

IMPACTUL SISTEMELOR DE UTILIZARE A ENERGIEI GEOTERMALE DE MICĂ ADÂNCIME ASUPRA REGIMULUI TERMIC SUBTERAN

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul INGINERIE CIVILĂ
de către

ing. VIȘESCU MIRCEA

Conducător științific:
Referenți științifici:

prof. univ. dr. ing. DAVID IOAN
prof. univ. dr. ing. BICA IAON
prof. univ. dr. ing. BARTHA IOSIF
prof. univ. dr. ing. EUGEN TEODOR MAN

Ziua susținerii tezei: 29.09.2011.

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2011

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Facultății de Hidrotehnică, Catedra de Hidraulică Inginerie Sanitară și Gospodărirea Apelor, sub îndrumarea directă a domnului prof. univ. dr. ing. Ioan David și cu sprijinul colectivului Departamentului de Mineralogie și Geologie al Facultății de știință și tehnologie, Universitatea din Debrecen.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat prof. dr. ing. David Ioan, pentru răbdare și susținere pe tot parcursul realizării tezei.

Nu în ultimul rând doresc să mulțumesc familiei colegilor și prietenilor pentru tot sprijinul acordat.

Timișoara, septembrie 2011

ing. Vișescu Mircea

Vișescu Mircea

Impactul sistemelor de utilizare a energiei geotermale de mică adâncime asupra regimului termic subteran

Teze de doctorat ale UPT, Seria 5, Nr. 85, Editura Politehnica, 2011, 134 pagini, 70 figuri, 42 tabele.

ISSN: 1842-581x

ISBN: 978-606-554-362-1

Cuvinte cheie: modelare matematică, energie geotermică de suprafață, prognoza distribuției temperaturilor

Rezumat.

Deși creșterea producției de energie din resurse regenerabile din ultimii ani a fost impresionantă, cea mai mare parte din cererea de energie la nivel global, este îndeplinită de către combustibilii fosili.

În introducere s-a analizat stadiul actual al energiei geotermale în sistemul energetic, contextul național și internațional. Se prezintă strategia energetică națională și europeană care urmărește atingerea unor obiective pentru reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră și creșterea ponderii energiilor regenerabile.

Obiectivul principal urmărit în teza este analiza impactului utilizării sistemelor de exploatare a energiei geotermice de mică adâncime asupra regimului termic subteran, cu implicații asupra randamentului propriu și asupra mediului subteran prin scăderea/creșterea temperaturii pe mantaua schimbătoarelor de căldură, respectiv în vecinătatea acestora. De asemenea se cercetează potențialul energiei geotermice de mică adâncime din județul Timiș.

În continuare este prezentată energia geotermală/geotermică, tipuri de resurse geotermale unde s-au enumerat tehnologiile dezvoltate pentru a utiliza energia geotermală/geotermică. Se descriu sistemele de utilizare a geotermiei de mică adâncime. Pe lângă acestea se prezintă o comparație de costuri estimative ale implementării și funcționării sistemelor de utilizare a energiei geotermice cu cele convenționale.

Datele furnizate de profilele geotehnice ale unor foraje din județul Timiș au condus la identificarea principalilor parametri ai energiei geotermice, ceea ce a permis evaluarea potențialului energiei geotermice de mică adâncime din județul Timiș.

În urma efectuării unui stagiu de cercetare doctorală în Ungaria s-a determinat câmpul de temperaturi din vecinătatea schimbătoarelor de căldură și prognoza temperaturilor din subteran în urma realizării unui test de răspuns termic pe sistemul de utilizare a energiei geotermale de mică adâncime amplasat în zonă.

CUPRINS

I Introducere	7
1.1 Situația energetică mondială	7
1.2 Perspective	8
1.3 Strategia energetică națională și europeană	10
1.3.1 Contextul internațional	10
1.3.2 Contextul național	13
1.4 Locul și rolul energiei geotermale în sistemul energetic (național și european)	17
II Sisteme de utilizare a energiei geotermale de mică adâncime	19
2.1 Sursa de energie geotermală/geotermică	19
2.2 Tipuri de resurse geotermale	21
2.3 Sisteme de utilizare a energiei geotermale/geotermice	25
2.3.1 Tipuri de utilizări ale energiei geotermale/geotermice	25
2.3.1.1 Producerea de energie electrică	26
2.3.1.2 Folosințele directe ale energiei geotermale	27
2.3.1.3 Utilizarea energiei geotermice	28
2.3.2 Descrierea sistemelor de utilizare a energiei geotermice (de mică adâncime)	29
2.4 Aspecte economice	34
2.5 Impactul asupra mediului	38
2.6 Obiectivele cercetării doctorale	39
III Estimarea potențialului resurselor geotermale	41
3.1 Potențialul geotermal din Romania	41
3.2 Evaluarea potențialului energiei geotermale (de mare adâncime) din județul Timiș	44
3.2.1 Parametrii caracteristici	45
3.2.2 Estimarea potențialului energiei geotermale (de mare adâncime) din județul Timiș	47
3.3 Evaluarea potențialului energiei geotermice (de mică adâncime) din județul Timiș	49
3.3.1 Parametrii caracteristici	49
3.3.2 Estimarea potențialului energiei geotermice (de mică adâncime) din județul Timiș	53
IV Bazele modelării matematice, ecuații generale, formularea matematică a problemelor pentru câmpul temperaturilor în modelarea sistemelor geotermale	56
4.1 Parametrii caracteristici în cadrul proceselor de transfer de căldură în medii poroase	56
4.2 Procese de transfer de căldură în medii poroase	57
4.2.1 Conducția termică	58
4.2.2 Convecția termică	58

4.2.3 Dispersia termică	58
4.3 Ecuații de bază ale transferului de căldură în medii poroase	61
4.3.1 Derivarea ecuației generale a transferului de căldură	61
4.3.2 Forme particulare al ecuației generale	64
4.3.3 Ecuații simplificate, depinzând de importanța proceselor conductive/convective	65
4.3.4 Evaluarea dispersiei pentru probleme practice	66
V. Metode de rezolvare și soluții ale modelului matematic	69
5.1 Aspecte generale	69
5.2 Metoda analitică, soluții	70
5.3 Metoda numerică, soluții	82
5.4 Estimarea influenței mișcării apei subterane asupra puțului de extracție/injecție al unui sistem de utilizare a energiei geotermale de mică adâncime	86
VI Studiu de caz: modelarea matematică/numerică a câmpului geotermic pe stația pilot – Merkt, Debrecen.	92
6.1 Perimetrul zonei de amenajare a stației pilot	92
6.2 Parametrii caracteristici ai zonei de amplasarea a stației pilot	95
6.3 Modelarea analitică a temperaturii în funcție de spațiu și timp	98
6.3.1 Cazul pentru un ciclu de funcționare	98
6.3.1.1 Cazul I ($r = r_s$ - pe mantaua sondei)	98
6.3.1.2 Cazul II ($r = 2m$)	102
6.3.1.3 Cazul III ($r = 3m$)	106
6.3.1.4 Cazul IV ($r = 5m$)	110
6.3.2 Cazul pentru „n” cicluri de funcționare (prognoza scăderii temperaturii după „n” cicluri de funcționare)	113
6.4 Modelarea numerică (ASMWIN) a temperaturii în funcție de spațiu și timp	114
VII Concluzii generale	121
7.1 Conținutul tezei	121
7.2. Contribuții personale	123
7.3 Concluzii și recomandări	124
Bibliografie	125

CAPITOLUL I INTRODUCERE

1.1 Situația energetică mondială

Consumul de energie este strâns legat de anumiți parametri. Unul dintre acești parametri este populația. Populația globului este în continua creștere, îmbunătățirea standardului de viață, industrializarea, au influențat fără echivoc și consumul de energie. În anul 8000 î.e.n. populația este estimată a fi în jurul a 5 mil. de oameni. În urma examinărilor arheologice a rămășițelor se estimează, că în vremea lui Hristos, trăiau 250 mil persoane, iar până în anul 1650 e.n. s-a ajuns la 500 mil oameni. Consecință a revoluției industriale, culturale, medicale, timpul în care populația globului se dublează, se reduce de la aproximativ 1500 de ani la 45. În tabelul 1 avem prezentată în cifre, populația globului începând cu anul 8000 î. e. n. până în 2010 e. n.[44]

Tabel 1.1 Populația globală [44]

Anul	Populația globală estimată (în milioane)	Timpul aproximativ de dublare a populației (în ani)
8000 î. e. n.	5	1.500
1650 e. n.	500	200
1850 e. n.	1000	80
1930 e. n.	2000	45
1975 e. n.	4000	35
2010 e. n.	8000	35?

Ca un efect direct al creșterii populației este explozia consumului de energie, care a fost cel puțin la fel de dramatică ca și explozia numărului populației. Între 1980 – 2005 s-a înregistrat un salt de peste 50% în consumul de energiei globală, pe de-o parte datorită creșterii de 68% a populației, iar pe de altă parte, îmbunătățirea standardului de viață în țările dezvoltate și în curs de dezvoltare[44][101] [95].

Tabel 1.2. Populația globală, producția și consumul total de energie primara [101]

Ani	Populația (miliarde)	Producția totală (10 ⁹ tone cărbune echivalent)	Consumul total (10 ⁹ tone cărbune echivalent)	Consumul per capita (tone cărbune echivalent)
1980	4.45	10,34	10,19	2.292
1985	4.86	11,05	11,12	2.290
1990	5.30	12,59	12,51	2.367
1995	5.72	13,08	13,15	2.308
2000	6.12	14,19	14,31	2.350
2005	6.50	16,47	16,61	2.568

În tabelul 2 avem datele privind producția și consumul de energie globală și per individ, începând cu anul 1980 până în 2005. Se poate observa creșterea continua a

populației globului și în același timp o creștere a consumului de energiei totala. Conform Națiunilor Unite, varianta moderată, în anul 2015 populația globului va ajunge la 7,28 miliarde, iar în 2025 la 8 miliarde în ciuda prognozei de scădere a ratei de fertilitate. Creșterea prognozată a populație este atribuită în mare măsură țărilor cel mai puțin dezvoltate, și mai puțin țărilor în curs de dezvoltate. În aceste regiuni se așteaptă ca cererea de energiei să crească exponențial datorită creșterii economice, populației și a standardului de viață. Pe plan global consumul de energie este prognozat sa crească cu 57% până în 2025 [44] [101]

În situația de față, în care cererea de energie la nivel global este în continuă creștere, măsurile de contracarare a încălzirii globale se înăsprec, energia rezultată din resurse regenerabile a luat prim planul. De asemenea suportul guvernelor pentru energiile regenerabile a crescut în principal datorită eforturilor de reducere a emisiilor de CO₂ și a diversificării surselor de energie.

