

Kuti Rajmund,¹  Hajdú Flóra² 

Kismotorfecskendőről üzemeltetett tűzoltórendszer vizsgálata modellezéssel és számítógépes szimulációval

Examination of a Firefighting System Operated from a Small Pump with Modeling and Computer Simulation

Az oltóvizet használó tűzoltórendszerek biztonságos és hatékony működtetéséhez elengedhetetlen az üzemeltetési feltételeik vizsgálata, különösen a mobil tűzoltószivattyúk alkalmazása során, amelyeket néha szélsőséges feltételek mellett használnak a tűzoltóegységek. Az üzemeltetési paraméterek megváltozása komoly hatással lehet a rendszerből kinyerhető víz mennyiségére, ezáltal magára a tűzoltási folyamatra is, ezért a téma vizsgálata fontos, aktuális kérdés. Írásunkban először az általunk vizsgált tűzoltórendszerre készített modellt mutatjuk be, majd a modell felhasználásával végzett számítógépes szimuláció eredményeit ismertetjük. Célunk a mobil szivattyúról üzemeltetett tűzoltórendszerek optimális működésének elősegítése. Eredményeinkkel a tűzoltók munkáját könnyíteni, a tűzoltás hatékonyságát növelni kívánjuk.

Kulcsszavak: kismotorfecskendő, tűzoltórendszer, modell, számítógépes szimuláció, tűzoltási hatékonyság

For the safe and efficient operation of firefighting systems using water, it is essential to examine their operating conditions, especially in the case of portable fire pumps, which are sometimes used under extreme conditions. Changes in operating parameters can have a serious impact on the amount of water that can be extracted from the system, and thus on the firefighting process itself, so the examined topic is an important, current issue. In this paper, the model created for the firefighting system is presented first, and then the results of the computer simulation using

¹ Széchenyi István Egyetem, e-mail: kuti.rajmund@sze.hu

² Széchenyi István Egyetem, e-mail: hajdf@l@sze.hu

the model is described. Our goal is to contribute the optimal operation of firefighting systems operated from mobile pumps. With the presented results, we want to ease the work of firefighters and increase the efficiency of firefighting.

Keywords: firefighting pump, firefighting system, model, simulation, fire extinguishing efficiency

Bevezetés

A tűzoltási tevékenység során napjainkban legtöbb esetben vizet használnak oltóanyagként. A víz kijuttatása a tűzre mobil eszközökkel nem egyszerű feladat, s több tényező is befolyásolja a hatékonyságát. A folyadékok szállítását csőrendszerekben a különféle szivattyúk alkalmazása teszi lehetővé.³ A szivattyúkon belül külön csoportba kell helyoznunk a tűzoltószivattyúkat, amelyek üzemeltetési feltételeinek folyamatos vizsgálata a hatékony tűzoltás és a folyamatos vízellátás érdekében nagyon fontos. A gyakorlati, terepi használat néha szélsőséges körülmények, feltételek mellett történik, ami a szivattyú teljesítményét, így az általa működtetett tűzoltórendszerből kinyerhető víz mennyiségét is nagyban befolyásolja. A Magyar Honvédség tűzoltóegységei is használnak mobil szivattyúkat és tűzoltóeszközöket, számukra egy esetleges beavatkozás eredménye kiemelt jelentőségű, ugyanis a környezetbiztonsági kihívásoknak is meg kell felelni.⁴ A kismotorfecskendőről üzemeltetett tűzoltórendszer pontos vizsgálata, továbbá a gyakorlati alkalmazás elősegítése érdekében első lépésként egy mobil szivattyúról működtetett tűzoltórendszer modelljét készítettük el, amelynek felhasználásával számítógépes szimulációt végeztünk. A számítógépes szimulációkat széles körben használják a különféle műszaki területeken, segítségükkel bármilyen változtatás, továbbá annak hatásai gyorsan követhetők. Mivel a kismotorfecskendőket elsősorban vízzel történő tűzoltásra használják, ezért a kutatásunkban vizsgált tűzoltórendszerrel is ezt az oltóanyagot alkalmaztuk. További tűzoltóanyagok felhasználásának vizsgálata egy következő kutatás tárgya lesz. Tapasztalataink bemutatásával a tűzoltószivattyúk és az általuk üzemeltetett vízellátórendszerek biztonságos működtetéséhez kívánunk hozzájárulni.

