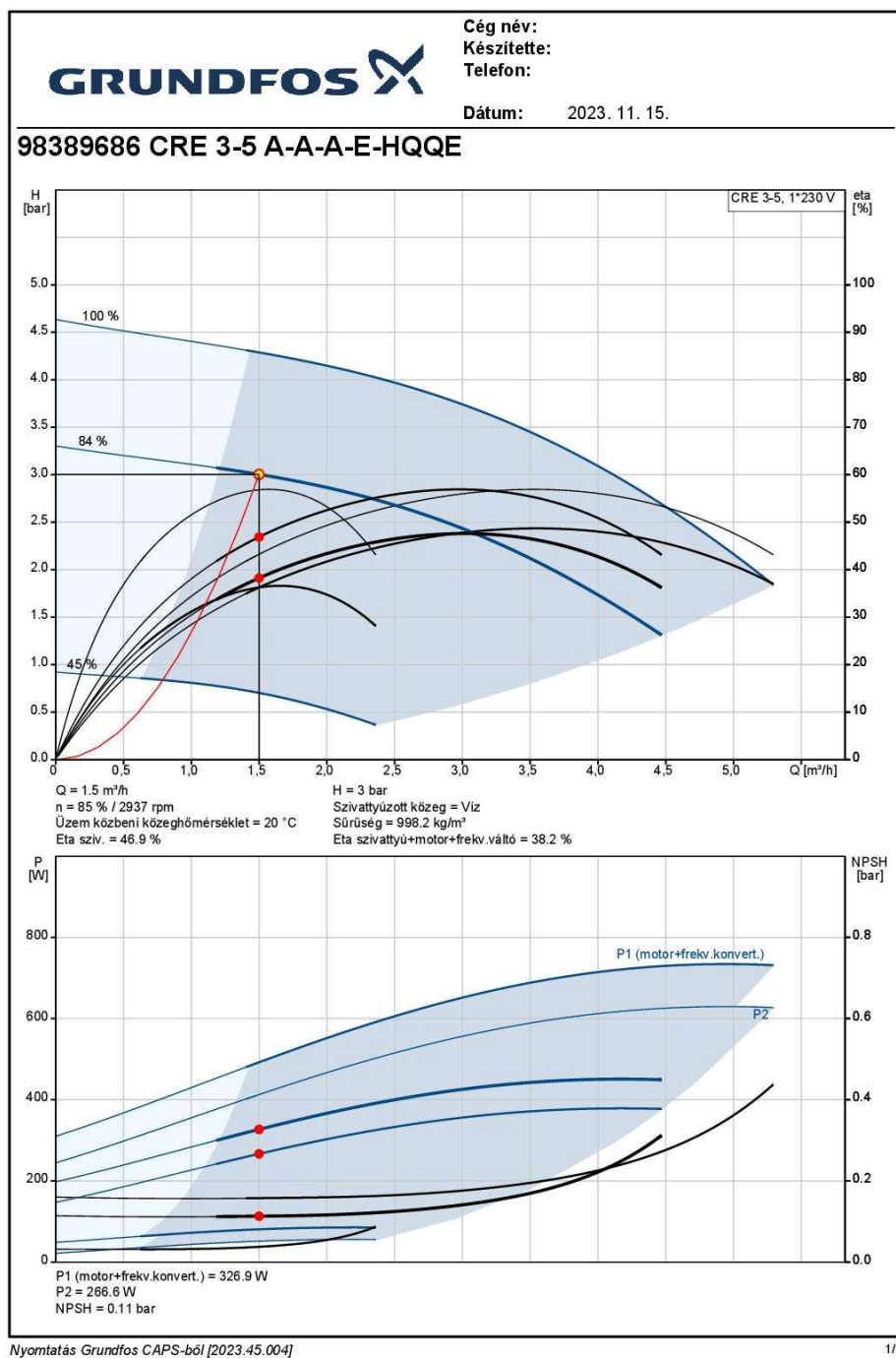
Több szivattyús rendszereknél a szükséges munkapontot egy, kettő vagy akár még több szivattyú is előállíthatja egyidejűleg (8). Ez a 1.2. Szivattyúk soros és párhuzamos kapcsolása pont alatt tárgyalt módon megosztja a terheléseket a szivattyúk között. Azonban sajnálatos módon az optimális teljesítményfelvétel nem kap megfelelő hangsúlyt és az igények ellátása mellett és teljesmértékben háttérbe szorul.

Ipari szinten, a kaszkád szivattyús rendszerek optimális beállítás éves szinten több száz kWh energia megtakarítást is jelenthet (9) (10). Ezen dolgozat fő célkitűzése az optimális paraméterek meghatározás a rendelkezésre álló gyártói jelleggörbék alapján. A 2.1. Mérőkör bemutatása pontban leírtak szerint, párhuzamosan kapcsolt CRE 3-5 típusú szivattyúkat vizsgálunk. Elmondható, hogy ezen kapcsolásnál a térfogatáramok összeadódnak. Tehát mindkét szivattyú egyidejű üzemelése esetén, azok azonos nyomáson feleannyi vizet szállítanak, mintha csak az egyik látná el a jelentkező igényeket. A jelleggörbe alapján ezen esetekben meghatározhatóak a fordulatszámok és a felvett teljesítmény is. Például, amennyiben $3 \text{ m}^3/h$ térfogatáram 3 bar nyomáson történő szállítása az igény, a munkapontok az alábbi módon alakulnak:



12. ábra: Egy darab CRE 3-5 típusú szivattyú munkapontja egyedüli üzem esetén

(forrás: <https://product-selection.grundfos.com/hu/>)



13. ábra: Egy darab CRE 3-5 típusú szivattyú munkapontja a két szivattyú egyidejű üzeme esetén

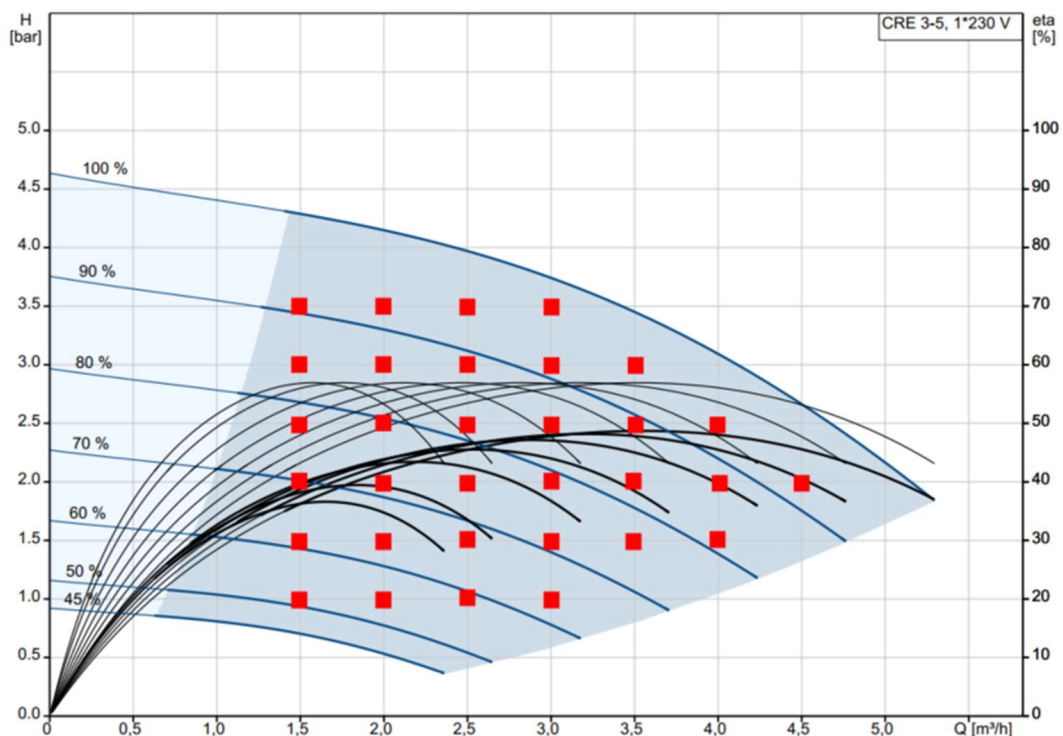
(forrás: <https://product-selection.grundfos.com/hu/>)

A fenti ábrákon egyértelműen látszik, hogy bár a szállítandó térfogatáram felére csökkent, de a hatásfok jelentősen romlott. Amennyiben a kaszkád vezérlés úgy került beállításra, hogy az első szivattyú 90%-os fordulatszáma fölött léptesse be a másodikat úgy a felvett villamos teljesítmény 520.5 W -ról, $2 \cdot 326.9\text{ W} = 653.8\text{ W}$ -ra változik. Ami több, mint 25%-os többlet energiafelvételt jelent.

2.4. Az optimális vezérlés ellenőrzése mérésekkel

Bár az előző példa nagyon szemléletes, de egy viszonylag szélsőséges eset. Belátható, hogy ez a nagy veszteség a kezdeti magas hatásfok miatt ilyen jelentős. Illetve nyilvánvalóan előállhat olyan eset is, amikor nem tudjuk elkerülni mind a két szivattyú, alacsonyabb hatásfokon történő üzemeltetését. Ezek a problémák, legegyszerűbben, még a tervező asztalon orvosolhatók (11).

Változó tömegáramú vagy nyomásfokozó rendszereknél van a legnagyobb jelentősége a kaszkád vezérlés optimalizálásának (12). A szivattyúk be- és kiléptetésének optimalizálásával rengeteg energia megtakarítható. Annak érdekében, hogy átfogó képet kapjunk ezen szivattyúk optimális üzemeltetéséről, vizsgáljuk meg az alábbi munkapontokat, mind a fenti jelleggörbés módszerrel, mind a mérőkörön történő mérésekkel.



