



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

Kompresszoros hőszivattyúk optimalizálása épületgépész feladatokra

Tézisfüzet

Írta:

Méhes Szabolcs
okleveles gépészmérnök

Témavezető:

Dr. Garbai László
egyetemi tanár

2011. szeptember, Budapest

1. PROBLÉMAFELVETÉS ÉS AZ ÉRTEKEZÉS CÉLKITÚZÉSEI

Értekezésem témájául a talajszondás kompresszoros hőszivattyúk energetikai vizsgálatát és a méretezés módszerének áttekintését választottam. A talajszondás hőszivattyúk tervezésének, létesítésének és üzemeltetésének problémáit áttekintve megállapítottam, hogy mind az oktatásban, mind a tervező és üzemeltető mérnökök eszköztárából hiányzik a hőszivattyús berendezések tervezésének és üzemeltetésének egységes, integrált, rendszerszemléletű, átfogó módszere, és ezen belül azok a módszerek, amelyekkel megbízhatóan számítani tudnánk a talajszondákból kinyerhető hőteljesítményt, továbbá a hőszivattyú teljesítménytényezőjét az alsó és felső hőmérsékletkorlátok, valamint a keringtetett hűtőközeg és a keringtetett fűtőközeg áramának függvényében. Hiányzik az a módszer, amelynek segítségével a talajszondás hőszivattyús fűtési rendszerek energetikai analízisét végre tudnánk hajtani. Hiányzik az energetikai és gazdasági bemenet – kimenet modell. Hiányzik az a bemenet - kimenet modell, amely a mérlegegyenletek rendszerén keresztül leírja a hőszivattyús fűtési rendszer működését, az energia- és anyagáramokat. Hiányzik az a modell, amelynek segítségével precízen számítani tudjuk egy adott hőigényhez a szükséges földhő kihozatalát és a hőszivattyú teljesítménytényezőjét, illetve fordítva, fontos kérdés lehet: adott földhő kihozattal mekkora hőigényt tudunk kielégíteni, figyelembe véve természetesen a fogyasztói berendezések (hőleadók) termodinamikai, hőtechnikai tulajdonságait.

Értekezésemben azt tűztem ki célul, hogy megalkossam a talajszondás hőszivattyús fűtési rendszerek energetikai bemenet – kimenet analízisének módszerét, a rendszerelemek egymáshoz kapcsolódásának leírását mérlegegyenlet rendszerek segítségével, azok megoldásával, azzal a céllal, 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

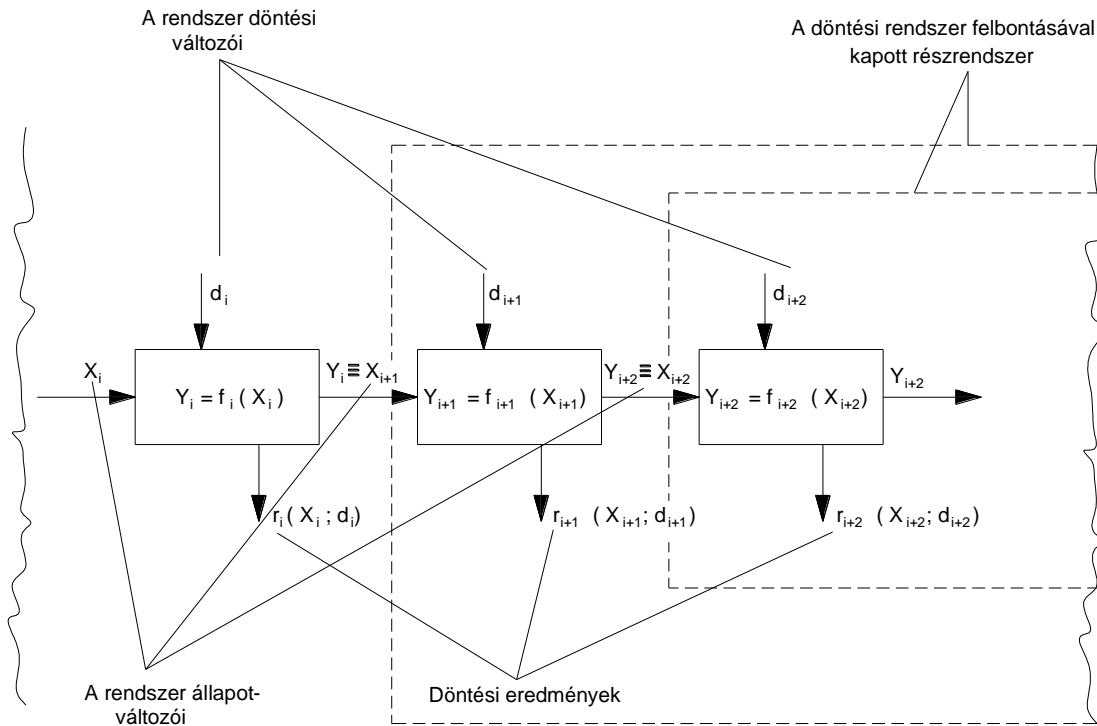
COP-vel, és minimális üzemeltetési költséggel elégíthessük ki. Két - egyébként kapcsolódó - módszer kidolgozása volt a célom, egyfelől a tervezési, létesítési paraméterek optimalizálása, másfelől az üzemeltetés optimalizálásának módszere.

