

A hőszivattyús rendszerek rendszerelméleti modellezése

Összefoglalás: Minden berendezés tervezése és üzemeltetése során jogos igény – a 21. században alapvető követelmény – hogy a berendezések a fogyasztási igényekhez optimálisan illeszkedjenek, azaz a berendezést olyan paraméterekkel létesítsük és üzemeltessük, amelynek eredményeképpen optimális, azaz minimális üzemi költséget eredményezzen. Írásunkban bemutatjuk a talajszondás hőszivattyús fűtési rendszerek energetikai bemenet–kimenet analízisének módszerét. A rendszerelemzés célja, hogy új rendszerek esetében az adott méretezési hőigények kielégítéséhez minimális beruházási és üzemeltetési költséget biztosító rendszert tervezhessünk, míg a meglévő rendszer esetében pedig az aktuális hőigényt minimális energiafelhasználással, maximális COP-val és minimális üzemeltetési költséggel elégíthessük ki.
Kulcsszavak: Hőszivattyú; rendszerelmélet; input-output; modell.

Bevezetés

A hőszivattyú összetett rendszer, amely energetikai és gazdasági értékelése és alkalmazásuk gazdaságosságának megítélése csak rendszerelméleti alapon, a rendszerelmélet eszközeivel lehetséges. Ehhez segítséget ad az operációkutatás és a döntéselmélet módszertana.

Energetikai rendszerek rendszerelméleti modellezésével, dinamikus optimalizálásával, a diszkrét dinamikus programozás felhasználásával foglalkozik például Sieniutycz [1], [2], Cheung [3]. A hőszivattyús rendszerek és a geotermikus energia felhasználásának korszerű matematikai–közgazdasági vizsgálatával foglalkoznak Katsunori [4], Kroepe [5] továbbá Lamarche [6]. A matematikai rendszerelméletnek a hőszivattyús rendszerekre való kiterjesztésével Garbai [7] foglalkozik.

* Dunaújvárosi Egyetem,
Műszaki Intézet
Email: santar@uniduna.hu

** Merkbau Építőipari és
Kereskedelmi Zrt.
Email: zonaiviktor@hotmail.hu

[1] Sieniutycz, S.–Kubiak, M. (2022): Dynamical energy limits in traditional and work-driven operations I. Heat-mechanical systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 45, Pp. 2995–3012.

[2] Sieniutycz, S.–Hamilton-Jacobi-Bellman equations and dynamic programming for power-maximizing relaxation of radiation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 50, 2007, p. 2714–2732.

[3] Cheung, R.–Powell, W. B. (1996): An algorithm for multistage dynamic networks with random arc capacities, with an application to dynamic fleet management. *Operations Research*. 44., (6.), Pp. 951–963.

[4] Katsunori, N.–Takao, K.–Sayaka, T. (2006): Development of a design and performance prediction tool for the ground source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*. 26. Pp. 1578–1592.

[5] Torhac, E.–Lipus, L. C.–Krope, J.–Goricanec, D.–Saljnikov, A.–Stipic, R.–Kozic, D. (2005): *Economic Analysis of Heating Systems using Geothermal Heat Pump*. 3rd IASME/WSEAS Int. Conf. on Heat transfer, thermal engineering and environment, Corfu, Greece. Pp. 344–348.

[6] Lamarche, L.–Beauchamp, B. (2007): A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. *Energy and Buildings*. 39. Pp. 188–198.

[7] Garbai L.–Méhes Sz. (2007): Hőszivattyús energetikai rendszerek complex rendszerelméleti modellje. *Magyar Épületgépészet*. 57., (11.)

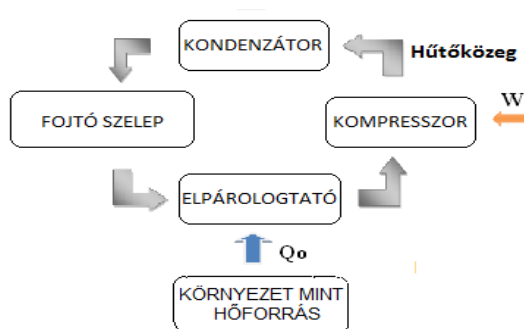
Kutatásomban célul tűztem ki, hogy megalkossam a talajszondás hőszivattyús fűtési rendszerek energetikai bemenet–kimenet analízisének módszerét.

