

HŐSZIVATTYÚK MODELLEZÉSE CFD MÓDSZEREKKEL

DR. TURZÓ ZOLTÁN

1. Bevezetés

A hőszivattyú segítségével alacsonyabb hőmérsékletű környezetből hőt lehet kivonni, és azt fel lehet használni egy magasabb hőmérsékletű tér fűtésére. A hőszivattyúkban illékony hűtőközeg gőze áramlik, melyet kompresszor segítségével kondenzáltatnak, illetve felmelegítve elpárologtatnak. A leggyakrabban alkalmazott talajszondás hőszivattyúk esetén a hőszivattyú hűtőközegének felmelegítése a föld hőjével történik a talajba függőlegesen fúrt lyukakban elhelyezett U alakú hőcserélők segítségével.

A talajszonda egy általában 0,1-0,2 m átmérőjű, 20-200 m mélységű fúrt lyukból, az abban elhelyezett U alakú, 20-40 mm átmérőjű csőből, és a cső és a fúróluk üregét kitöltő valamilyen hővezető anyagból áll. A talajszonda gyakorlatilag egy hőcserélő, melyben bonyolult áramlás- és hőtani folyamatok játszódnak le, melynek megértése nagyon fontos a berendezések hatásfokának javítása érdekében.

2. A hőcserélők modellezése

A hőszivattyúk hőcserélőiben és a környező talajban lejátszódó folyamatok modellezésében az első lépéseket az 1950-es években Ingersoll és társai[1] tették meg, analitikus modelljük számos későbbi modell alapjául szolgált[2-4]. Az analitikus modellek jelentős egyszerűsítéseket tartalmaznak, a hőcserélőt vagy vonal-, vagy henger alakú egyenletes teljesítményű hőforrásként kezelik.

Az analitikus modellek egyszerűsítő feltételeinek kiküszöbölése érdekében véges differenciák, véges térfogatok és véges elemes numerikus módszereket dolgoztak ki a hőcserélő modellezésére[5-8]. A numerikus modellek nagyobb pontosságához sajnos nagy, esetenként akár több napos számítás igény kapcsolódhat.

A numerikus módszerek számítás igényének csökkentése érdekében fejlesztettek ki ún. hibrid numerikus módszereket, melyekben az üzemidővel a hőcserélő környezetében lejátszódó folyamatok hatására a hőcserélő hő leadását befolyásoló változásokat hőmérséklet-reakció (temperature response) függvényrel helyettesítik, és ezt a függvényt beépítik a szimulációs szoftverekbe[9-11]. Ezzel a módszerrel a szimulációs idő jelentősen csökkenthető.

Az egyes modellezési módszerek összehasonlítása azt mutatja, hogy az analitikus és hibrid módszerek segítségével a hőcserélőben és a környezetében térben és időben lejátszódó folyamatok nem modellezhetők kellő pontossággal[12,13], tehát a nagyobb számítás igény ellenére a numerikus szimulációk végzése jelenleg nem megkerülhető. A numerikus szimuláció mellett szól az is, hogy segítségével a hőcserélő hő leadásának a talajvíz mozgások hatására történő változása is tanulmányozható.

3. Numerikus modellezés

A numerikus modellezés nagy számítás igényét a vizsgált tér cellákra osztása és a lejátszódó folyamatok idő igénye együttesen határozza meg. Sajnos a vizsgált tér-rész nagyon karcsú, vagyis a hossza lényegesen nagyobb a vízszintes kiterjedésénél. A benne lejátszódó folyamatok időigénye hetekben, hónapokban mérhető, miközben a tranziens szimulációk idő léptéke nem választható nagynak a hőcserélőben áramló közeg miatt. Mindezen körülmények együttesen azt eredményezik, hogy a numerikus szimulációk számítás idő igénye néhány órától akár több napig is terjedhet. A számítási igény a több

*Dr. Turzó Zoltán

tanszékvezető egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Kőolaj és Földgáz Intézet, Miskolc-Egyetemváros 3515, turzoz@kfgi.uni-miskolc.hu

processzoros klaszterezhető számítógépekkel csökkenthető, ez viszont igen megnöveli a szimulációk költségeit.