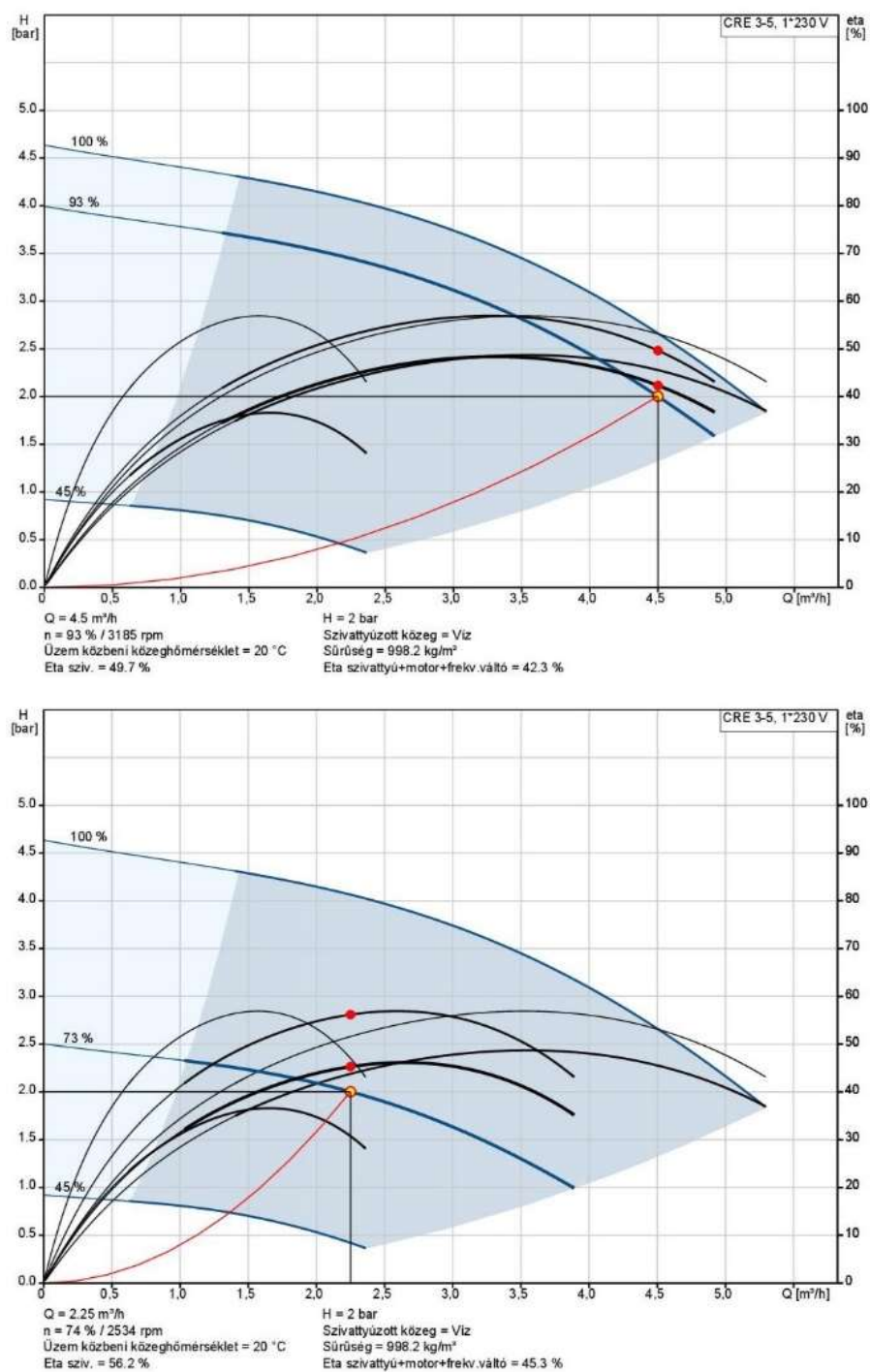
14. ábra: Egy darab CRE 3-5 típusú szivattyú mérendő munkapontjai

(forrás: <https://product-selection.grundfos.com/hu/>)

Q $\left[\frac{m^3}{h}\right]$	H [bar]	$P_{1,jg}$ [W]	$n_{1,jg}$ [%]	$P_{2,jg}$ [W]	$n_{2,jg}$ [%]	$P_{1,m}$ [W]	$n_{1,m}$ [%]	$P_{2,m}$ [W]	$n_{2,m}$ [%]
1.5	1.0	106.0	52	77.54	49	118	52	88	49
1.5	1.5	157.2	62	113.8	59	160	62	119	60
1.5	2.0	211.5	70	155.9	68	234	70	170	69
1.5	2.5	267.6	78	199.8	76	287	78	218	76
1.5	3.0	326.9	85	246.4	83	339	85	280	84
1.5	3.5	388.8	91	295.7	89	416	91	325	90
2.0	1.0	133.6	55	87.00	50	141	55	90	51
2.0	1.5	191.2	64	127.6	60	211	64	135	60
2.0	2.0	253.1	73	173.7	69	268	73	184	69
2.0	2.5	317.4	80	221.6	77	356	80	252	77
2.0	3.0	385.1	87	272.5	84	399	87	295	84
2.0	3.5	455.9	93	325.8	90	497	93	346	90
2.5	1.0	165.7	59	97.09	51	172	60	107	52
2.5	1.5	231.5	68	142.0	61	266	69	155	62
2.5	2.0	300.6	76	192.2	70	320	76	220	71
2.5	2.5	372.9	83	244.2	77	399	83	273	78
2.5	3.0	449.0	89	299.3	84	492	90	332	84
2.5	3.5	528.5	95	356.8	91	556	95	383	91
3.0	1.0	207.4	64	106.0	52	219	64	119	53
3.0	1.5	280.0	72	157.2	62	308	73	161	63
3.0	2.0	356.1	79	211.5	70	369	80	237	70
3.0	2.5	436.7	86	267.6	78	484	87	290	79
3.0	3.0	520.5	92	326.9	85	543	92	351	86
3.0	3.5	608.7	98	388.8	91	646	98	411	92
3.5	1.5	338.2	77	173.5	63	374	77	182	64
3.5	2.0	421.9	83	231.7	71	450	83	266	71
3.5	2.5	509.8	90	292.0	79	557	91	323	80
3.5	3.0	602.1	96	355.5	86	614	96	403	86
4.0	1.5	407.7	82	191.2	64	439	83	216	65
4.0	2.0	499.3	88	253.1	73	530	88	271	74
4.0	2.5	595.3	94	317.4	80	614	95	347	81
4.5	2.0	590.7	93	276.0	74	608	94	298	74