Aceste stimulente împreună cu prețurile ridicate a combustibililor fosili au convins mulți investitori să se îndrepte către energia regenerabilă. În efortul de a aborda efectul de seră a gazelor emise în urma arderilor combustibililor fosili și a diversificării surselor de energie tot mai multe guverne adoptă ținte și i-au măsuri pentru a mări ponderea energiilor regenerabile. Totodată prin intermediul regenerabilelor se creează noi locuri de muncă, un lucru extrem de important pentru readucere pe creștere economică a țărilor afectate de criza economică și nu numai. Energia primară totală furnizată din resurse regenerabile incluzând și biomasa, a crescut de la 1 319 milioane tone echivalent petrol (tep) în anul 2000 la 1 590 tep în 2008, însă ponderea în energia totală furnizată a rămas constantă la aproximativ 13%. Biomasa este de departe cea mai importantă sursă de energie regenerabilă. În anul 2008 consumul de biomasa era de 1 225 tep, din care cea mai mare parte era folosită în mod tradițional de 2,7 miliarde de oameni (marea majoritate din țările în curs de dezvoltare). O cantitate mult mai mică 478 tep, este folosită pentru producere de energie electrică și materie primă pentru producerea de combustibili pentru transport. Hidroenergia este pe locul al doilea ca și sursă de energie regenerabilă (276 tep) și pe locul întâi ca sursa regenerabilă pentru producerea de curent electric. Energia eoliană, geotermală și energia valurilor au crescut foarte rapid în ultimii ani dar contribuția lor totală la energia primară totală furnizată rămâne modestă. Producerea de energie electrică bazată pe resurse regenerabile a crescut cu o treime din 2000 până în 2008, hidroenergia având cea mai mare creștere (900 TWh). Alte forme de resurse regenerabile au crescut foarte rapid, în special energia eoliană, care a crescut de 7 ori, iar energia fotovoltaică de 16 ori. O creștere de 5 ori din 2000 până în 2008 a avuto și biocombustibili, folosiți aproape exclusiv în transportul rutier, asigurând aproape 3% din cerere. Biomasa și energia geotermală au crescut și ele deși într-un ritm moderat. În schimb creșterea utilizării resurselor regenerabile pentru producția de căldură a fost mult mai modestă. Acest fapt se datorează în mare măsură politicii guvernelor care sunt axate mai mult pe producția de electricitate și transport. [94][106]

1.2 Perspective

Deși creșterea producției de energie din resurse regenerabile, din ultimii ani, a fost impresionantă, cea mai mare parte din cererea de energie pe glob, este îndeplinită de către combustibilii fosili. În anul 2008, conform IEA, circa 19% din energia electrică produsă, la nivel global, din resurse regenerabile. În timp ce ponderea cărbunelui și a gazelor naturale creșteau cu 2 și 3,6 procente, între anii

2000 și 2008, cota energiei regenerabile a rămas aproximativ aceeași. Ca exemplu luăm transportul rutier, unde petrol are o cota de 50 de ori mai mare decât cea a biocombustibilului, iar pentru încălzire folosim de 10 ori mai mult combustibil fosil decât energie regenerabilă. Resursele regenerabile pot îndeplini amplu o mare proporție din cererea de energie, dar cu toate acestea, nu au costuri competitive și au nevoie de stimulente. Prin urmare, existența unor programe guvernamentale pentru a face energiile regenerabile atractive pentru investitori, creând astfel o piață pentru acestea, este cel mai important factor care afectează expansiunea energiilor regenerabile. Stimulentele sunt oferite deja în multe țări iar acest lucru se reflectă în rata de creștere a utilizării energiei regenerabile. Câteva țări au combinat suportul pentru energii regenerabile, cu cerința către furnizori, de a crește cota energiilor regenerabile în producția de energie electrică sau a combustibililor utilizați în transport. Politicile pentru înlesnirea integrării surselor de energie regenerabilă în rețele (cum ar fi energia eoliană) sunt de asemenea importante. Aceste politici pot varia de la o mai bună planificare a proiectelor de transport până la dezvoltarea rețelelor inteligente, crearea unor mecanisme de cerere și răspuns și promovarea tehnologiilor de înmagazinare. Strategia și suportul pentru dezvoltarea unor centrale hidroelectrice diferă dar nu sunt lipsite de importanță, ele având un costuri competitive aproape oriunde în lume. Însă noile aplicații necesită o abordare mai atentă la efectele adverse ale acestor construcții asupra mediului, incluzând reabilitarea populației care este strămutată ca rezultat a construcției barajelor și de asemenea adoptarea unor practici de gospodărire a apelor. Tehnologiile prin care putem utiliza energiile regenerabile au costuri de capital foarte mari necesitând investiții semnificative în avans, iar majoritatea acestora nu pot concura la preț cu tehnologiile convenționale. Astfel reducerea costului este esențială pentru dezvoltarea la scară mare a energiilor regenerabile. Desigur prețurile au scăzut pentru multe din energiile regenerabile, dar scopul este de a le reduce și mai mult deoarece prețurile combustibililor fosili vor crește în perioada următoare datorită scăderii resurselor subterane ale Pământului și a cererii ridicate pentru energie. Un alt potențial obstacol sau rampă de lansare pot fi băncile. Datorită capitalului mare care trebuie investit în aceste tehnologii, multe proiecte depind de împrumuturi. Politicile băncilor de a stimula aceste proiecte va influența dezvoltarea tehnologiilor de producție a energiilor regenerabile. [106]

Conform Strategia energetică a României [106] producția de energie electrică globală din resurse regenerabile va crește de la 3800 TWh la 11200 TWh, iar cota în generarea totală de energie electrică crește de la 19% la 32% în 2035. Utilizarea regenerabilelor în generarea de căldură crește și aceasta de la o pondere de 10% în 2008 la 16% în 2035. Scenariul de creștere a utilizării energiilor regenerabile pe sectoare și regiuni este prezentat mai jos în tabelul 1.3

Tabel 1.3. Scenariu actual și viitor al ponderii energiilor regenerabile în producția de energie electrică, căldură și combustibili [106]

Regiune/Sector	Electricitate		Căldură		Biocombustibili			
	2008	2035	2008	2035	Transport rutier		Aviație	
					2008	2035	2008	2035
OECD	17%	33%	11%	23%	3%	12%	0%	3%
Europa	21%	44%	12%	25%	3%	12%	0%	0%
Statele Unite	9%	25%	10%	25%	4%	15%	0%	4%
Japonia	10%	19%	3%	7%	0%	1%	0%	4%
Australia/ Noua Zeelandă	15%	31%	18%	41%	0%	2%	0%	0%

Non OECD	21%	31%	9%	12%	2%	6%	0%	0%
China	17%	27%	1%	5%	1%	4%	0%	0%
India	16%	26%	24%	19%	0%	16%	n.a.	n.a.
Altele Asia	16%	31%	11%	15%	1%	4%	0%	0%
Brazilia	84%	75%	47%	50%	21%	41%	0%	3%
Altele America Latină	52%	65%	13%	15%	0%	5%	0%	0%
Rusia	16%	28%	5%	5%	0%	2%	0%	0%
Orientul Mijlociu	1%	16%	1%	3%	0%	0%	0%	0%
Africa	16%	39%	31%	37%	0%	2%	0%	0%
Global	19%	32%	10%	16%	3%	8%	0%	1%
Uniunea Europeană	17%	41%	13%	26%	3%	14%	0%	0%

Unde OECD reprezintă țările afiliate la Organizația pentru Cooperare Economică și Dezvoltare.

Geotermia de suprafață oferă un potențial de dezvoltare mare. Pentru aceasta este nevoie de colaborarea inter-disciplinară a specialiștilor din domeniul ingineriei construcțiilor și a geologilor, precum și din domeniul echipării tehnice a clădirilor. Este de asemenea necesar o cercetare amplă și creșterea siguranței măsurătorilor. O importanță deosebită o are aici, cercetarea conductivității termice și a dependenței anizotropice a acesteia, precum și testările în laborator cât și cele de sondare. Analog, conform regulilor de măsurare cunoscute din inginerie, ar trebui introduse reguli unitare pentru lucrările geotermale. [83]

1.3 Strategia energetică națională și europeană

1.3.1 Contextul internațional

În conformitate cu Noua Politică Energetică a Uniunii Europene (UE) elaborată în anul 2007, energia este un element esențial al dezvoltării la nivelul Uniunii Europene. Dar în aceeași măsură este o provocare în ceea ce privește impactul sectorului energetic asupra schimbărilor climatice, a creșterii dependenței de importul de resurse energetice precum și a creșterii prețului energiei. Pentru depășirea acestor provocări, Comisia Europeană (CE) considera absolut necesar ca UE să promoveze o politică energetică comună, bazată pe securitate energetică, dezvoltare durabilă și competitivitate. În ceea ce privește securitatea alimentării cu resurse energetice, UE se așteaptă ca dependența de importul de gaze naturale să crească de la 57% la ora actuală, la 84% în anul 2030 iar pentru petrol, de la 82% la 93% pentru aceeași perioadă.

În ceea ce privește dezvoltarea durabilă, trebuie remarcat faptul că în anul 2007 sectorul energetic este, la nivelul UE, unul din principalii producători de gaze cu efect de seră.

În cazul neluării unor măsuri drastice la nivelul UE, în ritmul actual de evoluție a consumului de energie și la tehnologiile existente în anul 2007, emisiile de gaze cu efect de seră vor crește la nivelul UE cu circa 5% și la nivel global cu circa 55% până în anul 2030. Energia nucleară reprezintă în acest moment în Europa una dintre cele mai mari surse de energie fără emisii de CO₂. Centralele nucleare asigură în anul 2007 o treime din producția de electricitate din Uniunea Europeană, având astfel o contribuție reală la dezvoltarea durabilă.

În ceea ce privește competitivitatea, piața internă de energie a UE asigură stabilirea unor prețuri corecte și competitive la energie, stimulează economisirea de energie și atrage investiții în sector.

Comisia Europeană propune în setul de documente care reprezintă Noua Politică Energetică a UE următoarele obiective:

- reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră cu 20% până în anul 2020, în comparație cu cele din anul 1990.
- creșterea ponderii surselor regenerabile de energie în totalul mixului energetic de la mai puțin de 7% în anul 2006, la 20% din totalul consumului de energie al UE până în 2020; creșterea ponderii biocombustibililor la cel puțin 10% din totalul conținutului energetic al combustibililor utilizați în transport în anul 2020;
- reducerea consumului global de energie primară cu 20% până în anul 2020.

Tabel 1.4 Surse și tehnologii disponibile pentru producția de energie electrică [105]

Surse de energie	Tehnologia luată în considerare pentru estimarea costurilor	Dependența de importuri a UE-27		Sensibilitatea la prețul Combustibilului	Rezerve
		2005	2030		
Gaze naturale	Turbină cu gaze în circuit deschis	57%	84%	Foarte mare	64 ani
	Turbină cu gaze cu ciclu combinat			Foarte mare	
Petrol	Motoare diesel	82%	93%	Foarte mare	42 ani
Cărbune	Combustibil pulverizat cu desulfurizarea gazelor de evacuare	39%	59%	medie	155 ani
	Ardere în strat fluidizat circulat			medie	
	Gazificare integrată într-un ciclu combinat			medie	
Nucleară	Reactor cu apă ușoară	Aproape 100% pentru minereuri de uraniu		scăzută	85 ani
Biomasă	Instalație de generare cu biomasă	zero		medie	Regenerabile
Eoliană	Pe uscat			zero	
	În larg				
Hidro	Mare			zero	

12 Introducere - I

	Mică (<100MW)			
Solară	Fotovoltaic			

Evaluarea CE realizată în 2007 privind progresele făcute în dezvoltarea SRE a ajuns la următoarele concluzii:

- La nivel comunitar, s-a stabilit ca, până în 2010, un procent de 21% energie electrică produsă în statele membre UE să provină din surse regenerabile de energie. Acest obiectiv a fost prevăzut de Directiva nr. 2001/77/EC privind promovarea energiei electrice produse din surse regenerabile de energie, care stabilește obiective naționale diferențiate. Având în vedere politicile actuale și eforturile realizate, se așteaptă atingerea unei ponderi de 19% până în anul 2010. În acest context, UE, după toate probabilitățile, își va atinge obiectivele privind energia regenerabilă stabilite pentru anul 2010.
- Hidrocentralele de mică și mare capacitate reprezintă încă cea mai importantă sursă de producere de energie electrică din surse regenerabile, contribuind cu 10% la consumul total de energie electrică în anul 2005.
- UE rămâne liderul mondial în ceea ce privește energia eoliană, deținând 60% din producția mondială de energie electrică din această sursă. Din anul 2000 până în anul 2007, capacitatea de producere a energiei electrice din sursă eoliană a crescut cu mai mult de 150% în UE.
- Energia din biomasă constituie 2% din consumul total de energie electrică al UE. Producția totală de biomasa a crescut cu 18% în 2002, 13% în 2003, 19% în 2004 și 23% în 2005.
- Puterea fotovoltaică totală instalată în UE a înregistrat o continuă creștere în ultimii cinci ani, cu o rată de creștere anuală medie de 70%.
- În privința progreselor înregistrate de Statele - Membre (UE 25) în utilizarea surselor regenerabile de energie, 9 State-Membre au înregistrat progrese semnificative în domeniu iar 11 State-Membre nu au realizat țintele propuse.
- aplicațiile solar-termice progresează. Noile reglementări pentru clădiri au adus un plus de interes în privința utilizării acestor surse.
- utilizarea energiei geotermale și cea bazată pe biogaz se dezvoltă lent. [105]

Cu excepția centralelor hidroelectrice mari, costurile de producere a energiei electrice în unități ce utilizează surse regenerabile sunt în prezent superioare celor aferente utilizării combustibililor fosili, conform Comunicării Comisiei Europene privind promovarea surselor regenerabile de energie, publicată în decembrie 2005. [105]

Stimularea utilizării acestor surse și atragerea investițiilor în unități energetice ce utilizează surse regenerabile se realizează prin mecanisme de susținere, în conformitate cu practica europeană.