A hőcserélőben és környezetében lejátszódó folyamatokat leíró differenciál egyenlet rendszer jól ismert, és a numerikus szimulációk közös alapja. Az egyes megoldási módok leginkább a megoldhatóság érdekében alkalmazott közelítő feltételekben, egyszerűsítésekben és a vizsgált térrész numerikus szimuláció során alkalmazott diszkretizálásában, valamint a kapott egyenletrendszer megoldási stratégiáiban térnek el egymástól. A numerikus modellezés történhet: saját kóddal, ami lehet egy teljesen új szoftver, vagy a kereskedelemben kapható speciális szoftverekhez pl. FEFLOW, TRNSYS, etc. írt modul; vagy általános CFD szimulációs programok pl. ANSYS, COMSOL, etc. segítségével.

3.1. Saját kódú modellezés: A saját kód megírása bizonyos esetekben elkerülhetetlen, főleg ha a szerző nagyon speciális egyszerűsítő feltételekkel él. Az ilyen megoldások megvalósítása sokkal nagyobb erőfeszítéseket igényel a szerzőktől, mint a már kész szoftverek alkalmazása, a hibalehetőségek száma is nagyobb. A saját kódú program általában specifikus, csak a leprogramozott esetek vizsgálatára alkalmas. Az eredmények pontossága természetesen a programozott módszertől függ, az idő igény általában töredéke egy teljesen tranziens numerikus szimulációénak.

Lee és társa például véges differenciák módszerét alkalmazza, és a hőcserélő és környezetének a hőmérséklet eloszlását külön-külön, kvázi-stacioner állapotokban egymás utáni iterációt végezve határozza meg[14]. A használt cellastruktúrát az *1. ábra* szemlélteti. A modellezés során a cellák száma 400 volt.

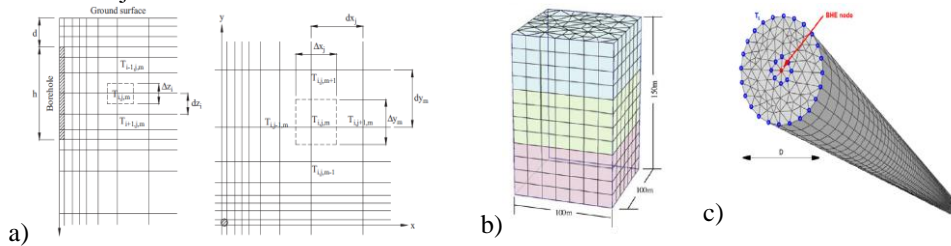
Al-Khoury és társai két U-csöves hőcserélőt modellezése során különválasztották magát a hőcserélőt, és a környező talajt[15]. A hőcserélőt Petrov-Garlekin módszer segítségével modellezték, négyzetes elemet használva az idő és lineáris elemet a térbeli súlyfüggvényekben. Így a hőcserélő egy vonalszerű hőforrásként értelmezhető a környező talajban lejátszódó folyamatok modellezése során. A talajban lejátszódó folyamatokat a FEFLOW program segítségével számították. Ezzel a módszerrel sikerült a cellaszámot 2200 körüli értéken tartani. A modelljük cellastruktúráját az *1. ábra* szemlélteti.

Ugyancsak a hőcserélő modellezését helyettesítették Diersch és társai[17,18] egy közelítő módszerrel. A talajban lejátszódó folyamatok modellezése során a hőcserélőt azonban nem vonalszerű, hanem hengeres hőforrásként modellezik, melynek hossza mentén is változik a hő leadása. A henger átmérője a szondát kitöltő anyag, a cső és az áramló közeg termikus jellemzőitől függ. A modell cellastruktúrája látható az *1. ábrán*. A cellák száma 10000. Ezt a modellt később továbbfejlesztették - egy a hőcserélő elemeinek hő kapacitását pontosabban figyelembe vevő - hőcserélő modellel[19], ekkor a cellák számát tovább tudták redukálni kb 4000-re.