$Q [m^3/h]$	Térfogatáram
$H [bar]$	Nyomás
$P_{1,jg} [W]$	Villamos teljesítményfelvétel, egy szivattyúval, jelleggörbéről
$P_{2,jg} [W]$	Villamos teljesítményfelvétel, két szivattyúval, jelleggörbéről
$P_{1,m} [W]$	Villamos teljesítményfelvétel, egy szivattyúval, mért
$P_{2,m} [W]$	Villamos teljesítményfelvétel, két szivattyúval, mért
$n_{1,jg} [\%]$	Fordulatszám, egy szivattyúval, jelleggörbéről
$n_{2,jg} [\%]$	Fordulatszám, két szivattyúval, jelleggörbéről
$n_{1,m} [\%]$	Fordulatszám, egy szivattyúval, mért
$n_{2,m} [\%]$	Fordulatszám, két szivattyúval, mért

A táblázatban pirossal jelölt eredményeknél már a két szivattyús üzem a költséghatékonyabb. Észrevehető, hogy egyértelműen nem lehet kijelenteni, hogy az első szivattyú x %-os fordulatszáma felett célszerű beléptetni a másodikat. Inkább az adott fordulatszámhoz tartozó hatásfok görbéjével van ez kapcsolatban.



15. ábra: Egy és két darab szivattyú hatásfoka **4.5 m³/h** térfogatáram és **2.0 bar** nyomás mellett

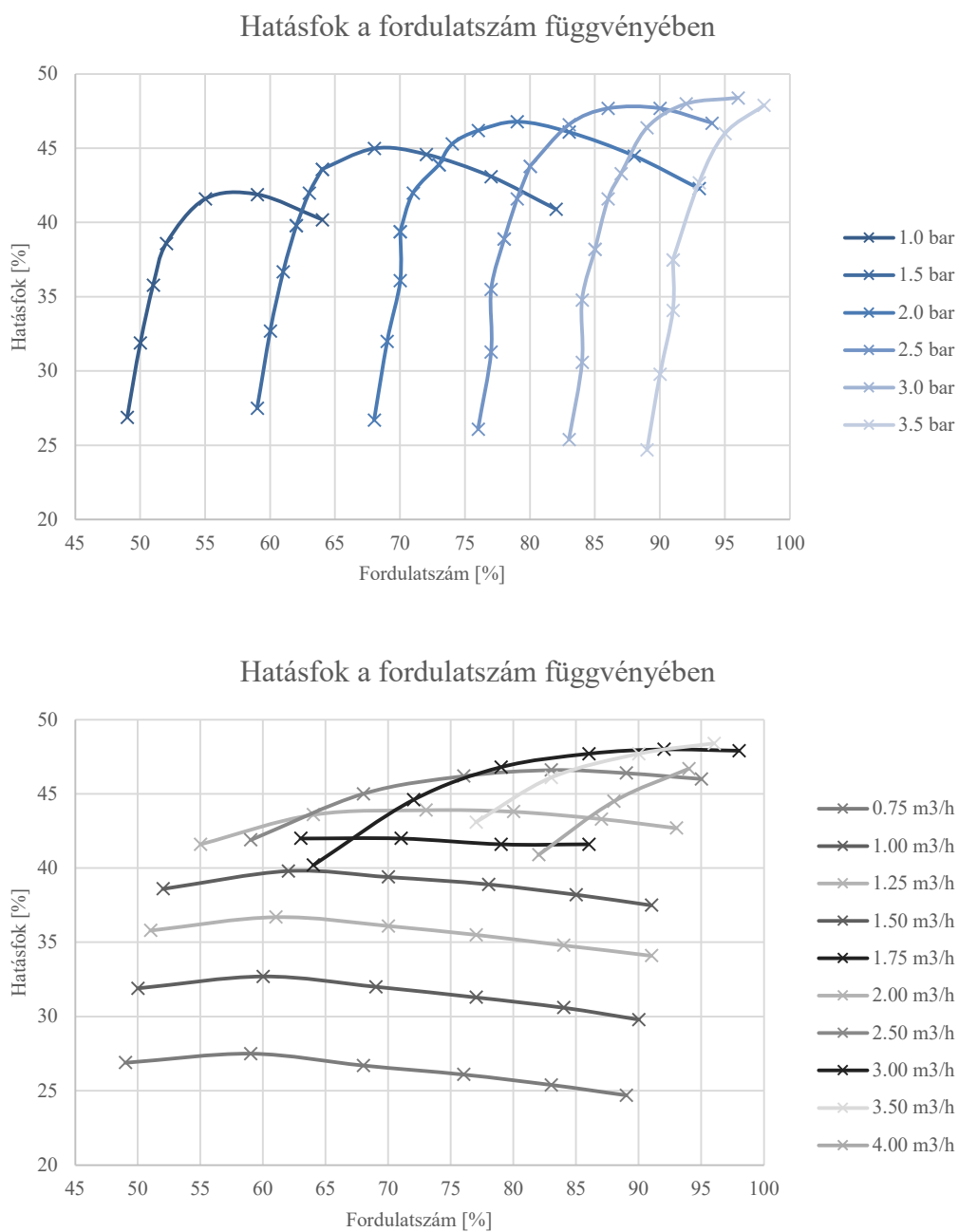
(forrás: <https://product-selection.grundfos.com/hu/>)