A vizsgált tűzoltórendszer bemutatása

A vizet használó tűzoltórendszerek legfontosabb elemei a vízszivattyúk, amelyek teljesítményparamétereit a gyártók legtöbbször 1,5–3 méteres szívómélység mellett közvetlenül a szivattyú nyomócsonkjára helyezett mérőeszközzel mérik különféle fordulatszámhatárok között. Tűzoltási feladatok során a kiépített tűzoltómedencék esetében is 3 méter vagy annál kisebb szívómélység biztosítása az elvárt, ezért az általunk összeállított rendszerben is ezt az adatot vesszük kiindulási alapnak. A tűzoltó sugarak működtetése során a nyomómagasság változása a rendszerből kivehető vízmennyiség tekintetében lényeges teljesítmény

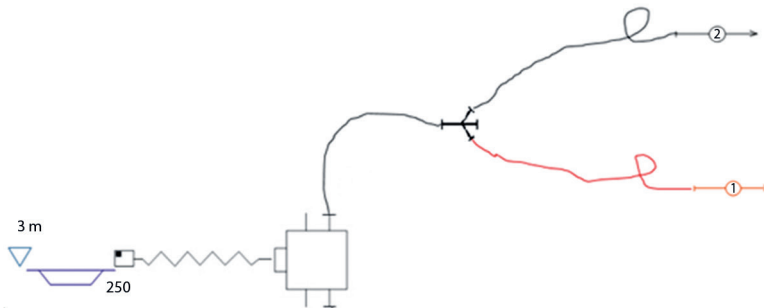
³ LAJOS 2004.

⁴ FÖLDI–PADÁNYI 2021.

eltérést mutathat, a szállított oltóvíz mennyisége adott időintervallumon belül akár az elvárt mennyiség negyedére is csökkenhet. Az optimális üzemeltetési feltételek megteremtése a tűzoltási feladatok során fontos, a helyszíni körülmények, a rendelkezésre álló felszerelések azonban nem mindig teszik lehetővé ezeket, így a tényleges nyomás- és vízmennyiségértékek elmaradnak az elvártaktól. Az elérhető szakirodalmi forrásokat áttanulmányozva rész megoldásokat találtunk, vizsgáltuk szivattyúfajtákat,⁵ azok működési paramétereit,⁶ valamint különféle folyadékotvábbításra használt csőrendszereket,⁷ de nem kaptunk egyértelmű választ az általunk felvetett problémára. Minden lehetséges veszteséget figyelembe véve összetett számítások elvégzésére lenne szükség, erre azonban egy káreset során nincs idő.⁸ Megoldásként egyszerűsített számítási modell összeállítása mellett döntöttünk, amely adott tűzoltási feladat végrehajtásához szükséges elemeket rendszerként jeleníti meg. A számítások elvégzésének megkönnyítésére egy egyszerűsített tűzoltórendszert állítottunk össze és használtunk. Az alapmodell elemei természetesen szükség szerint bővíthetők. Az általunk készített tűzoltórendszer elemei a következők:

- Rosenbauer Fox III. centrifugálszivattyú;
- szabványos szívó- és nyomótlölk;
- osztó;
- szabványos sugárcső.

A fenti elemekből összeállított és vizsgált tűzoltórendszer Rosenbauer Fox III. centrifugál szivattyúból, osztóból és két „C” sugárból áll, az 1. ábra szerinti összeállításban.