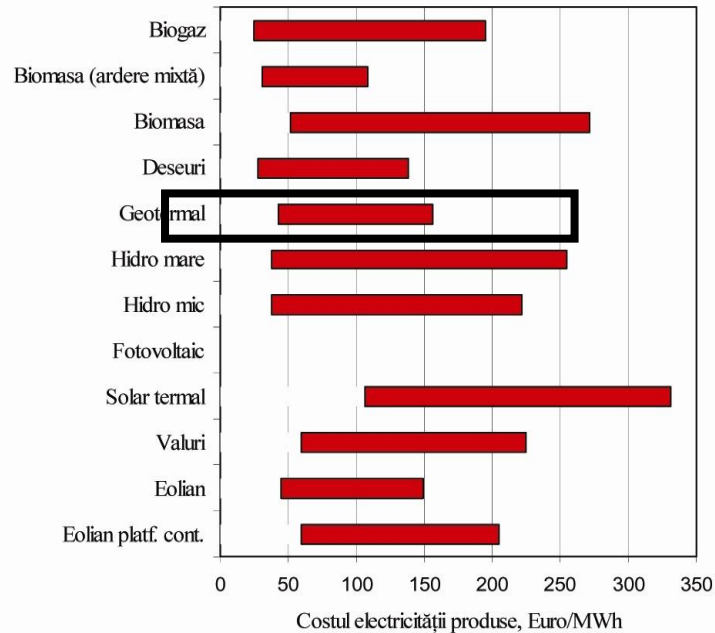


Fig. 1.1 Costurile de producție a energiei electrice din SRE (UE 2007)
(Premise: 6,5% rata dobânzii, 15 ani perioada de recuperare) [105]

1.3.2 Contextul național

Intr-o economie din ce în ce mai globalizată, strategia energetică a unei țări se realizează în contextul evoluțiilor și schimbărilor care au loc pe plan mondial.

Conform reglementărilor de la nivelul Uniunii Europene, România a fost nevoită să contribuie la atingerea țintelor stabilite de către Comisia Europeană din domeniul energiilor regenerabile. Astfel a fost concepută Strategia energetică a României care este conformă direcțiilor politice stabilite la nivelul Uniunii Europene și contribuie la atingerea țintelor stabilite de Comisia Europeană pentru ansamblul statelor comunitare. Strategia energetică pentru valorificarea potențialului resurselor regenerabile geotermale reprezintă un pas important pentru dezvoltarea energetică a României pe termen mediu și lung oferind cadrul adecvat pentru adoptarea celor mai bune decizii și respectarea măsurilor convenite cu Uniunea Europeană.[104]

Obiective strategice, în concordanta cu cele ale Uniunii Europene sunt:

- siguranța energetică prin asigurarea necesarului de resurse energetice și limitarea dependentei de import, diversificarea surselor de import și a rutelor de transport ale acestora, creșterea nivelului de adecvanță a rețelelor naționale de transport a energie electrice, gazelor naturale și petrol.
- dezvoltare durabilă prin creșterea eficienței energetice pe întregul lanț: resurse naturale - producție - transport - distribuție - utilizare finală (reducerea cu 3% pe an a intensității energetice pe economie), promovarea producerii energiei pe bază de resurse regenerabile (SRE),

reducerea impactului negativ al sectorului energetic asupra mediului utilizarea rațională și eficientă a resurselor energetice primare. competitivitate prin dezvoltarea piețelor concurențiale de energie electrică, gaze naturale, certificate verzi, liberalizarea tranzitului de energie, dezvoltarea interconexiunilor internaționale, continuarea procesului de restructurare și privatizare în sectoarele energiei electrice, termice și gazelor naturale

- reducerea emisiilor cu efect de seră cu 20% până în anul 2020, în comparație cu cele din 1990
- creșterea ponderii energiilor regenerabile de la mai puțin de 7% în anul 2006, la 20% din totalul surselor de energie până în anul 2020
- creșterea ponderii biocombustibililor în transporturi la 5,75% și la cel puțin 10% din totalul combustibililor utilizați în anul 2020
- reducerea consumului global de energie primară cu 20% până în anul 2020.

Îmbunătățirea eficienței energetice reprezintă unul din cele mai importante obiective strategice pentru România. Sectorul energetic reprezintă o sursă de poluare importantă, ca urmare a extracției, prelucrării și arderii combustibililor fosili. În anul 2005, din arderea combustibilului pentru producerea de energie au rezultat circa 88% din emisiile totale la nivel național de NO_x, 90% din cele de SO₂ și 72% din cantitatea de pulberi în suspensie evacuate în atmosferă.

Resursele interne de energie primară sunt limitate, pe fondul unui declin al producției interne și în condițiile în care nu au mai fost identificate noi resurse cu potențial important.

Tabel 1.5 Resurselor interne de energie primară epuizabilă [105]

Resurse purtătoare de energie primară	Rezerve						Producție anuală estimată Mil. tone	Perioada estimată de asigurare		
	Rezerve		Exploatabile concesionate		În perimetre noi			Rezerve geologice	Rezerve Exploatabile Concesionate	În perimetre noi
	99	Mil. tep		Mil. tep		Mil. tep		Ani	Ani	Ani
1	2	3	4	5	6	7	8	9=2/8	10=4/8	11=6/8
Cărbune										
Huilă	755	422	105	38.8			3.3	229	32	
Lignit	1490	276	445	82.4	1045	133	32	47	14	33
Țiței	74	72					5.2	14		
Gaz natural (Mld.mc)	185	159					12.5	15		
Uraniu								Pana în 2017		

Evoluția rezervelor naționale de țiței și gaze naturale este în scădere continuă. În tabelul 1.6. este prezentată estimarea evoluției rezervelor naționale de țiței și gaze naturale în perioada 2006 – 2020. Sunt luate în considerare exclusiv rezervele cunoscute și economic a fi valorificate utilizând tehnologiile actuale. Este de așteptat ca identificarea de noi zăcăminte și dezvoltarea tehnologică să se manifeste în timp în sensul creșterii valorilor din tabel.

Premise avute în vedere în cadrul estimării:

- Datorită epuizării zăcămintelor, producția de țiței poate înregistra scăderi anuale de 2-4%. Gradul de înlocuire a rezervelor exploatare nu va depăși 15-20%.
- Datorită epuizării zăcămintelor, producția de gaze poate înregistra scăderi anuale de 2-5%. Gradul de înlocuire a rezervelor exploatare se va situa între 15-30%. [105]

Tabel 1.6 Evoluția rezervelor naționale de țiței și gaze naturale -[105]

EVOLUȚIA REZERVELOR NAȚIONALE DE ȚIȚEI ȘI GAZE NATURALE		
Anul	Țiței (Milioane Tone)	Gaze Naturale (Miliarde Metri Cubi)
2006	80	170
2007	76	162
2008	72	155
2009	68	148
2010	64	141
2011	60	134
2012	56	127
2013	52	120
2014	48	114
2015	45	107
2016	41	101
2017	38	95
2018	34	89
2019	31	83
2020	28	77

Potențialul teoretic al Surselor Regenerabile de Energie – SRE din România este prezentat în tabelul 1.7. Potențialul utilizabil al acestor surse este mult mai mic, datorită limitărilor tehnologice, eficienței economice și a restricțiilor de mediu.

Tabel 1.7 Potențialul național al surselor regenerabile [104]

Sursa	Potențial anual	Aplicație
Energie solară	60 PJ 1,2 TWh	Energie termică Energie electrică
Energie eoliană (potențial teoretic)	23 TWh	Energie electrică
Energie hidro din care sub 10 MW	36 TWh 3,6 TWh	Energie electrică
Biomasa și biogaz	318 PJ	Energie termică Energie electrică
Energie geotermală	7 PJ	Energie termică

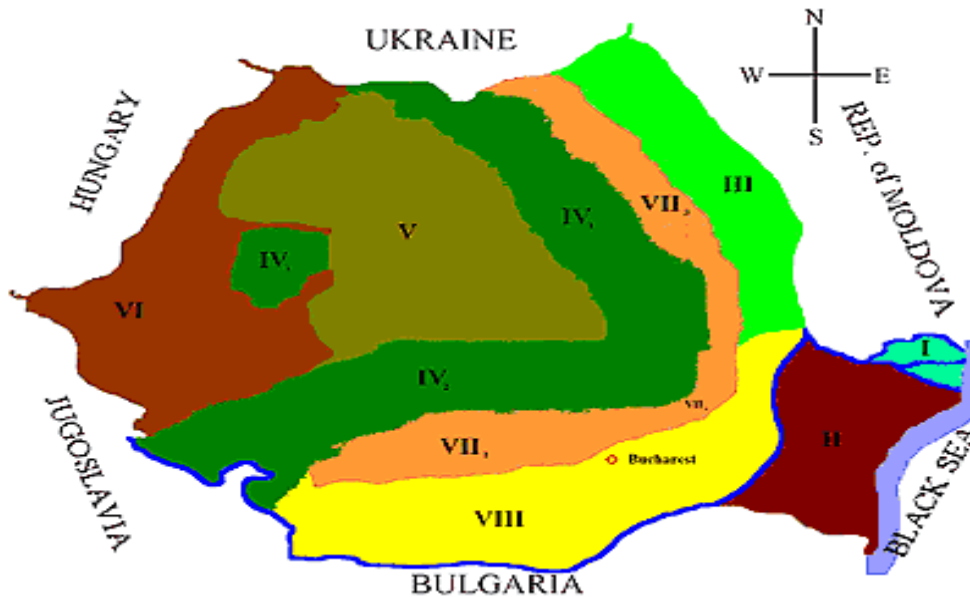


Figura 1.2 Harta resurselor regenerabile disponibile pe regiuni[105]

Legenda:

- I. Delta Dunării (energie solară-S);
- II. Dobrogea (energie solară-S și eoliană-E);
- III. Moldova (câmpie și podiș – microhidro-H, energie eoliană-E și biomasă-B);
- IV. Munții Carpați (biomasă-B, microhidro-H);
- V. Podișul Transilvaniei (microhidro-H);
- VI. Câmpia de Vest (energie geotermală);
- VII. Subcarpații (biomasă-B, microhidro-H);
- VIII. Câmpia de Sud (biomasă-B, energie geotermală-GT și solară-E).

1.4 Locul și rolul energiei geotermale în sistemul energetic

Energia termică a Pământului este imensă, dar numai o fracțiune poate fi utilizată de om. Până acum utilizarea acestui tip de energie regenerabilă a fost limitată în zone unde condițiile geologice permit un purtător (apa în formă lichidă sau gazoasă) care transferă căldura din adâncime spre suprafață.