3.2. Modellezés általános célú CFD szoftverrel: Az általános kódú CFD szoftverek használatával nincs szükség az időt rabló szoftverfejlesztésre. E helyett a CFD modellezés teljes eszközrendszerét alkalmazhatjuk, és az időnként teljes egészében a probléma megoldására fordíthatjuk. Természetesen ebben az esetben is alkalmazhatunk egyszerűsítő feltételeket a szimuláció gyorsítására. A végeredmény itt is attól függ, hogy mennyire sikerült a jelenség lényegét megfogni, és modellezni a rendelkezésre álló eszközrendszer segítségével.

Essen és társai[20] például az ANSYS általános CFD modellező csomagot használták a modelljük elkészítéséhez. A cellaszám minimálisan tartását úgy érték el, hogy csak két

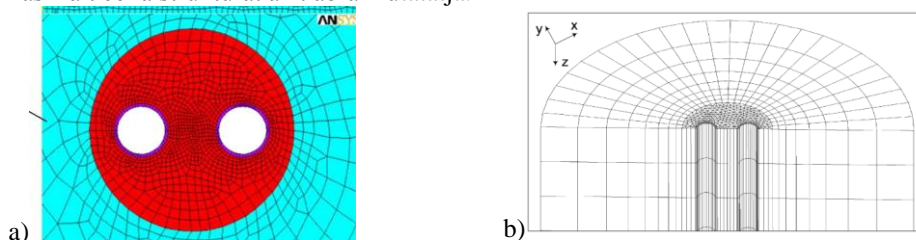
dimenziós hőtadást vizsgáltak a hőcserélő hossz tengelyére merőleges síkban. A hőcserélőben történő folyadék áramlást is figyelmen kívül hagyták egyszerű hőforrás és nyelőként modellezve a hőcserélő csőkeresztmetszeteit. Az alkalmazott cellastruktúrát a 2. ábra mutatja.



1. ábra Különböző cellastruktúrák: a) Lee[14] b) Al-Khoury[15] c) Diersch[17,18,19]

Zanchini[21] és társai végtelen hosszú, vonalszerű hőforrásként vették figyelembe a hőcserélőt a környezetében lejátszódó folyamatok szimulációja során. Vizsgálták azok időbeli lefolyását, valamint a hő terhelések periodikus változását. A szimulációk során figyelembe vették a talajvíz áramlásának a hatását is. A szimulációkat a COMSOL Multiphysics szimulációs csomag segítségével végezték. Mivel a hőcserélőt vonalszerű hőforrásként modellezték, a cellák számát kellően kis értéken tudták tartani, így vált lehetségessé a rendkívül hosszú üzemidők vizsgálata is.

Diersch és társai[17,18,19] elvégezték egy hőcserélő teljes körű, egyszerűsítések nélküli tranzien CFD modellezését. A cellaszám százezres nagyságrendű, s ennek megfelelően a futási idők is nagyon hosszúak voltak. A szimulációs eredményeket összevetették a mérési eredményekkel, és későbbi egyszerűsített modelljeik referenciájaként használták. A használt cella struktúrát a 2. ábra mutatja.



2. ábra Különböző cellastruktúrák: a) Essen[20] b) Diersch[17,18,19]

Összefoglalás

A cikkben röviden összefoglaltam a szakirodalomban a talajszondás hőszivattyúk modellezésével kapcsolatban bemutatott numerikus szimulációs módszereket. Mivel a numerikus szimulációk pontosságának egyik lényeges eleme az alkalmazott cella struktúra ezekre minden esetben utaltam. Az egyes szimulációs modellek között a legfontosabb különbség az egyszerűsítő feltételek alkalmazása a szimulációk során ezért ezeket is jeleztem minden modell esetén.