1. ábra: A vizsgált tűzoltórendszer

Forrás: a szerzők szerkesztése

Szivattyúként egy, a tűzoltóságnál is rendszeresített, az önkéntes tűzoltók körében is gyakran használt Rosenbauer Fox III. kismotorfecskendőt vizsgálunk, amelynek táplálása föld alatti víztározóból, felszívósos üzemmódban történik. Az összeállított tűzoltórendszerrel szemben további elvárásként határoztuk meg, hogy a szivattyú a DIN EN 15182-3 típusú rendszeresített

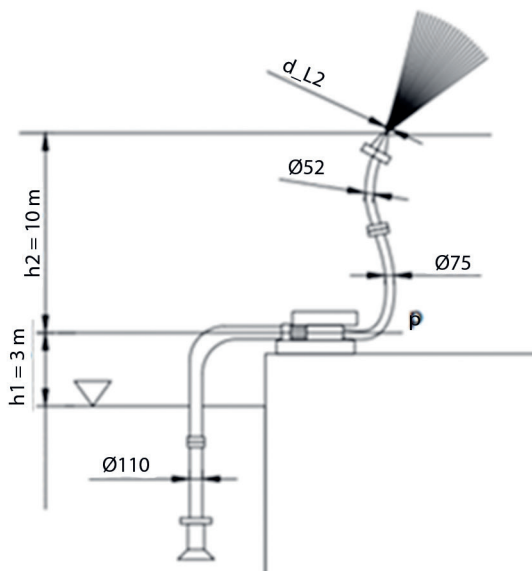
⁵ SPURGEON 2012.

⁶ FECSER et al. 2020.

⁷ HAJDÚ–HORVÁTH–KUTI 2017.

⁸ PÁZMÁNDY 1979.

sugárcsövek működéséhez szükséges vízmennyiséget és az oltási hatékonyság eléréséhez, valamint a megfelelő sugárkép kialakításához szükséges 5 bar víznyomást 10 méter oltási magasságban biztosítani tudja. A 2. ábrán az általunk összeállított tűzoltórendszer vertikális elrendezése látható.



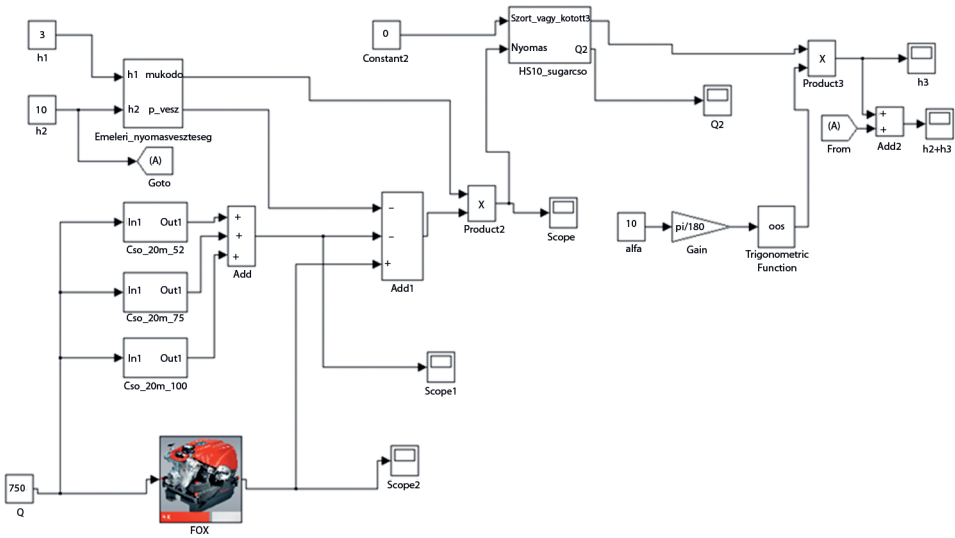
2. ábra: A vizsgált tűzoltórendszer vertikális elrendezése

Forrás: a szerzők szerkesztése

Ahhoz, hogy az elvárt követelményeknek megfeleljen, az oltórendszer mindegyik sugarával $Q=0,00343 \text{ m}^3/\text{s}$, azaz 206 l/p térfogatáramú vízsugarat kell biztosítani a $h=10 \text{ m}$ magasságban működtetett sugárcsöveknél, amelyek lövőkéjének kiömlési átmérője $d_{L2}=12 \text{ mm}$. A vízellátást biztosító tömlővezetékek hossza $L=40 \text{ m}$.