A szakirodalom tanulmányozása során megállapítottam, hogy a rendszerelemek bemenet - kimenet analízisében feltáratlan viselkedésű elem a szonda, amelynek bemenet - kimenet analízise, elsősorban a kinyerhető hőteljesítmény szimulálása és mérési adatokkal való egybevetése a szonda mélysége, műszaki kialakítása, a talajviszonyok és a keringetett tömegáram függvényében feltáratlan. Bár ennek a számításával az általam átnézett szakirodalomban több kutató is foglalkozott, de a kapott eredmények nem alkalmazhatóak teljes mértékben a kimenet – bemenet modell felírásánál.

2. AZ ALKALMAZOTT MÓDSZER

A talajszondás hőszivattyús rendszer üzemének leírására a bemenet – kimenet analízishez az úgynevezett fehér doboz [Garbai, 2006], [Zadeh - Polak, 1972] modellt alkalmazom. A fehér doboz modellben a rendszert elemekre bontom, a rendszer elemek fokozatonkénti kapcsolatát egy gráffal ábrázolom. A gráf csomópontjainak a rendszerelemeket feleltetem meg. A csomópontokat „felnagyítom”, amelyek így dobozokat képeznek. A dobozokba a bemeneteket és kimeneteket összekapcsoló mérlegegyenleteket. A fehér doboz modellek ábrázolás módját az 1. ábra mutatja. Megadom az elemek bemeneti és kimeneti változóit, a döntési változókat és a döntési eredmény változókat. A rendszerelemekre felírt mérlegegyenletek matematikai összekapcsolásával ezután lehetségessé válik a teljes rendszer egységes bemenet – kimenet analízise és az optimalizáció végrehajtása, az üzemeltetési vagy létesítési célfüggvény minimalizálása. Az optimalizációban a dinamikus programozás módszerét használom, munkám során Nemhauser [Nemhauser, 1966] és Bellmann [Bellmann, 1957] munkásságára támaszkodom. Mind a mai napig ezek a szerzők adják a gépészeti rendszerekre adaptálható matematikai rendszerelmélet legvilágosabb

összefoglalását. A felírt rendszerelméleti modelltől az elvárt eredmény a hőszivattyús rendszerek üzemének és beruházási költségeinek könnyebb és áttekinthetőbb vizsgálata.



1. ábra: A fehér doboz modellek ábrázolás módja [Garbai, 2006]

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. tézis [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7].

Számítási modellt állítottam fel a vertikális talajszondákban áramló folyadék hőmérsékletének modellezésére. Felállítottam azt a kapcsolt differenciálegyenlet rendszert, amelynek segítségével a keringetett víz felmelegedése és a teljes kinyert hőteljesítmény számítható. A kapcsolt differenciálegyenlet rendszerre egzakt megoldásokat adok:

- A talajba lemenő vezetékre 0 m-től 15 m-ig:

$$\frac{dT_{pv}(H)}{dH} = \frac{s}{\dot{m}_p \cdot c_p} + \frac{1}{R_{eredő} \cdot \dot{m}_p \cdot c_p} \cdot (G \cdot H^3 + I \cdot H^2 + E \cdot H + F - T_{pv}(H)) + \frac{\dot{q}'}{\dot{m}_p \cdot c_p}, \quad (1)$$

ahol G, I, E, F állandók a jelzett hónapokra.

- A talajból feljövő vezetékre 15 m-től 0 m-ig:

$$\frac{dT_{pe}(H)}{dH} = \frac{s}{\dot{m}_p \cdot c_p} + \frac{1}{R_{eredő} \cdot \dot{m}_p \cdot c_p} \cdot (G_1 \cdot (15 - H)^3 + I_1 \cdot (15 - H)^2 + E_1 \cdot (15 - H) + F_1 - T_{pe}(H)) + \frac{\dot{q}'}{\dot{m}_p \cdot c_p}, \quad (2)$$

ahol G₁, I₁, E₁, F₁ állandók a jelzett hónapokra.