A második szivattyú indításával változik a fordulatszám. A korábbi 93% helyett, egyidejű üzem esetén, elegendő 73%-os fordulatszámon üzemeltetni a szivattyúkat. Ezzel egyidejűleg változik a hatásfok görbéje is. Két szivattyús üzem esetén a 42.3%-ról, 45.3%-ra nő az összes villamos teljesítménynyelvételnek a hatásossága és ezáltal csökken az összes felvett energia. A Grundfos honlapján megadott hatásfokokat megvizsgálva belátható, hogy ezen érték optimalizálásával lehet elérni a költséghatékony üzemeltetést.

Q $\left[\frac{m^3}{h}\right]$	H [bar]	$P_{1,jg}$ [W]	$n_{1,jg}$ [%]	$\eta_{1,jg}$ [%]	$P_{2,jg}$ [W]	$n_{2,jg}$ [%]	$\eta_{2,jg}$ [%]
1.5	1.0	106.0	52	38.6	77.54	49	26.9
1.5	1.5	157.2	62	39.8	113.8	59	27.5
1.5	2.0	211.5	70	39.4	155.9	68	26.7
1.5	2.5	267.6	78	38.9	199.8	76	26.1
1.5	3.0	326.9	85	38.2	246.4	83	25.4
1.5	3.5	388.8	91	37.5	295.7	89	24.7
2.0	1.0	133.6	55	41.6	87.00	50	31.9
2.0	1.5	191.2	64	43.6	127.6	60	32.7
2.0	2.0	253.1	73	43.9	173.7	69	32.0
2.0	2.5	317.4	80	43.8	221.6	77	31.3
2.0	3.0	385.1	87	43.3	272.5	84	30.6
2.0	3.5	455.9	93	42.7	325.8	90	29.8
2.5	1.0	165.7	59	41.9	97.09	51	35.8
2.5	1.5	231.5	68	45.0	142.0	61	36.7
2.5	2.0	300.6	76	46.2	192.2	70	36.1
2.5	2.5	372.9	83	46.6	244.2	77	35.5
2.5	3.0	449.0	89	46.4	299.3	84	34.8
2.5	3.5	528.5	95	46.0	356.8	91	34.1
3.0	1.0	207.4	64	40.2	106.0	52	38.6
3.0	1.5	280.0	72	44.6	157.2	62	39.8
3.0	2.0	356.1	79	46.8	211.5	70	39.4
3.0	2.5	436.7	86	47.7	267.6	78	38.9
3.0	3.0	520.5	92	48.0	326.9	85	38.2
3.0	3.5	608.7	98	47.9	388.8	91	37.5
3.5	1.5	338.2	77	43.1	173.5	63	42.0
3.5	2.0	421.9	83	46.1	231.7	71	42.0
3.5	2.5	509.8	90	47.7	292.0	79	41.6
3.5	3.0	602.1	96	48.4	355.5	86	41.6
4.0	1.5	407.7	82	40.9	191.2	64	43.6
4.0	2.0	499.3	88	44.5	253.1	73	43.9
4.0	2.5	595.3	94	46.7	317.4	80	43.8
4.5	2.0	590.7	93	42.3	276.0	74	45.3

$\eta_{1,jg} [\%]$	Összhatásfok, egy szivattyúval, jelleggörbéről
$\eta_{2,jg} [\%]$	Összhatásfok, két szivattyúval, jelleggörbéről