A szimulációkat el lehet végezni saját algoritmusok programozásával, vagy általános CFD programok segítségével. Az általános célú kereskedelmi CFD szoftverek alkalmazása

jelentősen lerövidítheti a modell kialakítására fordított időt. A kereskedelmi célú szoftverekkel is felépíthetők az egyéni algoritmusú modellekhez hasonlóan kis számítási igényű, és mégis kellően pontos szimulációs modellek.

Köszönetnyilvánítás

Az előadás a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Ingersoll LR, Adler FT, Plass HJ, Ingersoll AC.: Theory of earth heat exchangers for the heat pump. *ASHVE Trans* 1950;56:167–88.
- [2] Carslaw HS, Jaeger JC.: *Conduction of heat in solids*. Oxford: Clarendon Press; 1959.
- [3] Kavanaugh S.: A design method for commercial ground-coupled heat pumps. *ASHRAE Trans* 1995;101(2):1088–94.
- [4] Bernier MA.: Ground-coupled heat pump system simulation. *ASHRAE Trans* 2001;106(1):605–16.
- [5] Eskilson P, Claesson J.: Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes. *Numerical Heat Transfer* 1988;13:149–65.
- [5] Muraya NK.: Numerical modeling of the transient thermal interference of vertical U-tube heat exchangers. Doctoral thesis. USA: Texas A&M University; 1994.
- [6] Zeng HY, Diao NR, Fang ZH.: Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers. *Int J Heat Mass Transfer* 2003;46(23):4467–81.
- [7] Michopoulos A, Kyriakis N.: Predicting the fluid temperature at the exit of the vertical ground heat exchangers. *Appl Energy* 2009;86(10):2065–70.
- [8] Lee CK.: Effects of multiple ground layers on thermal response test analysis and ground-source heat pump simulation. *Appl Energy* 2011;88(12):4405–10.
- [9] Eskilson P.: Thermal analysis of heat extraction boreholes. Doctoral thesis. Sweden: Lund University; 1987.
- [10] Yavuzturk C.: Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems. Doctoral thesis. USA: Oklahoma State University; 1999.
- [11] Yavuzturk C, Spitler JD, Rees SJ.: A Transient two-dimensional finite volume model for the simulation of vertical U-tube ground heat exchangers. *ASHRAE Trans* 1999;105(2):465–74.
- [12] Cui P, Yang H, Fang Z.: Numerical analysis and experimental validation of heat transfer in ground heat exchangers in alternative operation modes. *Energy Build* 2008;40(6):1060–6.
- [13] Bauer D, Heidemann W, Diersch H-JG.: Transient 3D analysis of borehole heat exchanger modeling. *Geothermics* 2011;40(4):250–60.
- [14] Nam Y, Ooka R, Hwanga S.: Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system. *Energy Build* 2008;40(12):2133–40.
- [15] Lee C.K., Lam H.N.: Computer simulation of borehole ground heat exchangers for geothermal heat pump systems. *Renewable Energy* 33 (2008): 1286-1296.
- [16] Al-Khoury R, Kölbl T., Schramedei R.: Efficient numerical modeling of borehole heat exchanger. *Computers & Geosciences* 36 (2010):1301–1315
- [17,18] Diersch H.J.G., Bauer D, Heidemann W., Rühaak W., Schatzl P.: Finite element modeling of borehole heat exchanger systems Part 1. Part 2. *Computers & Geosciences* 37 (2011) : 1122–1135; 1136–1147
- [19] Bauer D, Heidemann W., Diersch H.J.G.: Transient 3D analysis of borehole heat exchanger modeling. *Geothermics* 40 (2011) : 250–260
- [20] Essen H., Inalli M., Esen Y.: Temperature distributions in boreholes of a vertical ground-coupled heat pump system. *Renewable Energy* 34 (2009) : 2672–2679
- [21] Zanchini E., Lazzari S., Priarone A.: Long-term performance of large borehole heat exchanger fields with unbalanced seasonal loads and groundwater flow. *Energy* 38 (2012) : 66-77