Az alkalmazott modell bemutatása

A vizsgálathoz Simulink számítógépes programot használtunk, amely moduláris felépítési és alrendszerekből áll. Először a tűzoltórendszer modelljét állítottuk össze, amelyet a 3. ábra mutat.



3. ábra: A vizsgált tűzoltórendszer modellje
 Forrás: a szerzők szerkesztése

A teljes vizsgálathoz és a számítógépes szimulációhoz szükséges a rendszer elemeit, alrendszerenként modellezni. Az alrendszerek a következő elemekből állnak: szivattyú, tömlők, sugárcső, osztó és emelési magasság. Az alrendszereket maszkoltuk a paraméterek egyszerű megváltoztatása érdekében. A bemeneti változó a folyadékáram, a kimeneti változó pedig a szivattyú nyomása (nyomóoldal), továbbá a rendszer teljes nyomásvesztése.

Először a szivattyú modelljét állítottuk össze, amelyet a 4. ábra mutat be.



4. ábra: A szivattyúalrendszer modellje
 Forrás: a szerzők szerkesztése

Az egyenleteket⁹ Hajdu, Horváth és Kuti 2017-es hivatkozott cikke alapján állítottuk össze, a szivattyúalrendszert leíró egyenlet a:

$$p [bar] = n^2 \sqrt{1 - \left(i \frac{Q \left[\frac{l}{min} \right]}{2000} \cdot \frac{1}{n} \right)^2} \quad (1)$$

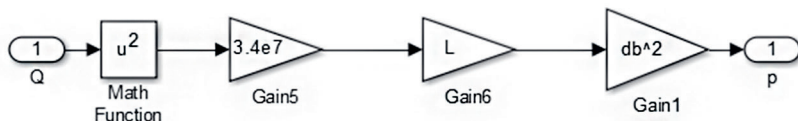
⁹ HAJDU–HORVÁTH–KUTI 2017.

ahol Q a folyadékáram, p a szivattyú nyomása, n a fordulatszám aránya a maximális fordulatszámhoz képest ($n_{\max}=4500 \text{ RPM}$) és i a vízsugarak száma. Az alrendszerben a sebességarány (n) és a vízsugarak száma (i) a változó paraméterek.

A tömlőrendszer modellezéséhez a tömlők nyomásvesztését kell figyelembe venni, ami a következő egyenlettel határozható meg:

$$p_{\text{tömlő}} = c_d \cdot L \cdot (k \cdot Q)^2 \quad (2)$$

ahol c_d a tömlő átmérőjétől függő arányossági állandó, L a tömlő hossza és k a tömlők száma. A tömlőrendszer modellje az 5. ábrán látható.



5. ábra: A tömlőrendszer modellje

Forrás: a szerzők szerkesztése

A tömlő hossza (L) és a tömlők száma (i) a változó paraméterek. A tömlők átmérője 52 mm (C típusú) és 75 mm (B típusú), amelyek szabványos átmérők. Az arányossági tényezőt csak a szabványosított tömlők esetében ismerjük, ezért a tömlők átmérője ebben a vizsgálatban állandó volt.

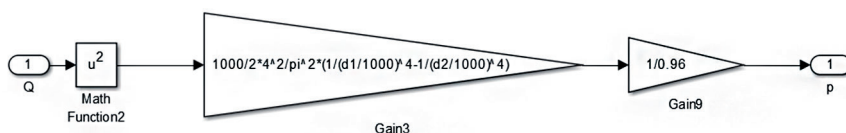
A következő a sugárcsőmodell. A sugárcsőnél a nyomásesés a következő egyenlettel számítható ki:

$$p_s = \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right) \quad (3)$$

ahol $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ a víz sűrűsége, A_1 a sugárcső bemeneténél és A_2 a sugárcső kimeneténél lévő keresztmetszet. A keresztmetszet a következő egyenlettel számítható ki:

$$A = \frac{d^2}{4\pi} \quad (4)$$

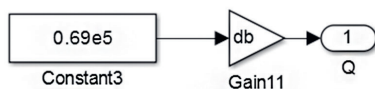
A (3)–(4) egyenleteket alkalmazva létrehozható a sugárcső alrendszere, amely a 6. ábrán látható. A szabványban 96%-os hatásfok van megadva, ezt is figyelembe vettük a modell készítése során.