Producția de energie electrică provenită din resurse geotermale a avut un start modest în 1904 la Larderello, un oraș din regiunea Toscana din Italia. La acel moment se produceau 10kW. Acum, această formă de energie regenerabilă ajunge 8771 MW în 21 de țări și o producție estimată la 54793 GWh/an. Această producție de electricitate deservește ~60 de milioane de persoane în întreaga lume. Dezvoltarea globală a producției de energie electrică din energiile geotermale poate fi urmărită în figura 1.3. [61][63]

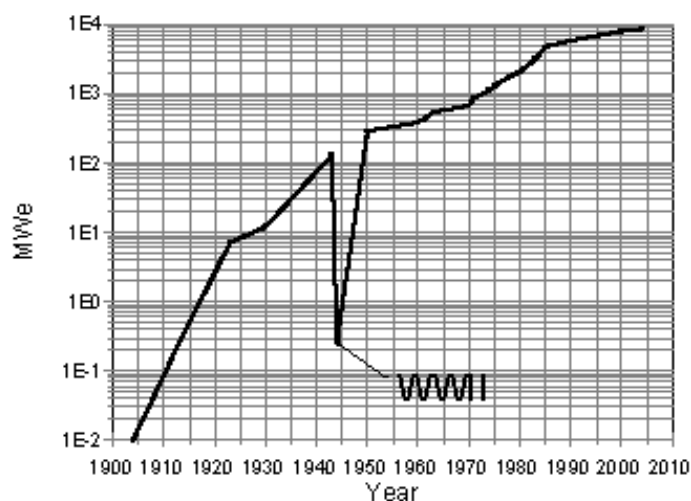


Fig. 1.3 Producția de electricitate globală din 1904- 2006 [61]

În SUA, manifestațiile geotermale de la suprafața câmpului geotermal „The Geysers” din nordul Californiei au fost folosite de indieni pentru gătire și băi. La mijlocul anilor 1880 coloniștii europeni au descoperit zona transformând-o mai apoi în zona turistică. La începutul anilor 1920 resursa a fost luată în considerare pentru producere de energie electrică. Mai târziu, în 1930 prima centrala geotermală a fost construită având 35kW.

În Japonia în 1925 și 1926 centrale experimentale au fost construite în Beppu și Otake, situate în sudul insului Kyushu. Însă testele nu au dat roade. Prima centrală comercială a fost pornită în 1966 la Honshu, având 23MW. În momentul de față Japonia are 535MW putere instalată din energie geotermală distribuită pe 14 câmpuri producând 3470GWh/an. [61] După al doilea război mondial multe țări au fost atrase de energia geotermală, considerând a fi competitivă din punct de vedere economic. Nu trebuia să fie importată și în unele cazuri era singura sursă de energie disponibilă. Țările care utilizează energia geotermală pentru generarea de energie electrică raportau în 1995 o capacitate instalată de energie electrică din geotermal

de 6833 MW_e. În anul 2000 s-a ajuns la 7927MW_e, iar mai apoi ajungând până în anul 2003 la 8402 MW_e.

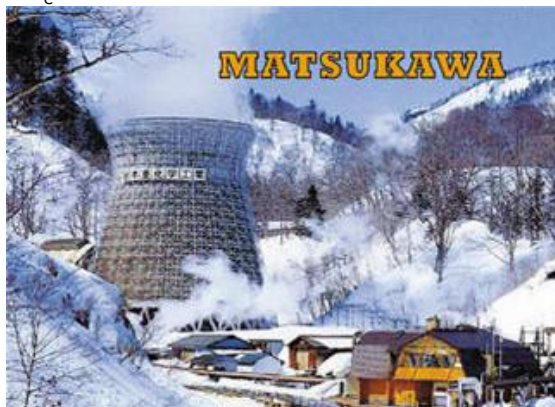


Fig 1.4 Prima centrală electrică geotermală din Japonia [61]

Puterea instalată în țările în curs de dezvoltare, din energie geotermală, reprezenta în 1995, 38% și 47% în anul 2000 din totalul de energie instalată global. În unele țări energia electrică produsă din energie geotermală ocupă un rol important în echilibrul energetic. Astfel în țări precum Filipinele, Kenya, Costa Rica, El Salvador, energia electrică produsă din geotermal reprezintă 27%, 12,4%, 11,4% și respectiv 4,3% din totalul de energie electrică produsă național.

În ceea ce privește aplicațiile directe capacitatea globală instalată este de 15 145 MW_e, iar utilizarea de energie este de 190 699 TJ/an (pentru anul 2000). În anul 2000, 58 de țări au raportat utilizarea directă a energiei geotermale, față de 28 în anul 1995. Cele mai comune utilizări directe ale energiei geotermale este prin intermediul pompelor de căldură (34,8%), băilor termale (26,2%), încălzirea clădirilor (21,62%), sere (8,22%) și procese industriale (3,13%). [63]

În România, explorarea resurselor geotermale a început la începutul anilor 1960, dezvoltându-se dintr-un program de cercetare de hidrocarburi, care a adus beneficii neașteptate, identificând opt zone promițătoare geotermale. În cadrul acestor zone, peste 200 de fântâni au fost forate la adâncimi între 800 și 3.500 de metri, arătând prezența unor resurse geotermale de entalpie scăzută (40-120 C). Finalizarea și exploatarea a peste 100 de foraje în ultimii 25 de ani au condus la evaluarea energiei termice ce poate fi exploatată Rezervele geotermale dovedite din România sunt de aproximativ 200000 TJ pentru 20 de ani.

România, ca și alte țări din Europa Centrală și de Est au resurse geotermale de entalpie scăzută. Aceste resurse fiind convenabile pentru a fi folosite direct la încălzirea spațiilor, apă caldă menajeră, piscicultură, piscine, etc. Dezvoltarea utilizărilor directe ale energiei geotermale a fost împiedicată de tranziția către economia de piață, mai mult de atât, accesul restricționat la ultimele tehnologii în domeniu, a încetinit dezvoltarea resurselor geotermale mai mult decât se aștepta, având în vedere resursele substanțiale derivând din utilizarea geotermiei. Astfel producția curentă din energia geotermală este mult sub potențialul demonstrat al țării. În prezent, cu excepția hidroenergiei, toate celelalte resurse regenerabile au contribuții minore la producția de energie a țării. Principala sursă de energie rămânând combustibilii fosili. [75].

CAPITOLUL II – SISTEME DE UTILIZARE A ENERGIEI GEOTERMALE DE MICĂ ADÂNCIME

2.1 Sursa de energie geotermală/geotermică

Pământul este cea mai mare planetă format din roci din sistemul nostru solar. Celelalte planete sunt mai mici sau sunt formate, ca de exemplu Jupiter, din gaze care se află într-o stare foarte comprimată.

Pământul s-a format cu aproximativ 4,6 miliarde de ani în urmă. În primii circa 100 de milioane de ani din istoria pământului acesta a fost încălzit până la topirea totală de către energia cinetică a meteoriților care au lovit pământul și de producerea de căldură din descompunerea radioactivă. Ca o urmare a gravitației metalele grele (în principal fier și nichel) s-au depus în interiorul globului, pe când componentele ușoare (cum ar fi silicații) s-au atașat la suprafață. [60]

În Fig. 2.1 avem detaliat structura subterană a Pământului unde putem deosebi:

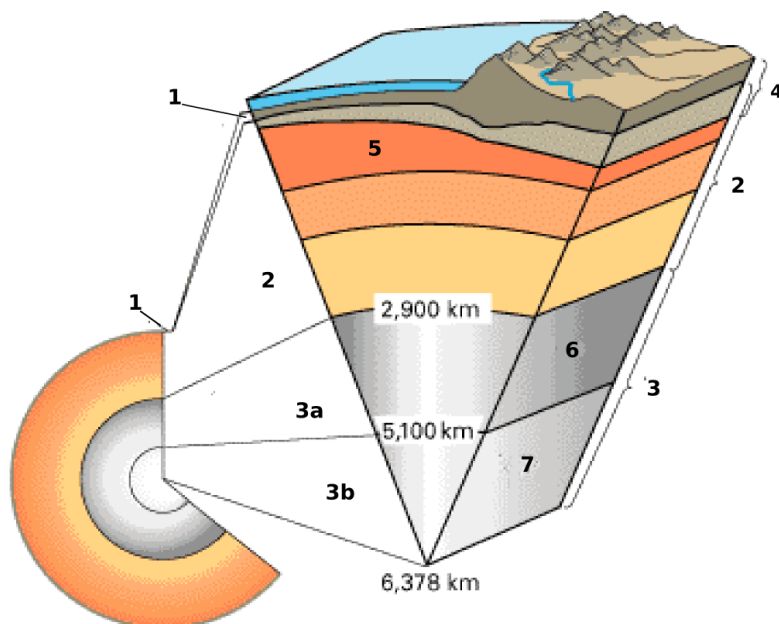


Fig. 2.1 Zonele principale ale subsolului Pământului [91]

- 1 – Crusta (oceanică și continentală 0 – 80 km)
- 2 – Mantaua (mantaua superioară, incluzând astenosfera, mantaua inferioară)
- 3 – Nucleul (3a – nucleul exterior, 3b – nucleul interior)
- 4 – Litosfera (crusta și mantaua superioară solidificată)
- 5 – Astenosfera

6 – Nucleul exterior lichid

7 Nucleul interior lichid

Astfel cu cât adâncimea este mai mare cu atât mai ridicată este temperatura, căldura fiind transferată din interior către exterior, în cea mai mare parte prin procesul de conducție.

În figura 2.2 avem prezentată variația aproximativă a temperaturii în interiorul Pământului.

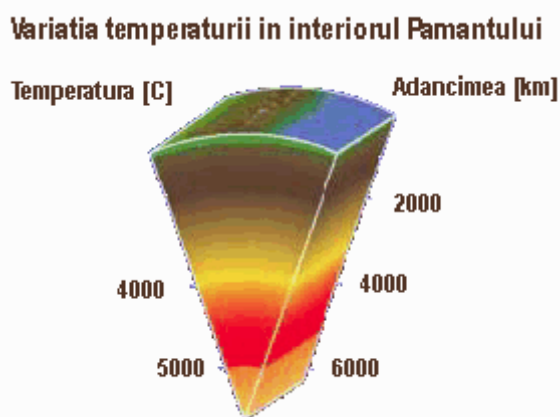


Fig.2.2 Variația temperaturii dinspre scoarță spre suprafață [66]

Remarcăm faptul ca 99% din interiorul Pământului se găsește la o temperatură de peste 1000°C, iar 99% din restul de 1%, se găsește la o temperatură de peste 100°C.

Aceste elemente sugerează că subteranul Pământului reprezintă o sursă regenerabilă de căldură, care merită toată atenția și care trebuie exploatată într-o măsură cât mai mare. [66]

Putem astfel afirma că energia termică poate fi găsită în regiuni cu gradient geotermal normal sau puțin peste normal, mai ales în zonele din jurul plăcilor tectonice și zonele vulcanic active. Dar ce este energia geotermală și gradientul geotermal?