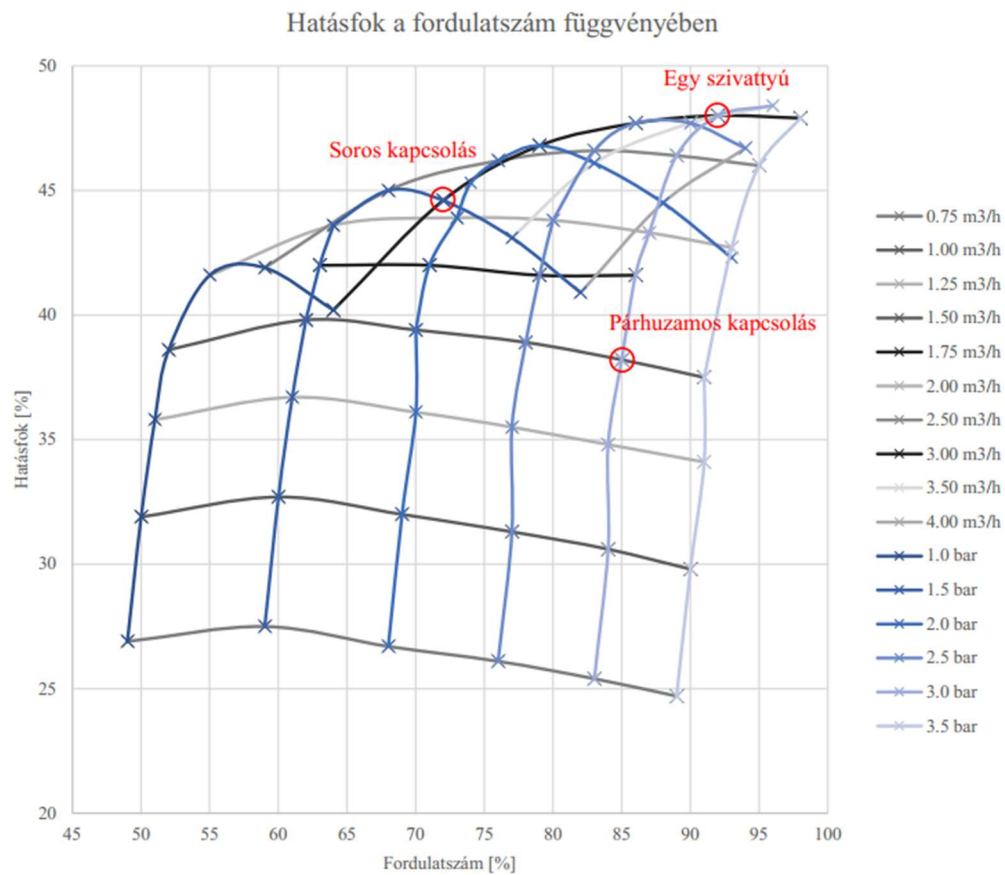
A kaszkád szivattyús rendszerek beállításának optimalizálásának érdekében a feladatunk egy egyszerű, könnyen használható kapcsolat felállítása a hatásfok és a fordulatszám között. Ezáltal a beüzemelő a helyszínen egy gyors számítással közel a legmegfelelőbbben fel tudja majd programozni a szivattyúk vezérlését.



16. ábra: Hatásfok a fordulatszám függvényében, állandó nyomás és állandó térfogatáram mellett

Ezen diagramokról jól leolvasható, hogy adott nyomás vagy éppen adott térfogatáram mellett melyik munkapontban található a legmagasabb hatásfok. Amennyiben a rendszerben található fogyasztói igényeket ismerjük, már egyszerűen meg tudjuk határozni a szivattyúnk optimális fordulatszámát. A 1.2. pontban leírtak alapján, bármilyen több szivattyús rendszerhez meghatározható így az optimális fordulatszám.

Ha megvizsgáljuk a 4. pont elején bemutatott példát ezen diagramon, jól látható, hogy egy darab szivattyú üzemelése jár a legnagyobb hatásfokkal és ezáltal a legkisebb fogyasztással. Soros kapcsolás esetén az egy szivattyúra jutó nyomásigény megfeleződik, párhuzamos kapcsolás esetén pedig a szállított tömegáram csökken a felére. Mindkét esetben jelentősen romlik a hatásfok, ezért amennyiben a rendszerünknek leggyakrabban erre a munkapontra van szüksége a második szivattyú beléptetését ezen 92%-os fordulatszám fölé kell emeljük.



17. ábra: Hatásfok a fordulatszám függvényében, $3 \text{ m}^3/\text{h}$ és 3 bar igény mellett

2.5. Az optimális vezérlés méréseinek hibaelemzése

Ahogy az a mérési eredményekből látszik, a gyártó által megadott jelleggörbe valóban nagyon közel áll a méréseknél kapott eredményekhez. Ezek eltérését és a mérés közben jelentkező zavarok által gerjesztett mérési pontatlanságot vizsgáljuk meg részletesebben!

A következő táblázatban egymás mellett látható a gyártó által megadott, jelleggörbén szereplő és a mért értékek, a villamos fogyasztás és fordulatszám, az egy és két szivattyús üzem esetén a megadott munkapontokban. Az egyszerűbb összehasonlítást segíti a háttérszínekkel történő jelölés.

Q [$\frac{m^3}{h}$]	H [bar]	$P_{1,jg}$ [W]	$n_{1,jg}$ [%]	$P_{2,jg}$ [W]	$n_{2,jg}$ [%]	$P_{1,m}$ [W]	$n_{1,m}$ [%]	$P_{2,m}$ [W]	$n_{2,m}$ [%]
1.5	1.0	106.0	52	77.54	49	118	52	88	49
1.5	1.5	157.2	62	113.8	59	160	62	119	60
1.5	2.0	211.5	70	155.9	68	234	70	170	69
1.5	2.5	267.6	78	199.8	76	287	78	218	76
1.5	3.0	326.9	85	246.4	83	339	85	280	84
1.5	3.5	388.8	91	295.7	89	416	91	325	90
2.0	1.0	133.6	55	87.00	50	141	55	90	51
2.0	1.5	191.2	64	127.6	60	211	64	135	60
2.0	2.0	253.1	73	173.7	69	268	73	184	69
2.0	2.5	317.4	80	221.6	77	356	80	252	77
2.0	3.0	385.1	87	272.5	84	399	87	295	84
2.0	3.5	455.9	93	325.8	90	497	93	346	90
2.5	1.0	165.7	59	97.09	51	172	60	107	52
2.5	1.5	231.5	68	142.0	61	266	69	155	62
2.5	2.0	300.6	76	192.2	70	320	76	220	71
2.5	2.5	372.9	83	244.2	77	399	83	273	78
2.5	3.0	449.0	89	299.3	84	492	90	332	84
2.5	3.5	528.5	95	356.8	91	556	95	383	91
3.0	1.0	207.4	64	106.0	52	219	64	119	53
3.0	1.5	280.0	72	157.2	62	308	73	161	63
3.0	2.0	356.1	79	211.5	70	369	80	237	70
3.0	2.5	436.7	86	267.6	78	484	87	290	79
3.0	3.0	520.5	92	326.9	85	543	92	351	86
3.0	3.5	608.7	98	388.8	91	646	98	411	92
3.5	1.5	338.2	77	173.5	63	374	77	182	64
3.5	2.0	421.9	83	231.7	71	450	83	266	71
3.5	2.5	509.8	90	292.0	79	557	91	323	80
3.5	3.0	602.1	96	355.5	86	614	96	403	86
4.0	1.5	407.7	82	191.2	64	439	83	216	65
4.0	2.0	499.3	88	253.1	73	530	88	271	74
4.0	2.5	595.3	94	317.4	80	614	95	347	81
4.5	2.0	590.7	93	276.0	74	608	94	298	74