6. ábra: A sugárcsőrendszer modellje

Forrás: a szerzők szerkesztése

Az alrendszer változó paraméterei a bemeneti és kimeneti átmérők. Esetünkben a DIN EN 15182-3 típusú rendszeresített sugárcsövek technikai adatait vettük figyelembe. Az osztó alrendszere a 7. ábrán látható.

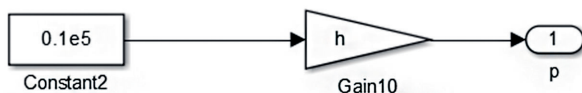


7. ábra: Az osztóalrendszer modellje

Forrás: a szerzők szerkesztése

Az elemzett szakirodalmi forrás¹⁰ szerint a nyomásesés osztó esetén 0,69 bar. Csak egyetlen változó paramétere van, ez az osztók száma.

Az emelési magasság alrendszere a 8. ábrán látható. Elméletileg 10 méteres magasság 1 bar (10 mvo) nyomásesést okoz.¹¹ Modellünkben a magasság a változó paraméter.



8. ábra: Az emelésimagasság-alrendszer modellje

Forrás: a szerzők szerkesztése

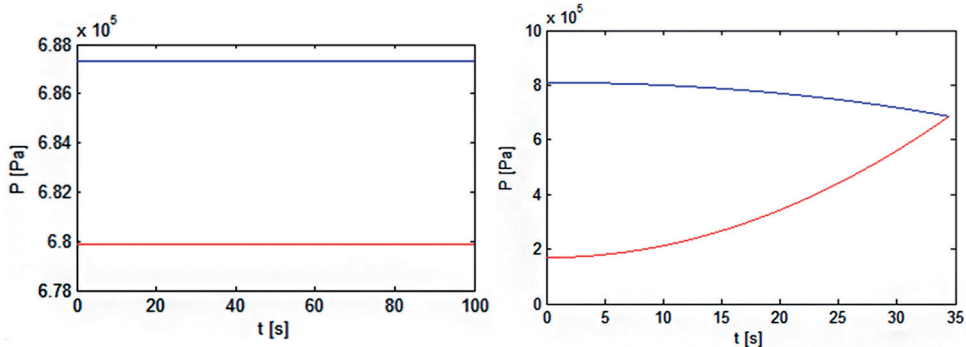
Szimulációs eredmények

A szimuláció futtatásához először a szivattyú nyomását és a rendszer nyomásvesztését számítottuk ki a kezdeti konfiguráció esetén ($Q=3,43 \cdot 10^{-3} [m^3/s]$, $i=4$, $n=0,78$). A nyomás a 9. ábra bal oldalán látható. Megfigyelhető, hogy a szivattyú nyomása 687,34 kPa, a nyomásvesztés pedig 679,89 kPa. Az eredmények megegyeznek az elemzett szakirodalmi forrásban¹² leírtakkal. A számításokat a számítógép végezte szimulációs adatok alapján, ezért lehetséges a mennyiségek ennyire pontos meghatározása. A nyomásvesztésben csak kis különbségek vannak az ott bemutatott eredményekhez képest, mert a könnyebb tesztelés és bővíthetőség érdekében egy kissé eltérő sugárcsőmodellt alkalmaztunk. Ezután a modellt növekvő folyadékárammal teszteltük. A szimulációt leállítottuk, amikor a nyomásvesztés nagyobb volt, mint a szivattyú nyomása, ahogy a 9. ábra jobb oldalán látható.

¹⁰ SZABÓ 1983.

¹¹ SZABÓ 1983.

¹² HAJDU–HORVÁTH–KUTI 2017.



9. ábra: Nyomás alakulása az eredeti konfigurációban (balra) és növekvő térfogatáram (jobbra)

Megjegyzés: kék: a szivattyú nyomása, piros: nyomásvesztés.