- A talajba lemenő vezetékre 15 m-től 100 m-ig, lineáris talaj hőmérsékletváltozást feltételezve:

$$\frac{dT_{pv}(H)}{dH} = \frac{s}{\dot{m}_p \cdot c_p} + \frac{1}{R_{eredő} \cdot \dot{m}_p \cdot c_p} \cdot (0,0706 \cdot H + 8,9412 - T_{pv}(H)) + \frac{\dot{q}'}{\dot{m}_p \cdot c_p}. \quad (3)$$

- A talajból feljövő vezetékre 100 m-től 15 m-ig, lineáris talaj hőmérsékletváltozást feltételezve:

$$\frac{dT_{pe}(H)}{dH} = \frac{s}{\dot{m}_p \cdot c_p} + \frac{1}{R_{eredő} \cdot \dot{m}_p \cdot c_p} \cdot (-0,0706 \cdot (100 - H) + 16 - T_{pe}(H)) + \frac{\dot{q}'}{\dot{m}_p \cdot c_p}. \quad (4)$$

Bevezettem a differenciálegyenlet rendszerben meghatározó szereppel rendelkező kvázistacionárius eredő hőellenállási tényező fogalmát és annak meghatározására számító képletet mutattam be:

$$R_{eredő} = R_{talaj} + R_{tömedék} + R_{cső} + R_{folyadék}. \quad (5)$$

A talaj hővezetési ellenállását a következő képen számíthatjuk:

Fourier (Fo) szám kis értékeire vonatkozóan kifejezhető:

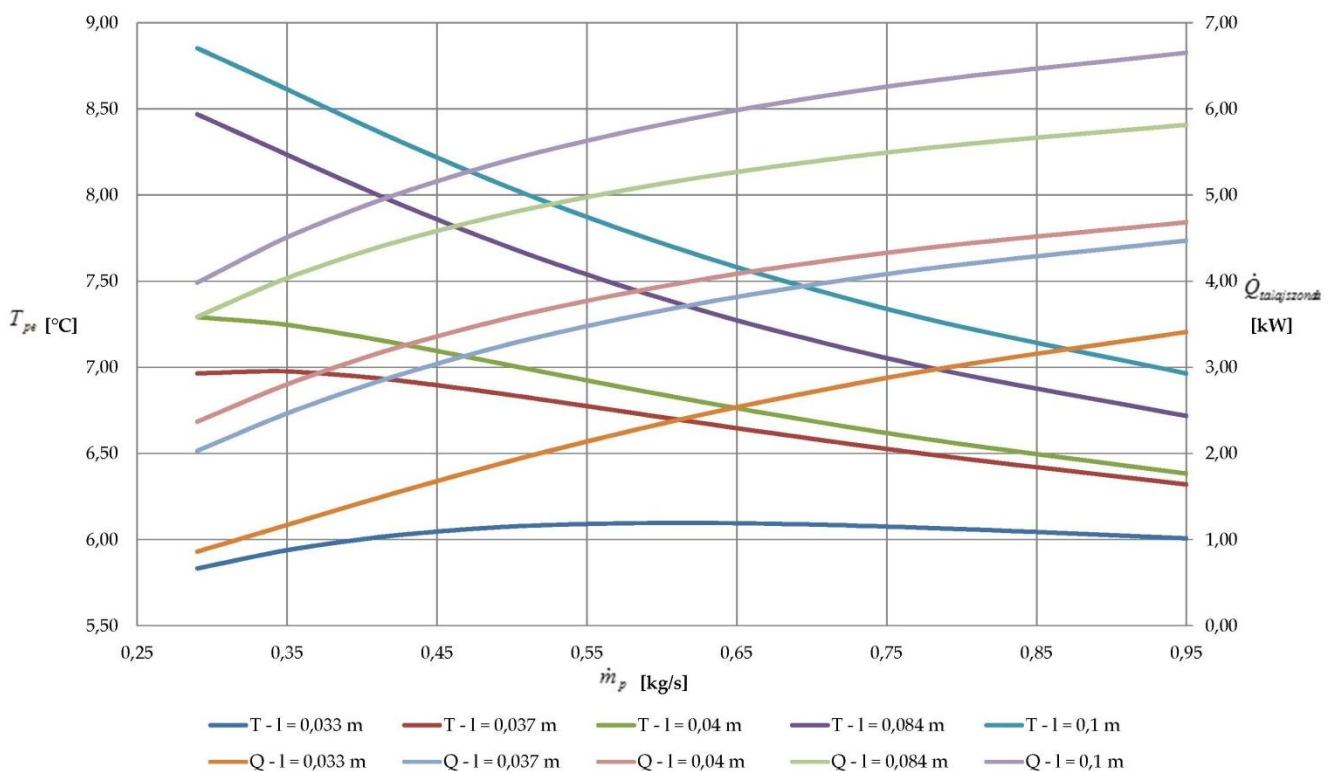
$$R_{talaj} = \frac{r_0}{2 \cdot \lambda_{talaj} \cdot \left\{ (\pi \cdot Fo)^{-\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} - \frac{1}{4} \left(\frac{Fo}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{8} \cdot Fo \dots \right\}}, \quad (6)$$

és a Fourier (Fo) szám nagy értékeire vonatkozóan:

$$R_{talaj} = \frac{r_0}{2 \cdot \lambda_{talaj} \cdot \left\{ \frac{1}{\ln(4Fo) - 2\gamma} - \frac{\gamma}{[\ln(4Fo) - 2\gamma]^2} - \dots \right\}} \quad (7)$$

2. tézis [1], [3], [4], [7].