Energia geotermală este căldura conținută în interiorul Pământului. [63]

Gradientul geotermal exprimă creșterea temperaturii cu adâncimea în crusta Pământului. La adâncimea accesibilă prin forare (ex. 10 000 m) gradientul geotermal mediu este de aproximativ de 2,5 – 3°C/100m. De exemplu, dacă temperatura din primii metri din subteran corespunde cu temperatura medie anuală a aerului (ex. 15°C) atunci putem asuma că temperatura la 2000 m, va fi de ~65°–75°C, 90°-105°C la 3000 m și așa mai departe pentru câțiva mii de metri. Există însă zone unde gradientul geotermal nu corespunde cu valoarea medie, zone unde gradientul geotermal poate ajunge și mai jos de 1°C din cauza sedimentelor „tinere”. Desigur există și zone unde gradientul geotermal este de 10 ori mai mare decât valoarea medie. Diferența de temperatură dintre zonele adânci calde și zonele de suprafață reci generează un transfer de căldură conductiv dinspre zona caldă spre cea rece, cu o tendință de creare a unor condiții uniforme, deși nu se atinge această situație. [63]

2.2 Tipuri de resurse geotermale

Criteriul de clasificare a resurselor geotermale, cel mai des întâlnit, este bazat pe entalpie. Această entalpie poate fi considerată proporțională cu temperatura și exprima cantitatea de căldură conținută în fluide. Resursele geotermale mai pot fi clasificate și după tipul de resursă. În tabelul 2.1 sunt enumerate tipuri de resurse geotermale existente în sol și gama de temperaturi la care le găsim (modelate de White și Williams (1975)) [63][93]

Tabel 2.1 Tipuri de resurse geotermale [93]

Tipul de resursă	Gama de temperatură (°C)
Resurse convective hidrotermale	
dominate de vapori	~240°
dominate de ape calde	20° – 350°+
Alte resurse hidrotermale	
bazine sedimentare	20° – 150 °
geopresurizate	90° – 200 °
descompuneri radioactive	30° – 150°
Resurse din roci fierbinți	
solidificate (roci fierbinți uscate) (HDR)	90° – 650°
magma	>600°

În general resursele peste 150°C (considerate cu entalpie ridicată) sunt utilizate pentru generarea de curent electric, deși recent în Alaska s-a folosit o resursă de 74°C pentru a genera electricitate. Resursele sub 150°C (considerate cu entalpie scăzută) sunt folosite de obicei pentru utilizare directă, la încălzire și răcire. Temperaturi cu variație între 5° – 30°C sunt folosite de către *sistemele de utilizare a geotermiei de mică adâncime* pentru încălzire și răcire a imobilelor.

Resursele convective hidrotermale apar unde avem transfer de căldură convectiv. Căldura Pământului este transportată în sus prin transferul convectiv al apei fierbinți sau al aburilor. Pentru a sublinia temperaturile înalte ale acestor resurse dăm un exemplu în care avem pătrunderi ale magmei în roci recent solidificate, temperaturile sunt de 500° – 1000°C. Temperaturile mai scăzute sunt rezultatul circulației apelor subterane de mare adâncime de-a lungul fisurilor din roci.

Resursele dominate de ape calde (abur umed) sunt produse ale mișcării apelor subterane care au circulat la adâncimi, care mai apoi urcă în rezervoare permeabile care au o temperatură uniformă în volume mari. Manifestațiile de la suprafață sunt de regulă izvoare geotermale, gheizere, roci chimic alterate. În unele cazuri nu sunt manifestații la suprafață (sunt denumite resursă oarbă).

Resursele dominate de vapori (aburi uscați) sunt produse ale apelor saline subterane care fierb în roci cu permeabilitate scăzută. Aceste rezervoare sunt exploatate pentru a produce energie electrică (ex. The Geysers în nordul Californiei, Larderello în Italia, Matsukawa în Japonia). [93]

Resursele geopresurizate apar la adâncimi mari unde energia termică a fluidului conținut în roci poroase este mărită de presiunea litostatică mare, datorită adâncimii. Aceste resurse nu atractive din punct de vedere economic. [74]

Resursele din roci fierbinți sunt definite a fi căldura înmagazinată în roci aflat la ~10km adâncime din care nu se poate extrage economic energia termică prin apă caldă naturală sau aburi. Aceste roci nu prezintă puține fracturi s-u pori prin care poate intra apa. Pentru a se extrage această energie s-a folosit

presiunea hidraulică pentru a fractura aceste roci, iar prin intermediul unui puț s-a introdus apă rece, iar prin alt foraj se extrage apa caldă. [93]

Primul proiect de extragere a energiei din roci fierbinți (hot dry rock – HDR) s-a desfășurat în SUA, la Los Alamos, unde apă sub presiune înaltă a fost pompată printr-un puț special forat într-o zonă cu roci compacte, fierbinți cauzând *fracturi hidraulice*. Apa pătrunde în aceste fisuri artificiale preluând căldura din rocile din jur comportându-se ca un rezervor natural geotermal. Un al doilea puț este forat pentru a extrage apa încălzită.

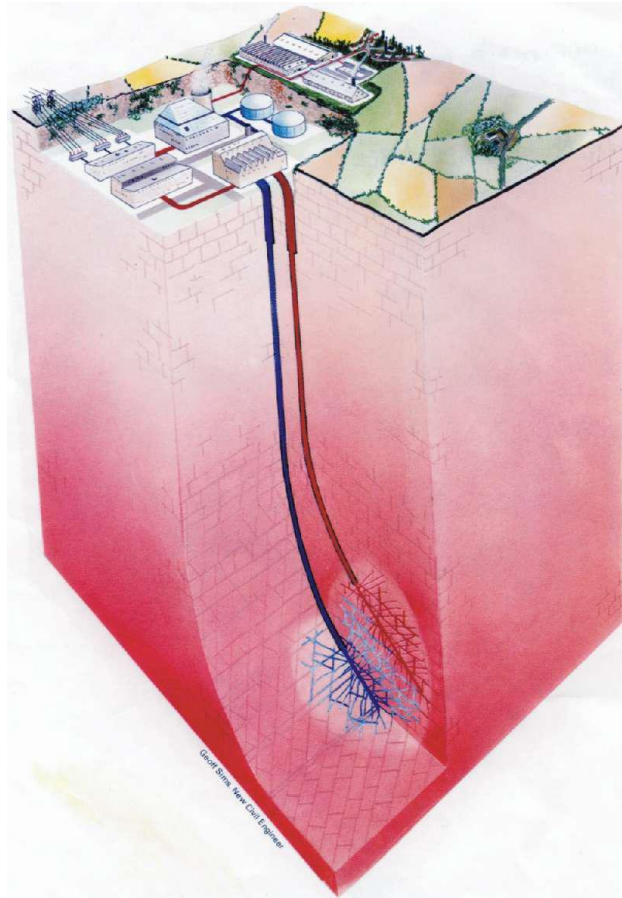


Fig. 2.3 Schema unui sistem de utilizare a resurselor geotermale din roci fierbinți [63]

Marea majoritate a resurselor geotermale sunt localizate în zonele de contact dintre plăcile tectonice. Resursele geotermale cu entalpie ridicată sunt regăsite în regiunile tectonice și vulcanice active din spatele munților de încrețire formați în urma ciocnirilor dintre plăcile tectonice. În aceste zone este facilitată ieșirea magmei la suprafață. Figura 2.4 avem reprezentat marginile plăcilor tectonice și zonele geotermale asociate marginilor plăcilor tectonice. De asemenea avem reprezentate centralele electrice geotermale existente în lume.

Resursele geotermale cu entalpie scăzută sunt localizate în bazine sedimentare cu grosimi relativ mici ale scoarței, din apropierea marginilor plăcilor tectonice. Schema

de principiu a unui rezervor geotermal localizat într-un bazin sedimentar este prezentat în figura 2.5.

Aceste resurse au un potențial energetic ridicat deși temperaturile sunt în general mici, datorită cantităților foarte mari de apă geotermală conținută în rocile sedimentare poroase. [74]

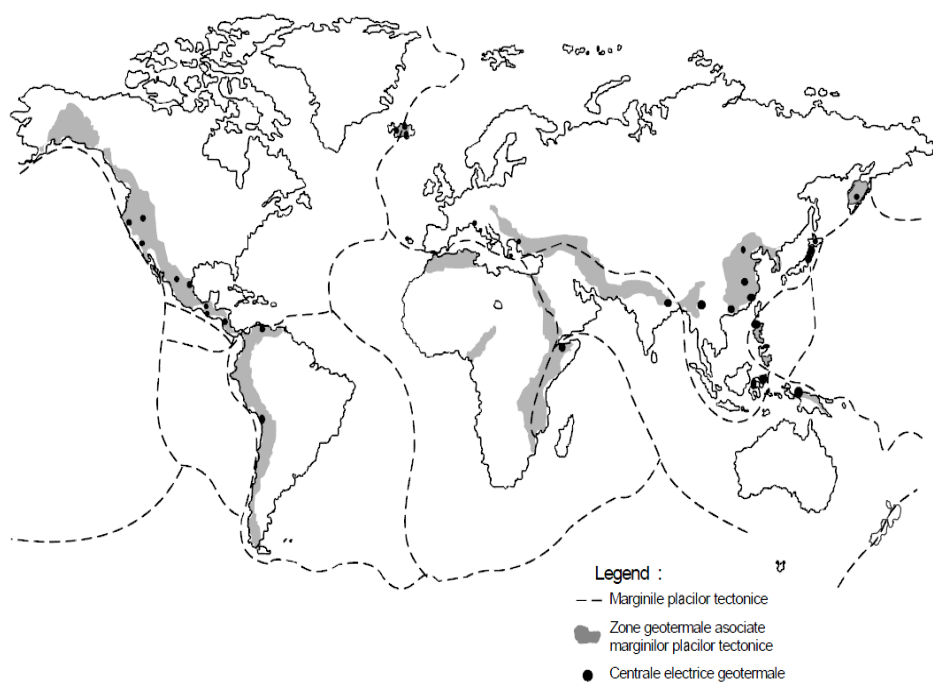


Fig. 2.4 Locațiile resurselor geotermale majore [74]

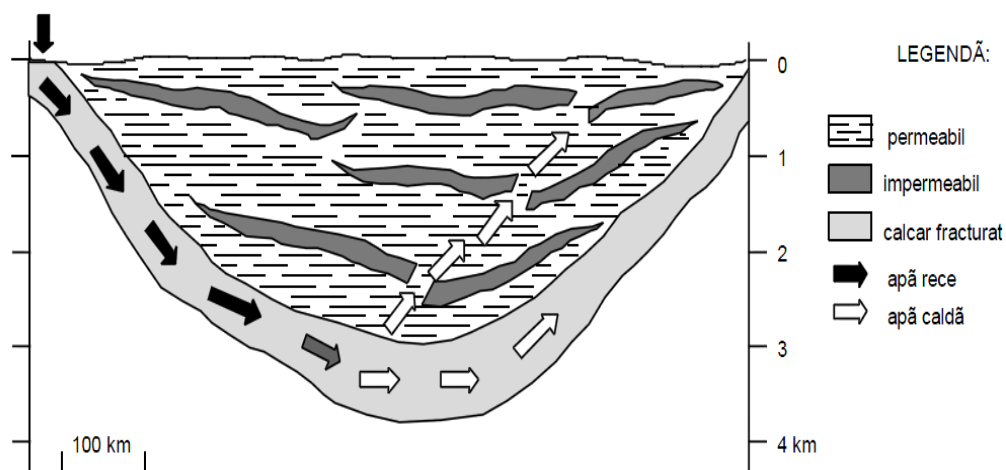


Fig. 2.5 Rezervor geotermal cu entalpie scăzută, în bazin sedimentar [74]

Resursele geotermale cu entalpie scăzută mai pot fi întâlnite în zone vulcanice cu vechime mare, inactive, având ca sursă de căldură intruziuni magmatice de mare adâncime. Însă aceste zăcăminte sunt răspândite pe zone mici în roci vulcanice cu porozitate mică, rezultând un potențial energetic redus.