Forrás: a szerzők szerkesztése

Az érzékenységi vizsgálathoz a konfiguráció esetén kinyerhető maximális folyadékáramot választottuk ki. Ezután a folyadékáramot addig növeltük, amíg a szimuláció le nem állt, és az utolsó értéket egy listában tároltuk. Ezután diagramban ábráztuk a maximális folyadékáramot a változó paraméter függvényében. A diagramokból az érzékenységet érzékenységi indexszel lehet jellemezni, amely a következőképpen számítható:

$$SI = \frac{\Delta Q_{max} [\%]}{\Delta a [1\%]} \tag{5}$$

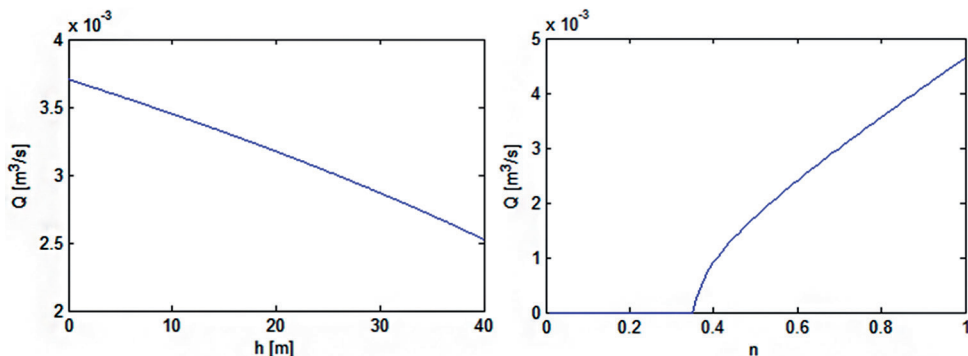
ahol Δa a kiválasztott paraméter 1%-os változása. Az érzékenységi mérésére a következő érzékenységi halmazokat állítottuk össze:¹³

- nem érzékeny: $SI \leq 1$
- közepesen érzékeny: $1 < SI \leq 5$
- érzékeny: $5 < SI \leq 10$
- rendkívül érzékeny: $10 < SI$

A paraméter akkor tekinthető érzékenynek, ha van egy paramétertartomány a rendkívül érzékeny vagy az érzékeny halmazban.

A sebesséviszony és az emelési magasság érzékenysége a 10. ábrán látható.

¹³ HAJDU 2019.

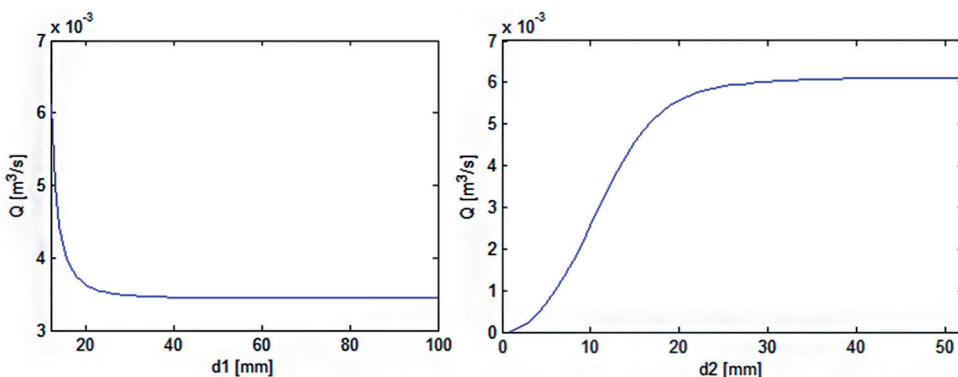


10. ábra: Az emelési magasság (bal) és a sebességviszony (jobb) érzékenysége

Forrás: a szerzők szerkesztése

Az eredményeket elemezve elmondható, hogy a sebességarány nem érzékeny, ha $n < 0,36$. Eddig a sebességarányig nincs folyadékáramlás a rendszerben. Ha $0,36 < n < 0,4$, a paraméter rendkívül érzékeny, $SI=19,5$. Amikor $0,4 < n < Q_{\max}$ lineárisan növekszik. Ebben a tartományban $SI=4,68$, ezért a paraméter közepesen érzékeny. Megállapítható, hogy az emelési magasság érzékenysége szinte lineárisan változik a teljes vizsgálati tartományban. $SI=0,3$, ezért ez a paraméter nem érzékeny.