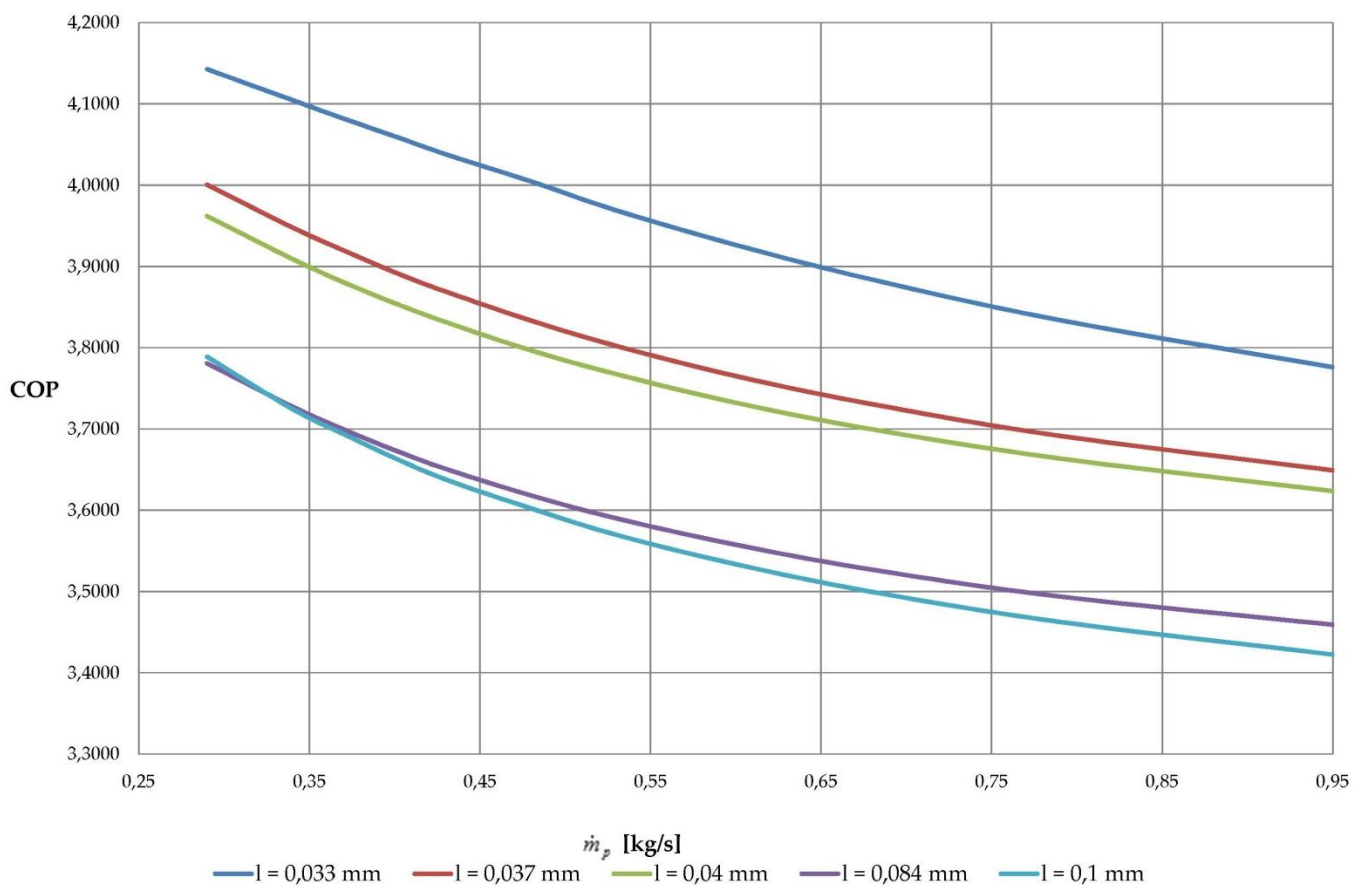
Kiszámítottam és diagramokban bemutattam a szabványosan alkalmazott Ø32 mm és Ø40 mm átmérőjű szonda csövekre vonatkozóan, tipikus talaj jellemzőkre a kinyerhető hőteljesítményt, illetve a földből kilépő folyadék hőmérsékletének nagyságát a mélység, az idő (hónapok), a tömegáram és a szondák egymástól való távolságának függvényében.



2. ábra: A kivehető hőteljesítmény ($\dot{Q}_{talajszonda}$) és a kilépő hőmérséklet (T_{pe}) változása a tömegáram (\dot{m}_p) függvényében **február hónapban** (1 éves üzemidő után, Ø32 mm átmérőjű szondacső esetében)

3. tézis [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7].