A rendszerelméleti leírás lehetővé teszi, hogy új rendszerek esetében az adott méretezési hőigények kielégítéséhez minimális beruházási és üzemeltetési költséget biztosító rendszert tervezhessünk, meglévő rendszer esetében pedig az aktuális hőigényt minimális energiafelhasználással, maximális COP-val, és minimális üzemeltetési költséggel elégíthessük ki. Két – egyébként kapcsolódó – módszer kidolgozása lehetővé teszi, egyfelől a tervezési, létesítési paraméterek, másfelől az üzemeltetési paraméterek optimalizálását.

A kompresszoros hőszivattyú

A 20. század második felének és a 21. század, tehát jelen korunk egyik leghatékonyabb, energiatakarékos fűtési, illetve hűtési megoldását jelenti a kompresszoros hőszivattyú alkalmazása. A kompresszoros hőszivattyú olyan berendezés, amely zárt rendszerben áramló munkaközeg segítségével alacsony hőmérsékletű környezetből (külső munkaközegtől) energiát (hőt) vesz fel, azt villamosenergia vagy mechanikai munka befektetésével, munkagéppel hajtott kompresszor segítségével magasabb hőmérséklet szintre emeli és a felhasználónak, egy másik munkaközegnek, többnyire fűtési rendszerben keringetett hőhordozó közegnek leadja.

1. ábra. A kompresszoros hőszivattyú energiafolyama



A hőszivattyúk körfolyamatai termodinamikailag megegyeznek a hűtőkörfolyamatokkal, csupán a hideg hőtartály szerepét a környezet, a meleg hőtartályét pedig a fűtött rendszer veszi át.

A rendszer energetikai hatásfoka, a teljesítménytényező, a nemzetközi terminológiában COP, a fűtésre nyert hő és a befektetett összes mechanikai munka közötti viszonyt fejezi ki. A teljesítménytényező megmutatja hány kWh hőt nyerünk 1kWh kompresszió munka befektetése mellett. A mechanikai munkát általában villanymotorokkal villamos energia felhasználásával nyerjük, de megjelentek a gyakorlatban a gáz üzemanyagot felhasználó belsőégésű motorok (gázmotorok) is.

$$COP=Q_c/W \rightarrow \max ! \quad (1)$$

A kompresszoros hőszivattyús rendszer fizikai modelljének kialakítása

A hőszivattyús fűtőrendszer középpontjában a körfolyamat van. A hőszivattyú fizikai modelljét négy fő alkotóelem képezi: az elpárolgató, a kompresszor, a kondenzátor és az adagolószelep. Az elpárolgatón keresztül kapcsolódik be a modellbe a hidegvíz-kör, azaz a hűtött kör, amely az alacsony hőmérsékletű hőforrás. A kondenzátoron keresztül pedig a melegvíz-kör, azaz a fűtési kör, a fűtési rendszer. A teljes hőszivattyús rendszer vázlatát forrás és nyelőkutakkal a 2. ábra mutatja

A hűtőközeg az elpárolgatóban, elpárolgással átveszi a hőt az alacsony hőfokú áramkörben áramló hűtött közegtől. Az elpárolgatóban képződött gőzt a kompresszor beszívja és mechanikai munka befektetése mellett magasabb energia szintre szállítja, komprimálja. A felmelegedett gőz a kondenzátorban a hőt átadja a fűtött közegnek, miközben kondenzálódik. A kondenzátum a fojtószelepen áramolva kerül újra az elpárolgatóba. A fojtószelep térfogatváltozással biztosítja, hogy a hűtőközeg kondenzátumának hőmérséklete az elpárolgási hőmérséklet szintjére csökkenjen, továbbá, hogy az elpárolgatóba optimális mennyiségű hűtőközeg kerüljön be, azaz szabályozza az elpárolgató túlhevítési mértékét.

1. Fűtőkör
2. Keringető szivattyú
3. Kompresszor
4. Szivattyú
5. Forráskút
6. Talaj
7. Kondenzátor
8. Adagoló szelep
9. Elpárolgató
10. Nvelőkút

A hőszivattyú energetikai hatásfokának javítása és az üzemeltetés minőségének emelése megkerülhetetlenné teszi, hogy törekedjünk a hőszivattyú üzemének, a benne zajló folyamatok mind pontosabb leírására, az azt megalapozó fizikai, matematikai modellek fejlesztésére és finomítására. A hőszivattyú matematikai modellje lehetővé teszi az optimális rendszerek kialakítását, gazdaságosabb megoldások keresését, üzemi jellemzők kiértékelését, valamint élettartam- és költségtervezést. A hőszivattyú energetikai optimuma akkor áll elő, ha a COP maximális értéket vesz fel [8], [9].