A következő lépésben a sugárcső érzékenységét vizsgáltuk, a 11. ábrán a sugárcső bemeneti és kimeneti átmérőinek érzékenysége látható.



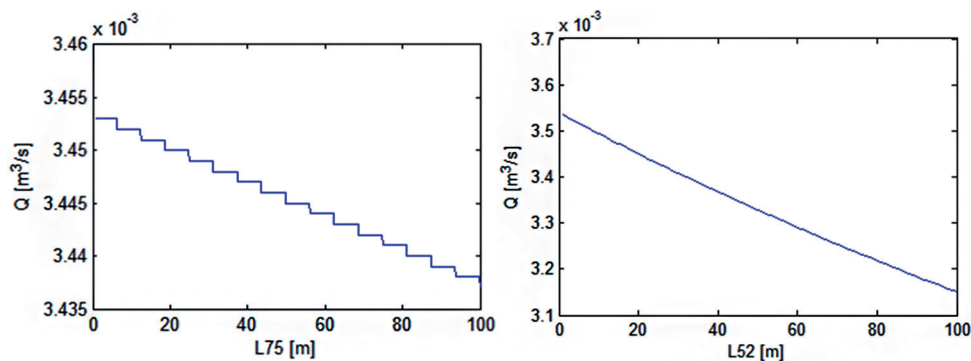
11. ábra: A sugárcső bemeneti átmérőjének (bal oldali) és kimeneti átmérőjének (jobb oldali) érzékenysége

Forrás: a szerzők szerkesztése

Az eredményeket elemezve elmondható, ha a bemeneti átmérő kicsi ($d_1 < 10$ mm), akkor közepesen érzékeny, $SI=2,667$. $10 < d_1 < 22$ mm esetén nem érzékeny, $SI=0,5$. A d_1 további növelésekor a maximális folyadékáram ugyanaz marad, ezért ez a paraméter nem érzékeny.

Ha a sugárcső kimeneti átmérője kicsi ($d2 < 4$), akkor közepesen érzékeny, $SI=3,2$. Ha $4 < d2 < 18$, akkor közepesen érzékeny ($SI=4,33$). Ha ezt a paramétert tovább növeljük, akkor nem lesz érzékeny ($SI=0,17$). Megfigyelhető, hogy a bemeneti átmérő érzékenyebb, mint a kimeneti átmérő.

A következő szimulációval a tömlők hosszának érzékenységét vizsgáltuk, az eredményeket a 12. ábra mutatja.



12. ábra: A tömlő hosszának érzékenysége

Megjegyzés: bal: B típus, jobb: C típus.

Forrás: a szerzők szerkesztése

Az eredményeket elemezve látható, hogy a maximális folyadékáram szinte lineárisan csökken a tömlők hosszának növelésével. Ezek a paraméterek nem érzékenyek, $SI_{\max}=0,067$ és $SI_{\max}=0,0026$. A bal oldali ábránál az eltérés abból adódik, hogy a program nagyobb megközelítést alkalmaz, ugyanis a térfogatáramban minimális eltérés mutatkozott.

Következtetések

A szimulációs eredmények elemzése során arra a következtetésre jutottunk, hogy a szivattyú fordulatszámviszonya a legérzékenyebb paraméter, csak a rendkívül érzékeny halmozban van azonosítható érzékenységi tartománya. Az összes többi paraméter közepesen érzékeny vagy nem érzékeny. Ezzel a vizsgálattal sikerült bizonyítani, hogy az általunk vizsgált tűzoltórendszer jól megtervezett, a legérzékenyebb pontja maga a szivattyú, ami a rendszer legkritikusabb eleme. A szivattyú telepítésének helye, a vízforrás elérése, az optimális szívómélység biztosítása nagyban befolyásolja a szivattyú, ezáltal a rendszer működését. A szivattyú fordulatszám-arányán kívül a paraméterértékek a nem érzékeny tartományban vannak. Úgy gondoljuk, hogy fontos további kutatási feladat egy új szivattyúmodell kidolgozása, amely lehetővé teszi az érzékenységvizsgálat még részletesebb elvégzését. További kutatási terveink szerint a tömlő (csővezeték) átmérője is változtatható lesz (a gyakorlatban beépített tűzoltórendszerekben is többféle átmérőjű csővezetékkel találkozunk), hogy tesztelni lehessen a rendszer viselkedését a szabványos tömlőktől eltérő konfigurációkban is.