Rezervoarele geotermale cu entalpie ridicată sunt întâlnite în regiunile vulcanice active și în regiunile de contact între plăcile tectonice au ca sursă de căldură intruziunile magmatice tinere, aflate la adâncimi relativ mici. Transferul căldurii efectuându-se prin intermediul convecției. În figura 2.6 avem schematizat un rezervor geotermal cu entalpie ridicată

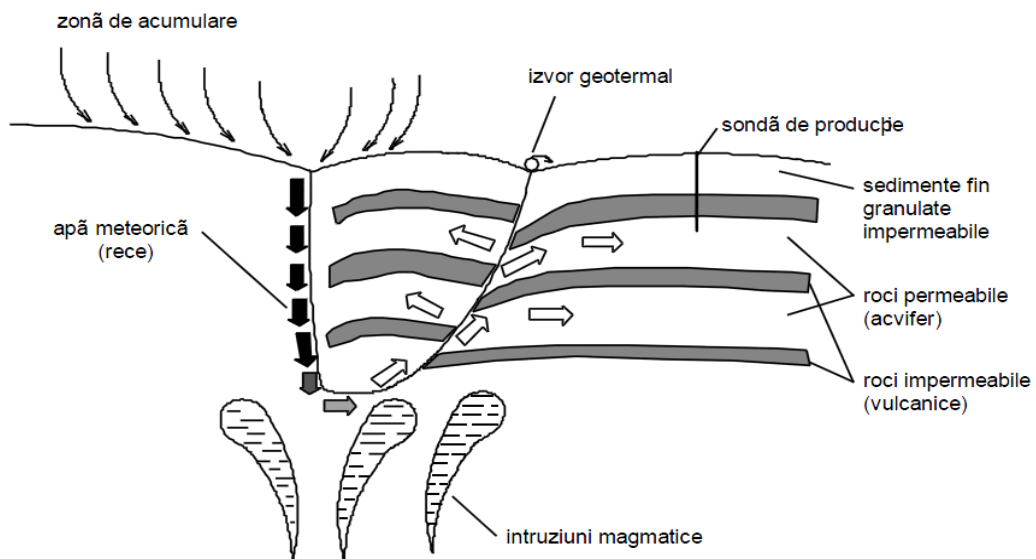


Fig. 2.6 Schema rezervor geotermal cu entalpie ridicată [74]

2.3 Sisteme de utilizare a energiei geotermale/geotermice

2.3.1 Tipuri de utilizări ale energiei geotermale/geotermice

Energia geotermală/geotermică poate fi utilizată pentru:

- producția de energie electrică
 - folosințe directe ale energiei geotermale
- } – energia geotermală de mare adâncime
- extragerea energiei geotermice – energia geotermică de mică adâncime/suprafață

Producția de energie electrică este cea mai importantă formă de utilizare a resurselor de energie geotermală cu entalpie ridicată. ($>150^{\circ}\text{C}$). Entalpia scăzută ($<150^{\circ}\text{C}$) este potrivită pentru multe tipuri de aplicații, dar poate fi și ea folosită la producerea de curent electric. În Alaska se produce energie electrică prin intermediul energiei geotermale care are o temperatură de 74°C . Diagrama clasică Lindal care prezintă tipuri de utilizări ale apelor geotermale este încă valabilă (fig. 2.7).[63][93]

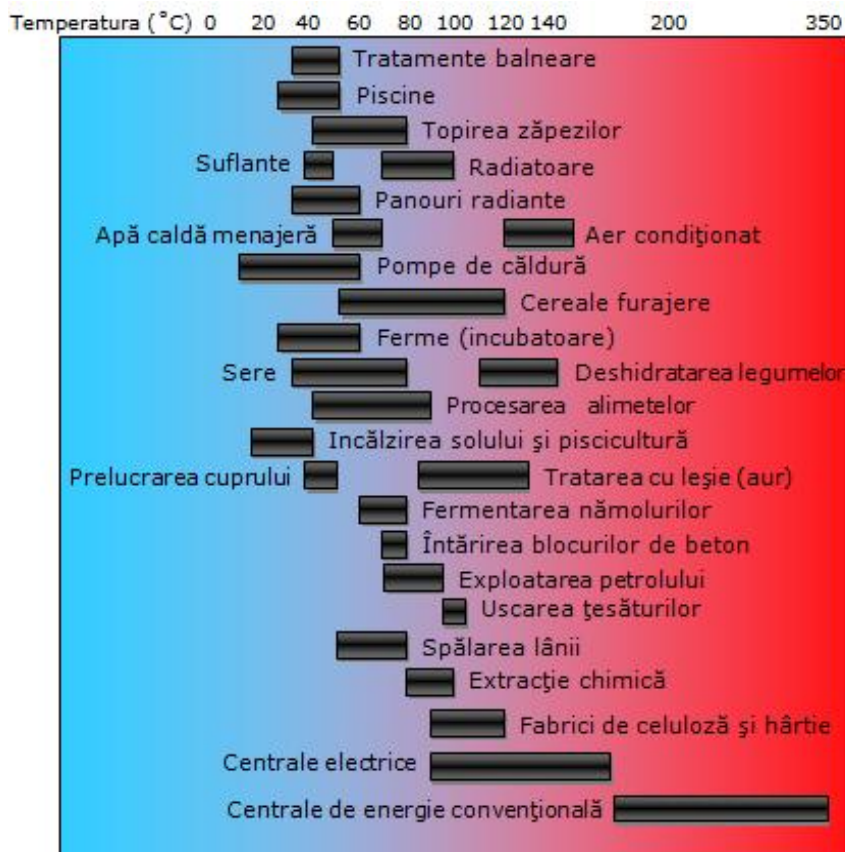


Fig. 2.7 Diagrama Lindal cu tipuri de utilizări ale apelor geotermale [63]

Sintetizând sistemele de utilizare a energiei geotermale după adâncime, entalpie și modul de utilizare putem spune că până la 100 m adâncime avem sisteme de utilizare a energiei geotermice cu colectori sau sonde de mică adâncime (în apropierea suprafeței solului, iar până la 4000 m avem energia geotermală de adâncime unde putem folosi direct energia geotermală sau producție de energie electrică. În figura 2.8 avem prezentate tipurile de energie geotermală.

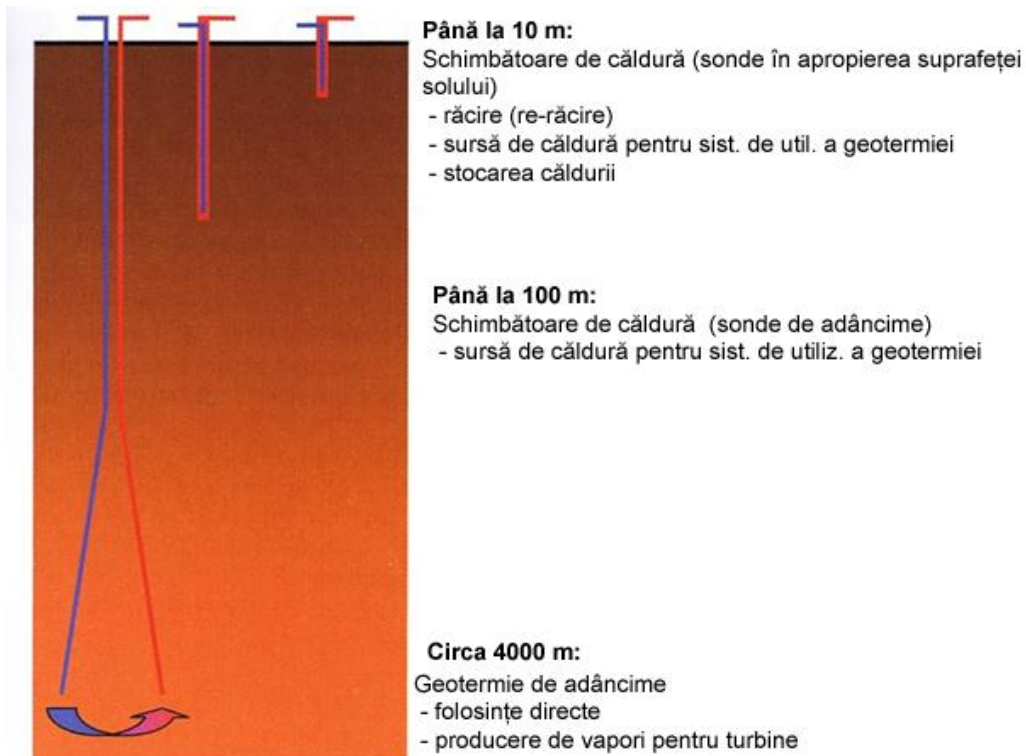


Fig. 2.8 Tipuri de resurse geotermale [60]

2.3.1.1 Producerea de energie electrică

Producerea de energie electrică are loc în centrale de diferite tipuri: abur uscat (dry steam), abur umed (flash steam), ciclul binar (binary cycle), depinzând de caracteristicile resursei geotermale.

Centralele electrice ce utilizează abur uscat utilizează abur din resursele geotermale. Acest abur este captat printr-un puț direct în centrală unde este direcționat către o turbină.

Centralele electrice cu abur umed (flash steam), utilizează apa geotermală. Această apă geotermală este captată printr-un puț. Însă, în timp apa urcă spre centrală, sub presiune proprie presiunea scade iar o parte din această apă trece în stare gazoasă. În centrală apa este separată de abur, care este folosit de generatorul de curent. Restul de apă și abur nefolosit este injectat înapoi în rezervor.

Centralele electrice cu ciclu binar operează cu resurse cu entalpie scăzută ($<150^{\circ}\text{C}$). Aceste centrale folosesc căldura din apa geotermală pentru încălzi un fluid de lucru care are un punct de fierbere scăzut. Fluidul de lucru trece din stare lichidă în stare gazoasă într-un schimbător de căldură și este folosit pentru turbina care generează energie electrică. Apa geotermală este apoi injectată înapoi în pământ. Apa și fluidul de lucru nu intră în contact direct pe toată durata procesului.

2.3.1.2 Folosițele directe ale energiei geotermale sunt unele din cele mai vechi, multilateral dezvoltate forme de utilizare a energiei geotermale. Sistemele de utilizare directă a energiei geotermale folosesc puțuri forate în rezervorul geotermal pentru aprovizionarea cu un debit constant de apă geotermală. Apa geotermală este folosită pentru bai, încălzirea spațiilor de locuit, agricultură, industrie.

Sistemele de încălzire a districtelor au costuri inițiale de construcție mari. Costurile de funcționare sunt, însă mai mici, comparând cu sistemele convenționale de încălzire.

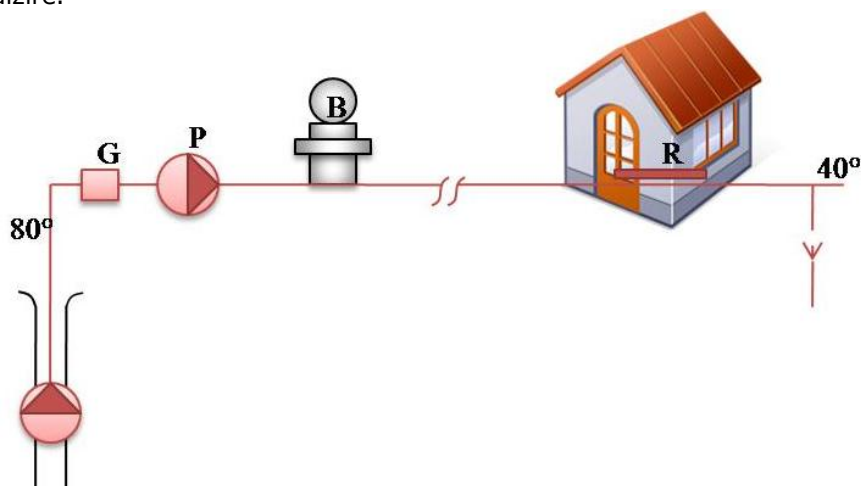


Fig. 2.9 Schemă sistem de încălzire a unui district

În agricultură apa geotermală poate fi folosită pentru irigații sau încălzirea solului. Problema constă în faptul că pentru a obține o variație a temperaturii din sol este nevoie de o cantitate foarte mare de apă care pot inunda terenul. O soluție posibilă ar fi adoptarea unui sistem de irigație sub suprafața solului cuplat la o conductă îngropată folosită pentru încălzirea solului. Compoziția chimică a apei geotermale trebuie să fie monitorizată pentru a evita efecte adverse asupra plantelor. În cadrul agriculturii, încălzirea serelor este utilizarea cel mai frecvent întâlnită. Motivele alegerii acestui tip de energie sunt:

- serele necesită instalații simple de încălzire
- costuri reduse de utilizare a energiei geotermale
- serele sunt amplasate în zone cu resurse geotermale de entalpie scăzută

În industrie energia geotermală este folosită în general pentru deshidratarea legumelor, fructelor, uscarea cerealelor, a peștelui și a lemnului, procesarea

celulozei, a hârtiei, conservarea alimentelor. Procesele tehnologice și instalațiile industriale care folosesc energie geotermală nu diferă față de cele care utilizează alte surse de energie, însă aparatele și rețelele termice trebuie adaptate pentru utilizarea fluidului geotermal. [63][74]

2.3.1.3 Utilizarea energiei geotermice este fezabilă aproape oriunde deoarece la adâncimi mai mari de 6 m temperatura solului este aproximativ constantă. În figura 2.10 avem reprezentată variația temperaturii din sol pe anotimpuri, unde se poate observa că temperatura solului numai variază foarte puțin la adâncimi de mai mari de 6 m

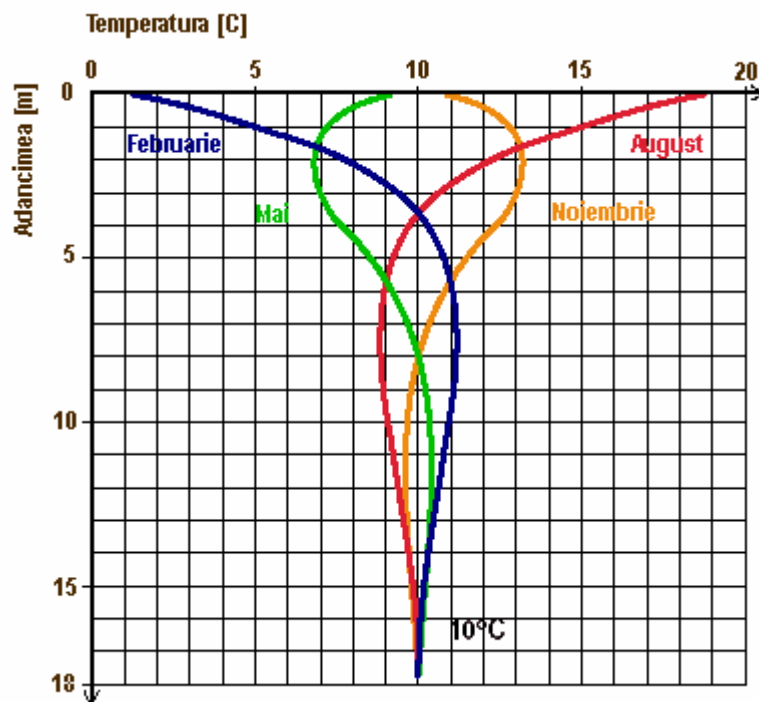


Fig. 2.10 Variația temperaturii în sol, în zona de la suprafața scoarței terestre [66]

- La 1m temperatura solului variază între 5...15°C;
- La 1,5...3m temperatura solului variază între 7...13°C;
- La 4,5m temperatura solului variază între 8...12°C;
- La 6...10m temperatura solului variază între 9...11°C;
- La 10...18m temperatura solului variază cu mai puțin de 1°C în jurul valorii de 10°C;
- La peste 18m temperatura solului este constantă, având valoarea de 10°C.

Sistemele de utilizare a geotermiei de mica adâncime (denumite și sisteme energetice ale pământului, sau sisteme de geoschimb) au primit o atenție considerabilă în ultimele decenii ca și surse de energie alternativă pentru încălzirea/răcirea spațiilor de locuit rezidențiale și comerciale. Sistemele se bazează pe faptul că temperatura este relativ constantă după între 6,1 și 45,7 m adâncime.

Aceste valori constante din subteran sunt rezultatul unor interacțiuni complexe între fluxul de căldură provenit de la soare, atmosferă și fluxul de căldură provenit din interiorul Pământului.[4]

Sistemele de utilizarea a energiei geotermice absorb căldura din sol, de la diferite adâncimi, din apa freatică, din apele de suprafață (dar numai cu condiția să nu existe pericolul ca apa să înghețe), sau chiar din aer (dar numai în perioadele în care temperatura aerului este suficient de mare, pentru a permite funcționarea pompelor de căldură, cu o eficiență ridicată). Indiferent de sursa de căldură, sistemele utilizează indirect o anumită cantitate din energia solară acumulată în sol, apă sau aer. Câteva dintre condițiile pe care trebuie să le îndeplinească sursa de căldură, pentru a putea fi utilizată de către sistemele de utilizarea a energiei geotermice sunt următoarele:

- Disponibilitate în cantitate suficientă;
- Capacitate cât mai mare de a acumula căldură;
- Nivel cât mai ridicat de temperatură;
- Capacitate de regenerare suficient de mare;
- Posibilitate de captare în condiții cât mai economice.

2.3.2 Descrierea sistemelor de utilizare a energiei geotermice (de mică adâncime)

Sistemele de utilizarea a energiei geotermice sunt realizate după principiul de funcționare al frigiderelor. Pentru funcționare avem o sursă de energie (apă, sol), care trece prin vaporizatorul pompei de căldură transferând energia termică agentului frigorific din instalație. Acest agent frigorific are proprietatea de a trece în stare gazoasă la temperaturi foarte joase (ex. -2°C). Agentul frigorific în stare gazoasă va fi comprimat acumulând energie termică care este transferată agentului termic. După ce acest transfer are loc, agentul frigorific trece, din nou, în stare lichidă trecând printr-un ventil de expansiune unde presiunea îi scade reintrând în condensator, unde ciclul va începe din nou. [66]

Sistemele de utilizarea a energiei geotermice au trei componente principale:

1. rețeaua de sonde îngropate în sol (schimbătoare de căldură). Această rețea este compusă din conducte îngropate în sol, fie într-un foraj fie într-un șanț orizontal. Conducta poate fi cu circuit închis, caz în care prin interiorul acesteia curge un amestec de antigel cu apă care este pompat prin conducte pentru a absorbi căldura din sol. În cazul în care conducta este cu circuit deschis prin conductă va circula apa subterană, din care se va extrage energie termică. În acest caz, pe lângă forajul de unde se extrage apă din acvifer va exista și un puț de injecție, unde va ajunge apa folosită.
2. pompa de căldură compusă din
 - evaporatorul
 - compresorul
 - condensatorul
 - ventil de expansiune
3. Sistemul de distribuire a căldurii

Conform ASHRAE sistemele de utilizare a energiei geotermice sunt împărțite în trei categorii după tipul de resursă folosit:

- a. sisteme ce utilizează apa freatică ca sursă de energie
- b. sisteme ce utilizează solul ca sursă de energie
- c. sisteme ce utilizează apa de suprafață ca sursă de energie

a. Sisteme ce utilizează apa freatică

Schema de principiu a acestui tip de sistem este prezentată în figura 2.11. Un sistem care utilizează apa freatică ca sursă de energie folosește un puț de captare și unul de injectare, de aceea sunt considerate sisteme cu circuit deschis. Apa folosită este reinjectată în acvifer într-o zonă nesaturată, sau într-un canal, râu. Condițiile de proiectare sunt bine cunoscute, tehnologii de forat și metode de testare sunt cunoscute de zeci de ani. Condițiile de proiectare includ: necesitatea unui acvifer, calitate chimică, bună a apei, o metodă de a elimina apă uzată.

Avantajul acestor sisteme constă în simplitatea, costul redus și spațiul relativ mic, de care este nevoie comparând cu alte sisteme de utilizare a energiei geotermale și sisteme convenționale.

Dezavantajele constau în faptul că există o disponibilitate mică de apă subterană care să aibă debitul necesar funcționării în condiții reale și compoziția chimică neconformă cu cerințele. Creșterea preocupărilor asupra mediului au ridicat multe aspecte legale din vina captării sau injectării apei subterane.[4]

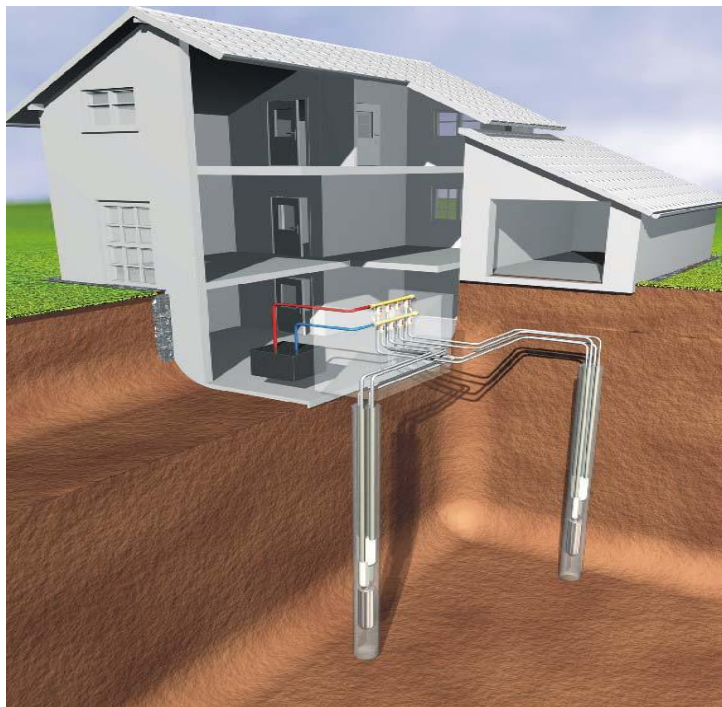


Fig. 2.11 Schema sistemului ce utilizează apa freatică [57]

b. Sisteme care utilizează solul ca sursă de energie

Sisteme care utilizează solul ca sursă de energie sunt diferite față de cele care utilizează apa freatică prin faptul că folosesc schimbătoare de căldură orizontal așezate în sol sau vertical așezate în sol eliminând problemele asociate calității apei și disponibilității. Din acest motiv sunt considerate sisteme cu circuit închis pompele de căldură cu sistem închis. De asemenea au nevoie de mai puțină energie pentru pompare și pot fi instalate aproape în orice locație unde crearea de foraje sau șanțuri este posibilă.

Extragerea/injecția de căldură are loc prin circulația fluidului compus din apă și antigel prin schimbătoarele de căldură.

b1. Schimbătoare de căldură vertical așezate în sol

Schimbătoarele de căldură verticale sunt montate într-unul până la zeci de foraje, fiecare conținând o conductă, prin care este circulat fluidul. Forajul este de obicei acoperit cu un material care previne contaminarea acviferului.