A mérési pontatlanságok okai sokrétűek lehetnek, és különböző tényezők állhatnak a háttérben. Ezek közé tartozhatnak például a mérőeszközök technikai jellemzői és kalibrációs állapota, a mérés körülményei és környezeti tényezők, valamint az emberi tényezők, mint például a mérési eljárások végrehajtása során bekövetkező hibák. A mérési pontatlanságokat továbbá befolyásolhatják a mérési objektum saját tulajdonságai és változékonysága, valamint a mérési módszerekben és technikákban rejlő korlátok és hibalehetőségek. Fontos megérteni és azonosítani ezeket az okokat annak érdekében, hogy hatékonyan kezelni lehessen őket, és javítani lehessen a mérési pontosságot és megbízhatóságot.

A táblázatban feltüntetett mért értékeket öt különböző mérési eredmény átlaga adja. Ezeket összehasonlítva a jelleggörbéről származó adatokkal elmondható, hogy a fordulatszámok közötti eltérések elhanyagolhatóak és a teljesítménymérési értékek között jelentkező különbségek is a mérési tűréshatáron belüli értékeket vesznek fel.

$P_{1,jg}$	$P_{1,m}$		$n_{1,jg}$	$n_{1,m}$		$P_{2,jg}$	$P_{2,m}$		$n_{2,jg}$	$n_{2,m}$	
[W]	[W]		[%]	[%]		[W]	[W]		[%]	[%]	
106	118	11%	52	52	0%	77.54	88	13%	49	49	0%
157.2	160	2%	62	62	0%	113.8	119	5%	59	60	2%
211.5	234	11%	70	70	0%	155.9	170	9%	68	69	1%
267.6	287	7%	78	78	0%	199.8	218	9%	76	76	0%
326.9	339	4%	85	85	0%	246.4	280	14%	83	84	1%
388.8	416	7%	91	91	0%	295.7	325	10%	89	90	1%
133.6	141	6%	55	55	0%	87	90	3%	50	51	2%
191.2	211	10%	64	64	0%	127.6	135	6%	60	60	0%
253.1	268	6%	73	73	0%	173.7	184	6%	69	69	0%
317.4	356	12%	80	80	0%	221.6	252	14%	77	77	0%
385.1	399	4%	87	87	0%	272.5	295	8%	84	84	0%
455.9	497	9%	93	93	0%	325.8	346	6%	90	90	0%
165.7	172	4%	59	60	2%	97.09	107	10%	51	52	2%
231.5	266	15%	68	69	1%	142	155	9%	61	62	2%
300.6	320	6%	76	76	0%	192.2	220	14%	70	71	1%
372.9	399	7%	83	83	0%	244.2	273	12%	77	78	1%
449	492	10%	89	90	1%	299.3	332	11%	84	84	0%
528.5	556	5%	95	95	0%	356.8	383	7%	91	91	0%
207.4	219	6%	64	64	0%	106	119	12%	52	53	2%
280	308	10%	72	73	1%	157.2	161	2%	62	63	2%
356.1	369	4%	79	80	1%	211.5	237	12%	70	70	0%
436.7	484	11%	86	87	1%	267.6	290	8%	78	79	1%
520.5	543	4%	92	92	0%	326.9	351	7%	85	86	1%
608.7	646	6%	98	98	0%	388.8	411	6%	91	92	1%
338.2	374	11%	77	77	0%	173.5	182	5%	63	64	2%
421.9	450	7%	83	83	0%	231.7	266	15%	71	71	0%
509.8	557	9%	90	91	1%	292	323	11%	79	80	1%
602.1	614	2%	96	96	0%	355.5	403	13%	86	86	0%
407.7	439	8%	82	83	1%	191.2	216	13%	64	65	2%
499.3	530	6%	88	88	0%	253.1	271	7%	73	74	1%
595.3	614	3%	94	95	1%	317.4	347	9%	80	81	1%
590.7	608	3%	93	94	1%	276	298	8%	74	74	0%
		7%			0%			9%			1%