Összegzés

Kutatómunkánk során egy szabványos elemekből összeállított mobil, vízzel oltó tűzoltórendszer működési paramétereit vizsgáltuk modellezéssel és számítógépes szimulációval. Az előzetes számítások megkönnyítése és felgyorsítása érdekében a Simulink programban egy moduláris, könnyen bővíthető szimulációs modellt készítettünk, amelynek alkalmazásával numerikus szimulációkat futtattunk le. Az eredményeket elemezve megállapítható, hogy a különböző rendszer-konfigurációban üzemeltetett sugárcsövek esetében eltérések mutatkoznak a maximálisan kivehető vízmennyiségben, ezt a tűzoltási feladatok során figyelembe kell venni. Azt is megfigyeltük, hogy jelentős nyomásvesztés lép fel a rendszeren belül, ezért további vizsgálatok elvégzésére volt szükség. A szimulációs modellel elvégeztük az általunk definiált alrendszerek paraméterérzékenységi vizsgálatát. Az eredményeket elemezve arra a következtetésre jutottunk, hogy a szivattyú a rendszer legkritikusabb eleme, ezért a szivattyú működésének további vizsgálata szükséges a jövőben részletesebb szimulációs modellekkel, az eredményeket a pontosabb fejlesztések érdekében pedig terepi mérésekkel szükséges validálni.

Megállapításaink szerint a rendszer többi eleme közepesen érzékeny vagy nem érzékeny. További kutatási feladat a modell további bővítése és más konfigurációk vizsgálata is. A jövőben a modell és a numerikus szimulációk segítségével a tűzoltósági gyakorlatok során alkalmazott tűzoltórendszerek tesztelésére is alkalmassá tehető. A szimulációk tapasztalatai a gyakorlatban is hasznosíthatók, az eredmények alkalmazásával elkerülhetők a nem megfelelő működésből adódó vízellátási problémák.

Felhasznált irodalom

- HAJDU, Flóra (2019): Sensitivity Study of a Nonlinear Semi-Active Suspension System. *Acta Technica Jaurinensis*, 12(3), 205–217. Online: <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.v12.n3.505>
- HAJDU Flóra – HORVÁTH Péter – KUTI Rajmund (2017): Hasznos folyadék szállítás vizsgálata centrifugálszivattyúk alkalmazásánál. *Védelem Tudomány*, 2(1), 304–317.
- FECSEER Nikolett et al. (2020): Examining Centrifugal Pump BKS300 on Cavitation. *Hidraulica*, 3, 67–75. Online: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/16044>
- FÖLDI László – PADÁNYI József (2021): Környezetbiztonsági kihívások a haderők számára. In GÖCZE István (szerk.): *Az egyházak és a katonai erők előtt álló kihívások, az együttműködés lehetőségei*. Budapest: Magyarország Magyarországi Egyházak Ökumenikus Tanácsa (MEÖT), 49–60. Online: https://meot.hu/dokumentumok/2021szocet/Tanulmanykotet_MEOT_NKE.pdf#page=50
- L. SZABÓ Béla (1983): *Vízellátási ismeretek*. Budapest: BM Könyvkiadó.
- LAJOS Tamás (2004): *Az áramlástan alapjai*. Budapest: Műegyetemi Kiadó,
- PÁZMÁNDY Mihály (1979): *A tűzoltás vízellátása*. Budapest: BM Könyvkiadó.
- SPURGEON, Paul (2012): Every Pump Operatos' Basic Equation. *Fire Engineering*, 165(10), 51–64.