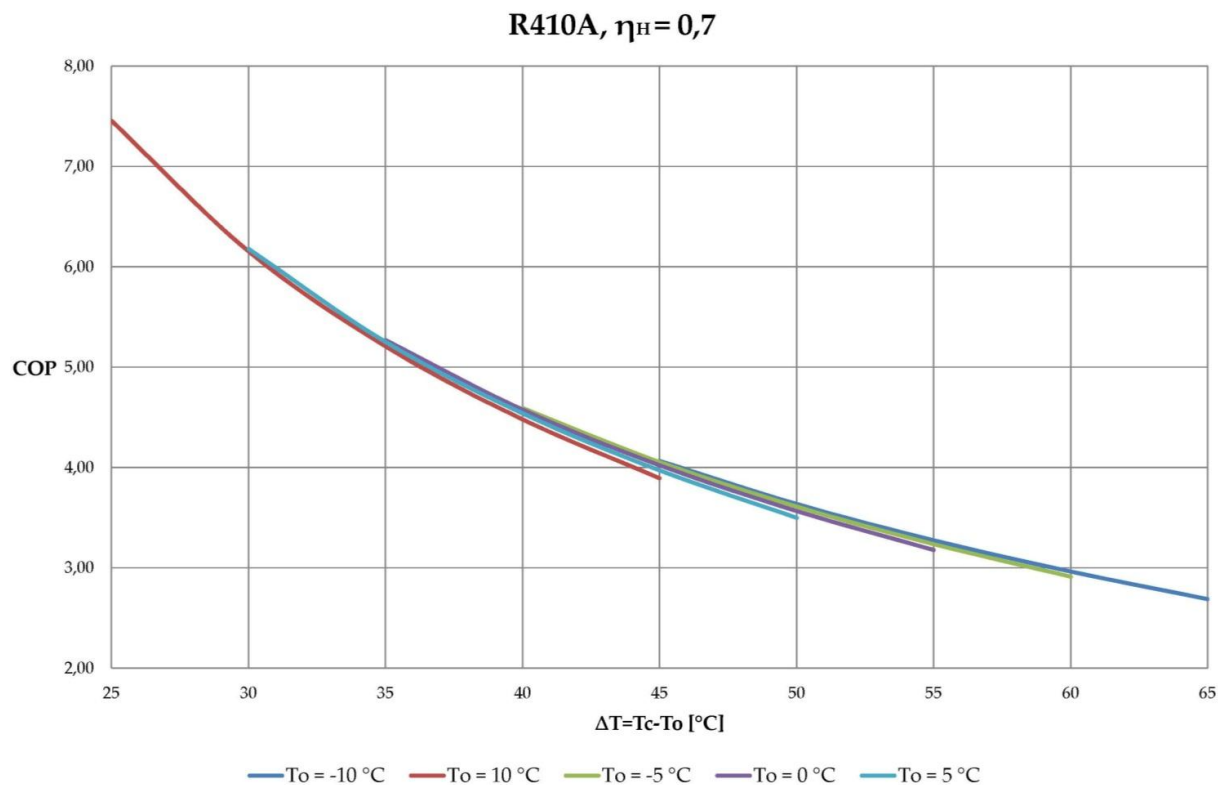
1 év üzemelési idő utáni időpontra, valamint ezt követően 10 éves ciklusra kiterjedően feldolgoztam a R407c hűtőközegre vonatkozóan a körfolyamat COP értékének változását a tipikus 50 °C kondenzációs hőmérséklet rögzítésével az elpárolgási hőmérséklet függvényében, amely a keringetett primer tömegáram és a feljövő vízhőmérséklet, illetve kinyert hőteljesítmény függvénye. Ez utóbbiak a szonda mélység és a szonda száruk távolságának függvényei, amely függést a számítások és a diagramok (pl. 3. ábra) tükrözik.



3. ábra: A COP érték változása a tömegáram (\dot{m}_p) és a kollektor száruk (l) távolságának függvényében **február hónapban** 1 éves üzemidő után, Ø32 mm átmérőjű szondacső esetében, $T_c = 50$ °C (T_0 értékeit értekezésem 3. számú melléklete, M3.1 táblázata tartalmazza)

3.1

A talajszondás hőszivattyúknál alkalmazott szabványosan alkalmazott R407c és R410A hűtőközegekre a tipikusnak tekinthető 0,7 hidraulikai hatásfok alapulvételével előállítottam a COP érték függvényeket különböző $\Delta T = T_c - T_o$ értékekre különböző T_o paraméter értékek mellett.



4. ábra: A COP érték változása a $\Delta T = T_c - T_o$ érték és az elpárolgási hőmérséklet (T_o) függvényében

4. tézis [8], [9],[10], [11], [12].

Elvégeztem a talajszondás elektromos kompresszor hajtású hőszivattyú rendszertani vizsgálatát. Felállítottam a rendszerelemek és az összekapcsolt rendszer bemenet – kimenet fehér doboz modelljeit, a bemenet – kimenet változókat összekapcsoló transzformációs egyenleteket, mérlegegyenleteket. Definiáltam az úgynevezett alap és inverz feladatot, amelyekkel a hőszivattyús rendszer üzemeltetési vizsgálatait elvégezhetők és munkapontjai megállapíthatók.