Összefoglalás, következtetések, javaslatok

Elmondható, hogy a mérési pontatlanság relatíve kicsi, ezáltal a gyártó által megadott jelleggörbék tökéletesen alkalmasak a kaszkád vezérlés optimális beállítására. A meghatározott diagramok alapján az optimális fordulatszám minden munkapont esetében ismert. Célunk ezen optimális fordulatszámhoz a lehető legközelebb üzemeltetni szivattyúinkat a legmagasabb hatásfok elérése céljából. Természetesen ez sajnos a gyakorlatban nem ennyire egyszerű. Az fogyasztói igények a gyakorlatban, a technológia üzemeltetéséből adódóan gyakran ingadoznak. Nyomástartó berendezéseknél a szívó oldali állapotok szintén sokszor instabilak. Azonban ezen dolgozatban tárgyaltak alapján elméletben biztosítani tudjuk az optimális üzemeltetést, a zavarokat pedig a be- és kiléptetés közötti tartomány túrésával, illetve megfelelően beállított szabályozással csökkenthetjük.

A költséghatékony üzemeltetés szempontjából elengedhetetlen további vizsgálatokat végezni ebben a témában. Amely a későbbiek akár már a tervezési folyamatot is pozitív módon befolyásolhatja. Jelen témakörnek bár nem szerves része, de fontos megemlíteni a szivattyúk kopásának és élettartalmának vizsgálatát a megfelelő üzemeltetés céljából.

Célunk legyen a fenntartható fejlődés és a többlet fogyasztás kiküszöbölése!

Ábrajegyzék

1. ábra: Szivattyú jelleggörbe	7
2. ábra: Szivattyú jelleggörbe	8
3. ábra: Szivattyúk sorba kapcsolása	9
4. ábra: Szivattyúk párhuzamos kapcsolása	10
5. ábra: Grundfos mérőkör	11
6. ábra: Voltcraft SEM5000 energiafogyasztásmérő	13
7. ábra: Grundfos szivattyú kiválasztó segédprogram	15
8. ábra: Szivattyú típus találatok	16
9. ábra: A szivattyú jelleggörbe menüpontja	17
10. ábra: A szivattyú munkapont és hidraulika beállítások megadása	18
11. ábra: Két párhuzamosan kapcsolt CRE 3-5 típusú szivattyú optimális munkapontja .. Hiba! A könyvjelző nem létezik.	
12. ábra: CRE 3-5 A-A-A-E-HQQE (Poz. 98389686) típusú szivattyú jelleggörbéje	19
13. ábra: Egy darab CRE 3-5 típusú szivattyú munkapontja egyedüli üzem esetén	21
14. ábra: Egy darab CRE 3-5 típusú szivattyú munkapontja a két szivattyú egyidejű üzeme esetén	22
15. ábra: Egy darab CRE 3-5 típusú szivattyú mérendő munkapontjai	24
16. ábra: Egy és két darab szivattyú hatásfoka 4.5 m ³ /h térfogatáram és 2.0 bar nyomás mellett	27
17. ábra: Hatásfok a fordulatszám függvényében, állandó nyomás és állandó térfogatáram mellett	31
18. ábra: Hatásfok a fordulatszám függvényében, 3 m ³ /h és 3 bar igény mellett	33

Irodalomjegyzék

1. **Abdelaziz, E. A., Rahman Saidur, and Saad Mekhilef.** *A review on energy saving strategies in industrial sector.*: Renewable and sustainable energy reviews, 2011.
2. **Ahonen, Tero, et al.** *Estimation of pump operational state with model-based methods.*: Energy Conversion and Management, 2010.
3. **Ahonen, Tero, Jussi Tamminen, and Juho Montonen.** *Comparison of electric motor types for realising an energy efficient pumping system.*: European Conference on Power Electronics and Applications, 2014.
4. **Ahonen, Tero, et al.** *Frequency-converter-based hybrid estimation method for the centrifugal pump operational state.*: IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011.
5. **Shankar, VK Arun, S. Umashankar, and S. Paramasivam.** *Performance Evaluation of fuzzy DTC based PMSM for Pumping Applications.*: Indian Journal of science and technology, 2016.
6. **Shankar, Vishnu Kalaiselvan Arun, et al.** *A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system.*: Applied Energy, 2016.
7. **Barbarelli, S., Mario Amelio, and Gaetano Florio.** *Predictive model estimating the performances of centrifugal pumps used as turbines.*: Energy, 2016.
8. **Yang, Zhenyu, and Hakon Børsting.** *Energy efficient control of a boosting system with multiple variable-speed pumps in parallel.*: IEEE Conference on Decision and Control, 2010.
9. **Falkner, H., and D. Reeves.** *Study on improving the energy efficiency of pumps.*: ETSU, AEAT PLC, SAVE Study, 2001.
10. **Tutterow, Vestal, and Aimee T. McKane.** *Variable speed pumping: A guide to successful applications*, 2004.
11. **Viholainen, Juha, et al.** *Energy-efficient control strategy for variable speed-driven parallel pumping systems.*: Energy Efficiency, 2013.
12. **Du Plessis, Gideon Edgar, Leon Liebenberg, and Edward Henry Mathews.** *Case study: The effects of a variable flow energy saving strategy on a deep-mine cooling system.*: Applied energy, 2013.
13. **Horváth Gábor, Eördöghné Miklós Mária.** *Nyomásfokozó szivattyúk hatásfoka részterhelésen.*: Magyar Épületgépészet, 2019.

Mellékletek