Maximális teljesítménytényezőt akkor érünk el, ha a hőt minimális befektetett mechanikai munka felhasználásával szállítjuk a felhasználás helyére. A megszerkesztett és legyártott rendszernél az teljesítménytényezőt már csak a befektetett mechanikai munkák csökkentésével lehet javítani. A maximális energetikai hatásfok névleges állapota beállítható a tervezés fázisában az optimális rendszer-paraméterek megválasztásával, amelyek biztosítják a rendszer együttes létesítési és üzemeltetési költségének minimalizálását.

A kivitelezett rendszernél viszont a kompresszort és a szivattyúkat hajtó motorok fordulatszámának összehangolásával történhet.

$$COP = \frac{Q_c}{\sum W_i} [-], \quad (2)$$

illetve

$$COP = \left| \frac{Q_0 + W_k + W_{ksz}}{W_p + W_k + W_{ksz}} \right|_{max}. \quad (3)$$

ahol

$$Q_c = Q_0 + W_k + W_{ksz} \quad (4)$$

$$\sum_1^3 W_i = W_p + W_k + W_{ksz}, \quad (5)$$

- $Q_o[W]$ – az elpárologtatóban felvett hő teljesítménye, a szállított hő,
- $Q_c[W]$ – a kondenzátorból elvezetett hő teljesítménye, fűtésre használt hő,
- $W_k = f(p_e, p_c, \dot{m}_h)[W]$ – a kompresszor által felvett teljesítmény,
- $W_p = f(\Delta p_p, \dot{m}_p)[W]$ – a vízszivattyú elektromos teljesítményigénye,
- $W_{ksz} = f(\Delta p_{ksz}, \dot{m}_{ksz})[W]$ – a keringető szivattyú elektromos teljesítményigénye.

A kompresszoros hőszivattyú rendszertani bemenet-kimenet modellje

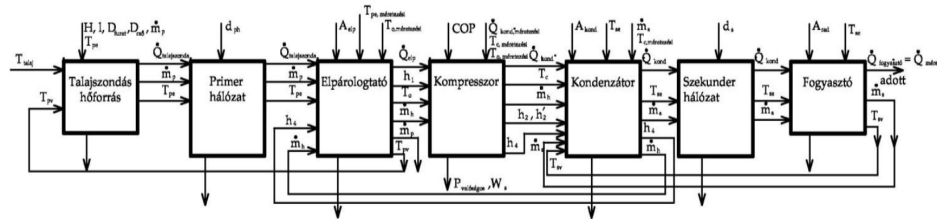
A rendszertani bemenet-kimenet modellek a rendszerelemek egymáshoz kapcsolódásának topológiáját, tehát a rendszerelemek egymáshoz kapcsolódásának gráffal jellemzett geometriáját, továbbá a rendszer-elemeken áthaladó energia- és anyag- valamint a jeláramokat írják le. Ezek az áramok a rendszerelemek-ben bemenetként és kimenetként jellemezhetők. Egy-egy rendszerelem (kimenetei) más rendszerelemek bemeneteként értelmezhetők. A rendszertani modellezés során a teljes hőszivattyús rendszert elemeire

[10] Sánta, R.–Garbai, L.–Füster, I. (2017): Numerical investigation of the heat pump system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 130. Pp. 1–12.

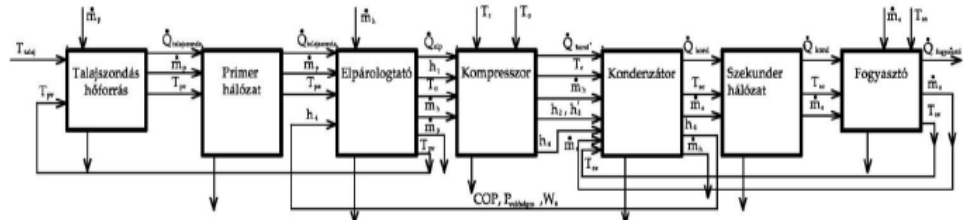
bontottuk, megadtuk az elemek bemeneti és kimeneti változóit, és a döntési változóit. A hőszivattyús rendszer komponenseinek be- és kimenő jellemzői között differenciál- és algebrai egyenletek teremtenek kapcsolatot [10].

A kompresszoros hőszivattyú bemenet-kimenet modelljét, a döntési változókat mind a tervezés mind az üzemeltetés fázisára részletesen elemezzük a következő ábrákon.