Az alapfeladatban a rendszerelemek bemeneteiből, elsősorban a talajszondával kinyert hő értékéből és annak jellemzőiből meghatározzuk a rendszerelemek kimenet értékeit és végül a leadható hőteljesítményt. A közbülső elemek üzemmódjára eközben szabad döntéseket hozhatunk.

Az inverz feladatban az adott ismert hőigényhez határozzuk meg a közbülső rendszerelemek üzemmódját és ezen belül elsősorban a hőszivattyús körfolyamat állapotjelzőit és a talajból felhozott hőteljesítményt. Az inverz feladatra optimalizációt és optimalizációt irányító célfüggvényt fogalmazzunk meg.

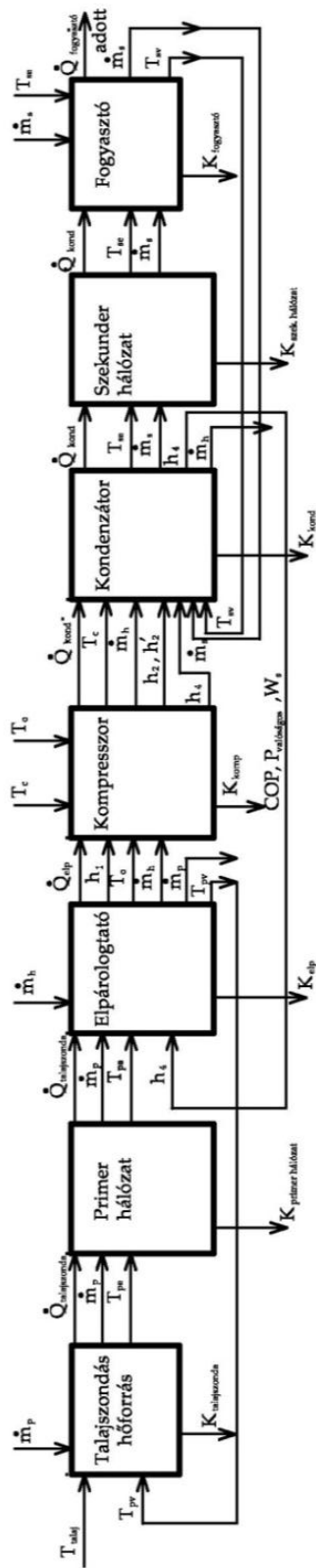
5. tézis [8], [9],[10], [11], [12].

Felállítottam a meglévő talajszondás elektromos kompresszor hajtású hőszivattyús fűtési rendszerek üzemének optimalizációját célzó rendszerelméleti döntési sémát. A célfüggvény a teljes rendszer üzemeltetési költsége, amelynek három fő eleme a szondákban áramoltatott közeg keringetésének költsége, a hőszivattyú kompresszorának elektromos energia költsége és a fűtési rendszerben a fűtővíz keringetéséhez felhasznált villamos energia költsége. Összeállítottam a döntési modell bemeneti és kimeneti illetve döntési változóit. Az optimalizációhoz a dinamikus programozás módszerét alkalmaztam. Ehhez felállítottam az egyes döntési fokozatok optimalitását kifejező úgynevezett rekurzív függvényegyenleteket.

A meglévő rendszer optimalizációja alatt azt értjük, hogy a már telepített és működő rendszernek megkeressük azokat a működési paramétereit – a fogyasztói igények függvényében – amelyekkel a rendszer működési költsége minimális. Ennek megállapítására pontosan ismernünk kell az egyes rendszerelemek típusát, méreteit és teljesítményeit valamint a pontos fogyasztói igényeket.

Az 5. ábrán felrajzolt hőszivattyús döntési rendszer célfüggvénye a következő:

$$K(\dot{Q}_{\text{fogyasztó}}) = \min \Sigma K_{ii} = \min(K_{\text{fogyasztó}} + K_{\text{kondenzátor}} + K_{\text{kompresszor}} + K_{\text{elpárolgató}} + K_{\text{talajszonda}})_{ii} \quad (8)$$



5. ábra: Működő hőszivattyús rendszer döntési rendszerelméleti sémája

A (8) egyenlettel felírt célfüggvény meglévő rendszereknél csak az üzemeltetési költségeket veszi figyelembe. Ebben az esetben beruházásról nem beszélünk, mivel a rendszerelemek adottak.