3. ábra. A tervezés és létesítés fázis alatti hőszivattyús rendszer energetikai bemenet-kimenet fehérdoboz-modellje



4. ábra. Az üzemeltetési fázis alatti hőszivattyús rendszer energetikai bemenet-kimenet fehér doboz modellje



A két modell a döntési változóban különbözik egymástól. A tervezés és létesítés modelljében minden szerelem tervezési-létesítési paramétereit is meg kell állapítanunk. E paraméterek a szerelemek technikai, technológiai kapacitás- és teljesítőképesség adatai, amelyeket a legnagyobb fogyasztói hőigény értékéhez kell megállapítanunk.

A legfontosabbak a következők:

- *Talajszondás hőforrásnál*: furat mélysége (H), szondaszárak közti távolság (l), talajszonda átmérője ($D_{cső}$), furat átmérője (D_{furat}), primer folyadék tömegárama ($\dot{m}_p$),
- *Primer hálózatonál*: a primer hálózat átmérője, átmérője ($d_{p,cső}$);
- *Elpárologtatónál*: az elpárologtató hőátadó felülete (A_{elp}), a méretezési elpárolgási hőmérséklet ($T_{o,méretezési}$), talajszondákból feljövő (előremenő) primer folyadék hőmérséklete (T_{pe}) [11];
- *Kompresszornál*: a hőszivattyú teljesítménytényezője (COP), a kompresszor teljesítőképessége, a méretezési kondenzációs hőmérséklet ($T_{c,méretezési}$), a méretezési elpárolgási hőmérséklet ($T_{o,méretezési}$), a méretezési kondenzációs hőteljesítmény ($Q_{kond,méretezési}$);
- *Kondenzátornál*: a kondenzátor hőátadó felülete (A_{kond}), az előremenő fűtési víz hőmérséklete (T_{se}) a keringtetett fűtési víz tömegárama méretezési állapotra ($\dot{m}_s$) a méretezési kondenzációs hőmérséklet ($T_{c,méretezési}$);
- *Szekunder hálózatonál*: a szekunder fűtési rendszer átmérője, átmérője ($d_{cső}$);
- *Fogyasztónál*: a belső fűtési rendszer hőátadó felülete (A_{rad}), az előremenő fűtési víz hőmérséklete (T_{se}).

Az üzemeltetés modelljében alapvető döntési–irányítási változók az $\dot{m}_p$ (a talajszondában keringtetett primer folyadékáram) és $\dot{m}_s$ (a kondenzátort és a fogyasztót összekapcsoló fűtési rendszerben keringtetett folyadékáram), amelyeket úgy kell beállítanunk a különböző fűtési hőigények kielégítéséhez, hogy az üzemeltetés költsége minimális legyen.

Az üzemeltetési fázis alatti hőszivattyús rendszer input-output modelljéből kitűnnek a legfontosabb műveleti, döntési paraméterek:

- Hőszivattyú köre: a hűtőközeg hőmérséklete (T_{hk}), illetve a nyomása az elpárologtatóban és a kondenzátorban (p_{hk}), a keringtetett hűtőközeg tömegárama ($\dot{m}_{hk}$),
- Primer hálózatonál: a hűtött kör munkaközegének tömegárama ($\dot{m}_p$),
- Szekunder hálózatonál: a fűtött kör munkaközegének tömegárama ($\dot{m}_s$).

[11] Sánta, R.–Bošnjaković, M.–Čikić, A. (2022): Experimental and Numerical Testing of Heat Pump Evaporator, *Applied Sciences-Basel*. 12:23. Paper: 11973.

Összegzés

Hőszivattyús fűtési rendszer kiértékelése és optimalizálása rendszerelméleti modellek segítségével végezhető el. A modellek felépítésénél pontosan definiálnunk kell a döntési változókat, a bemeneti és kimeneti változókat és az azok közötti transzformációs összefüggéseket, az egyes rendszerelemek beruházása, létesítése, működtetése és szabályozása céljából.

Az input-output változók közötti transzformációs összefüggések leírására és meghatározásának céljára egy egyedi-teljeskörű matematikai modelljének a megfogalmazása szükséges. A matematikai modell eszközként fog szolgálni a hőszivattyús fűtőrendszer különböző optimumainak meghatározására, valamint a stacioner működés szimulálására. A stacioner matematikai modell csak az időtől független térbeli változásokat veszi figyelembe míg az instacioner matematikai modell sokkal bonyolultabb, hiszen a változást nem csak térben, hanem időben is követi. A gyakorlat a stacioner matematikai modell alkalmazását indokolja, mivel a hőszivattyús fűtőrendszer működésének kb. 99%-a stacioner üzemmódban valósul meg. Instacioner vagyis a dinamikus üzemmód csak a bekapcsolás rövid időtartamában, vagy a folytonos vezérlés esetében a teljesítmény-változtatás rövid időszakában történik.