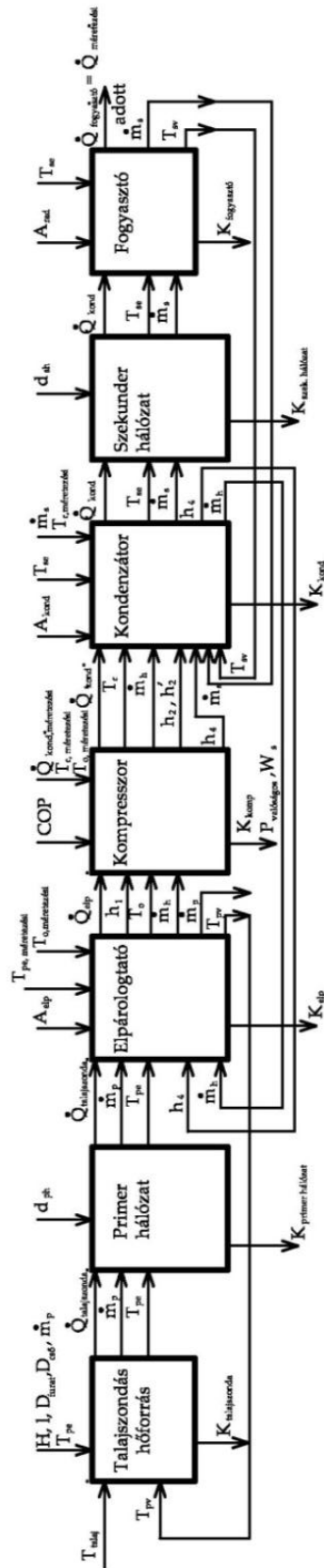
A bemenetek és a döntési változókat, valamint a kimeneteket összekapcsoló transzformációs egyenleteket disszertációm 4. fejezetében mutatom be. Az optimalizáció menetét és az optimalizációs egyenleteket disszertációm 6.1.2 fejezetében részletesen szemléltetem.

6. tézis [8], [9],[10], [11], [12].

Felállítottam az új talajszondás elektromos kompresszor hajtású hőszivattyús fűtési rendszerek tervezésének és létesítésének optimalizációját célzó rendszerelméleti döntési sémát. A célfüggvény a teljes rendszer létesítési és üzemeltetési együttes költségének minimumát tartalmazza tervezési és létesítési követelményként. A létesítési költség évi leírását foglalom egybe az évi üzemeltetési költséggel. Felállítottam a döntési modell bemeneti és kimeneti illetve döntési változóit. Az optimalizációhoz a dinamikus programozás módszertanát alkalmaztam. Ehhez felállítottam az egyes döntési fokozatok optimalitását kifejező úgynevezett rekurzív függvényegyenleteket. Fontos megjegyezni, hogy ezek a rekurzív függvényegyenletek szerkezetükben és tartalmukban és a transzformációs összefüggéseket tekintve is lényegesen eltérnek az üzemeltetés optimumát célzó döntési modelltől.

A tervezés és létesítés rendszerelméleti, döntési fehér doboz modelljét a 6. ábra mutatja. A rendszer soros típusú, anyag és energiaáram visszavezetésekkel.

A rendszer létesítési és üzemeltetési költségének minimumát kifejező célfüggvény:



6. ábra: A tervezés és létesítés rendszerelméleti, döntési fehér doboz modellje

$$K(\dot{Q}_{fogyasztó}) = \min[\Sigma K_{\dot{u}} + \Sigma K_B] = \min \left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} (K_{fogyasztó} + K_{szekunderhálózat} + K_{kondenzátor} + K_{kompresszor} + \\ + K_{elpárolgató} + K_{primerhálózat} + K_{talajszondák})_{\dot{u}} \end{array} \right] + \\ + \left[\begin{array}{l} K_{fogyasztó} + K_{szekunderhálózat} + K_{kondenzátor} + K_{kompresszor} + \\ + K_{elpárolgató} + K_{primerhálózat} + K_{talajszondák})_b \end{array} \right] \end{array} \right\}, \quad (9)$$

amely kifejezi, hogy a támasztott fogyasztói igény függvényében minimalizáljuk a bekerülési és üzemeltetési költségeket a rendszert alkotó összes fokozatnál.

A bemeneteket és a döntési változókat, valamint a kimeneteket összekapcsoló transzformációs egyenleteket disszertációm 4. fejezetében mutatom be. Az optimalizáció menetét és az optimalizációs egyenleteket disszertációm 6.2 fejezetében részletesen szemléltetem.

4. AZ EREDMÉNYEK ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI

A bemutatott rendszerelméleti, döntési fehér doboz modellek alapján számolható bármilyen talajszondás hőszivattyús fűtési rendszer optimális üzemeltetési munkapontja. Meghatározhatóak azok a működési feltételek (primer és szekunder oldali tömegáramok, elpárolgási hőmérséklet, kondenzációs hőmérséklet stb.), amelyeknél a rendszer üzemeltetési és/vagy beruházási költségei minimálisak. Ezeket a költségeket értekezésem 4. fejezetében bemutatott összefüggések alapján lehet számolni, ahol szemléltettem a transzformációs összefüggéseket, mind az alap, mind az inverz feladatra. Az inverz feladat alkalmazására (6. melléklet) példát mutatok be.

A rendszerelméleti modellek megalkotásánál fontos feladat a talajból kinyerhető hőtéljesítmény, illetve a talajból feljövő folyadék hőmérsékletének meghatározása. Táblázatokban, illetve ábrákon szemléltettem különböző feltételek mellett (talajba lemenő folyadék hőmérsékletének függvényében) a kinyerhető hőtéljesítmény nagyságát az üzemidő, a külső hónapok változása, a szondák szártávolságának illetve a primer keringetett folyadék tömegáramának függvényében. A kapott eredmények felhasználhatóak a talajszondás hőszivattyús rendszerek

talajszondáinak tervezésekor, illetve a rendszerelméleti modelleknél az optimum meghatározására.

A TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

- [1] Garbai, L., Méhes, Sz.: The Amount of Extractable Heat with Single U-tube in the Function of Time, *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*. 2008/2 (2008).
- [2] Garbai, L., Méhes, Sz.: Determining the temperature field for cylinder symmetrical heat conduction problems in unsteady heat conduction in finite space, 2nd IASME/WSEAS International Conference on Energy and Environment. Portorose, Slovenia, 2007 pp. 5
- [3] Garbai, L., Méhes, Sz.: Heat capacity of vertical ground heat exchangers with single U-tube installation in the function of time, *WSEAS Transactions on Heat and Mass transfer*. 3 (2008) 9.
- [4] Garbai, L., Méhes, Sz.: Modelling of the temperature change in vertical ground heat exchangers with single U-tube installation, 6th IASME/WSEAS International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment. Rhodes, Greece, 2008 pp. 5
- [5] Garbai, L., Méhes, Sz.: New Analytical Solutions to Determine the Temperature Field in Unsteady Heat Conduction, *WSEAS Transactions on Heat and Mass transfer*. 1 (2006) 9.
- [6] Garbai, L., Méhes, Sz.: Új analitikus megoldások a hőmérsékletmező meghatározására nemállandósult hővezetésben, *Magyar Épületgépészet*. 2008 (2008) 5.

- [7] Garbai, L., Méhes, Sz.: Energy Analysis of Geothermal Heat Pumps with U-tube Installations, 3rd IEEE International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources; Szabadka; Szerbia, 2011
- [8] Garbai, L., Méhes, Sz.: The basic of the system theory model of heat pumps, Vykurovanie 2008. Tatranske Matliare, Slovakia, 2008 pp. 4
- [9] Garbai, L., Méhes, Sz.: Hőszivattyús rendszerek komplex rendszerelméleti modellje, Magyar Épületgépészet. 2007 (2007) 5.
- [10] Garbai, L., Méhes, Sz.: System Theory Modell of Heat Pumps, Gépészet 2008. Budapest, Hungary, 2008 pp. 12
- [11] Garbai, L., Méhes, Sz.: System Theory Models of Different Types of Heat Pumps, 2nd IASME/WSEAS International Conference on Energy and Enviroment. Portorose, Slovenia, 2007
- [12] Garbai, L., Méhes, Sz.: Meglévő és a tervezés és létesítés fázisa alatt álló talajszondás hőszivattyús rendszerek döntési rendszerelméleti modelljei, Magyar Épületgépészet. 2011 (2011) 7-8.

TOVÁBBI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

- [13] Garbai, L., Barna, L., Méhes, Sz., Bartal, I.: The system theory of heat flux. One input problem., 4th WSEAS International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment. Elounda, Greece, 2006 pp. 8
- [14] Garbai, L., Kropé, J., Bartal, I., Méhes, Sz.: Theory of linear and non-linear transient heat conduction in composite systems, WSEAS Transactions on Heat and Mass transfer. 1 (2006) 10
- [15] Garbai, L., Méhes, Sz., Bartal, I.: Thermal comfort in the residential buildings, hydraulic analysis of vertical two-pipe central heating networks, Vykurovanie 2008. Tatranske Matliare, Slovakia, 2008

- [16] Garbai, L., Kropé, J., Méhes, Sz., Bartal, I.: Transient Heat Conduction in Composite Systems, 4th WSEAS International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment. Elounda, Greece, 2006 pp. 6
- [17] Garbai, L., Barna, L., Bartal, I., Méhes, Sz.: On the system theory of the heat flux. Two input problems. Application of fractional differential and integral operators, WSEAS Transactions on Heat and Mass transfer. 1 (2006) 9

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [Bellmann, 1957] Bellmann, R.: Dynamic Programming, Princeton University Press, Princeton, 1957.
- [Garbai, 2006] Garbai, L.: Tévhőellátás, Hőszállítás, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2006.
- [Nemhauser, 1966] Nemhauser, G. L.: Introduction to dynamic programming, Wiley, New York ; London, 1966.
- [Zadeh – Polak, 1972] Zadeh, L. A., Polak, E.: Rendszerelmélet, Műszaki Könyvkiadó; Budapest, 1972.