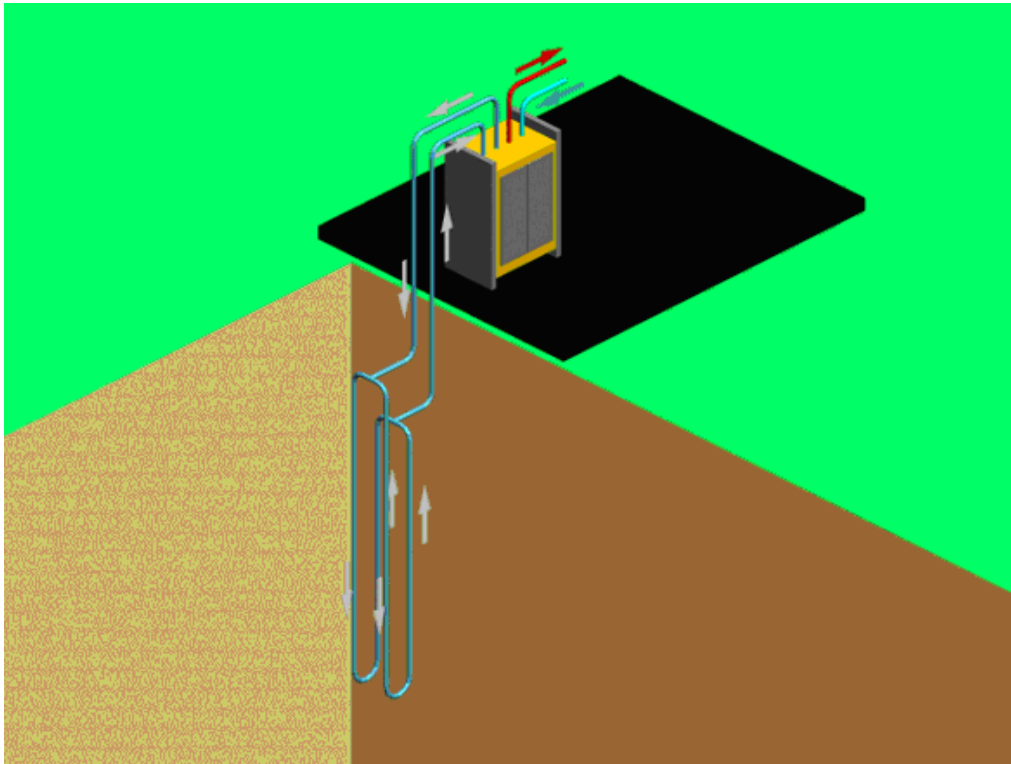


Fig. 2.12 Schimbătoare de căldură verticale [66]

La începuturile dezvoltării acestor sisteme, sarcina de dimensionare a schimbătoarelor de căldură era îndeplinită prin reguli generalizate, modificate foarte puțin, de la caz la caz, folosind estimări ale conductivității termice sau folosind experiența din montări anterioare ale sistemului. Totuși costul adițional pentru testare sau calculare în detaliu a parametrilor a fost considerat compensate costurile unei dimensionări conservative. Această abordare a dovedit a fi folositoare în

majoritatea aplicațiilor rezidențiale sau alte aplicații mici. În cazul unor aplicații comerciale sau instituționale la scară mare unele schimbătoare de căldură nu au îndeplinit cerințele după câțiva ani de folosință. Desigur dacă se consideră adoptarea unei dimensionări mai mari decât necesitatea aplicației, costurile inițiale ale sistemului sunt mult mai mari decât cele ale unui sistem convențional. De aceea este nevoie de a simula temperaturile din jurul schimbătoarelor de căldură. [4]

În figura 2.13 avem secțiunile prin schimbătoarele de căldură cel mai des folosite. Sonde U simplu sau dublu U sunt formate din două sau patru conducte care sunt conectate la capătul sondei permițând circulația fluidului de lucru să coboare pe o conductă și să urce pe celălalt. În configurația coaxială de bază extragerea de căldură din sol are pe o singură secțiune de curgere. Materialul cel mai des folosit pentru sonde este polietilena de înaltă densitate (HDPE).

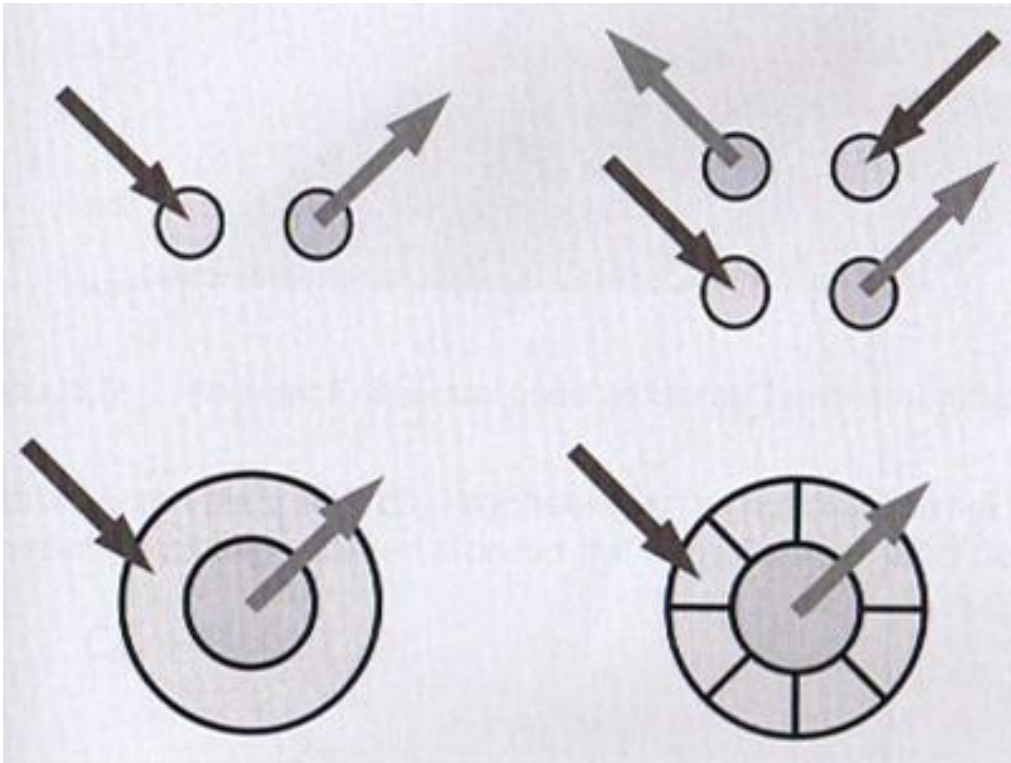


Fig. 2.13 Secțiunea prin diferite tipuri de schimbătoare de căldură vertical așezate în sol. [60]

b2. Schimbătoare de căldură orizontal așezate în sol

Schimbătoarele de căldură orizontale au o configurație tipică, care constă într-o serie de conducte așezate paralel în șanțuri săpate la $\sim 0.9 - 1.8$ m.

Caracteristicile termice ale pompelor de căldură cu schimbătoare de căldură orizontal așezate în sol sunt aceleași cu cele ale schimbătoarelor de căldură verticale. Principalul dezavantaj constă în faptul că schimbătoarele de căldură orizontale sunt mult mai afectate de către factorii climatici datorită apropierii de suprafața solului. Asta va însemna fluctuații mai mari ale temperaturilor din rețea, rezultând în eficiență mai scăzută. [4]

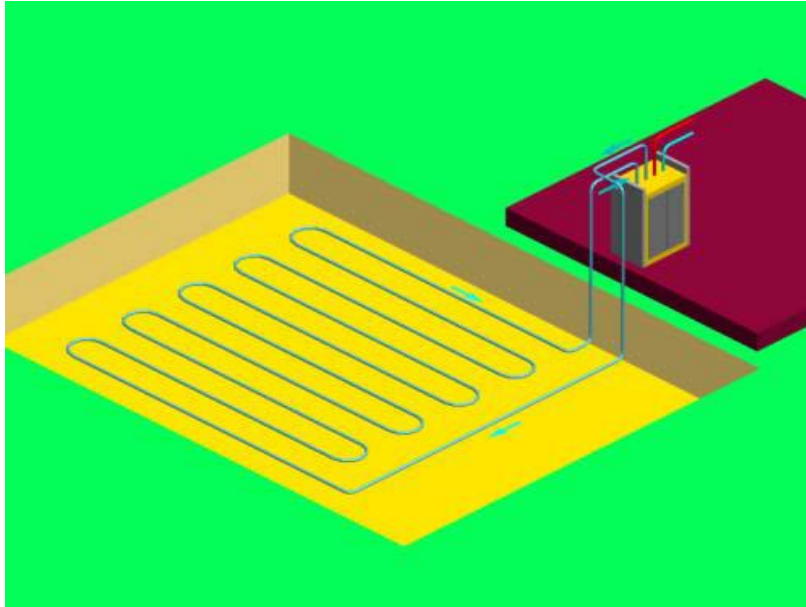


Fig. 2.14 Schema schimbătoarelor de căldură așezate orizontal în sol [66]

c. Sisteme care utilizează apă de suprafață ca sursă de energie

Acest tip de sisteme pot fi cu circuit închis sau deschis. În mod uzual configurațiile cu circuit închis se folosesc, cu diferite tipuri de aranjament ale schimbătoarelor de căldură.

Schimbătorul de căldură este așezat la adâncimea adecvată în lacul iaz, sau alt canal adecvat. Configurațiile cu circuit deschis pompează apă din corpul de apă de suprafață printr-o admisie filtrată și evacuată într-un receptor adecvat. Dimensionarea rețelei schimbătorului de căldură constă în selectarea lungimii suficiente a conductei bobinate, specificând diametrul conductei și numărul de bucle paralele și localizând bobina, la adâncimea corespunzătoare într-un corp de apă cu o conductivitate termică adecvată. [4]

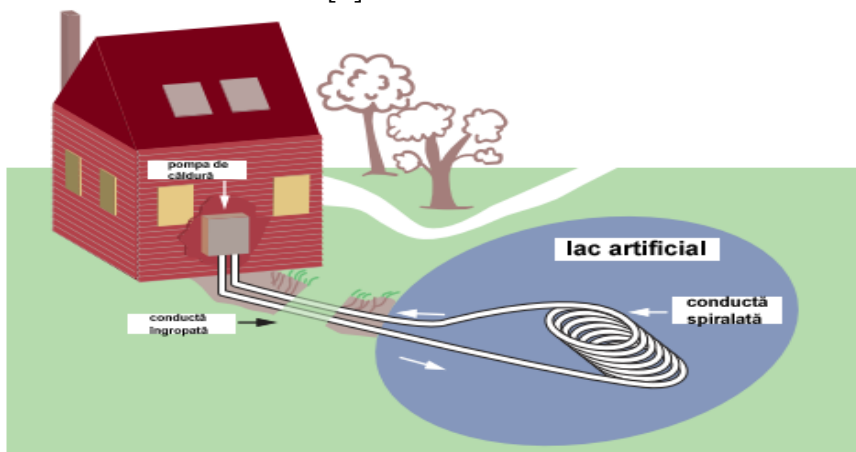


Fig. 2.15 Schema schimbătoare de căldură la suprafață [99]

Regimul de funcționare al sistemelor de utilizare a energiei geotermice trebuie adaptat la tipul sistemului de încălzire al obiectivului pe care îl deservește, dacă acesta este deja realizat, iar sistemul înlocuiește echipamente existente care funcționau cu combustibili clasici. În aceste situații, o restricție importantă este reprezentată de faptul că temperatura maximă pe care o pot realiza pe tur pompele de căldură este de 55°C, iar la această temperatură sistemele pot funcționa doar în cuplaj cu alte surse de încălzire.

În clădirile noi, sistemul de încălzire va fi special proiectat pentru aceste echipamente și va fi caracterizat prin nivelul redus al temperaturii agentului de încălzire. În cazul încălzirii prin pardoseală și/sau pereții laterali, temperatura agentului de încălzire, poate coborî până la valori de cca. 35°C pe tur, sau chiar sub această valoare.

Din punct de vedere al soluțiilor tehnice utilizate pentru încălzire și preparare a apei calde menajere, există mai multe regimuri posibile de funcționare:

- Regim de funcționare monovalent – sistemul de utilizare a energiei geotermice este unica sursă de căldură. În cazul în care sistemul este oprit temporar din cauza unei pene de curent sau din alte cauze trebuie montat un rezervor tampon care să asigure energia necesară. O rezistență electrică poate fi montată de asemenea pentru a furniza energia necesară în perioadele de sarcină maximă.
- Regim de funcționare bivalent –sistemul de utilizare a energiei geotermice este utilizat în combinație cu o altă sursă de căldură care funcționează cu combustibil solid, lichid sau gazos, echipamente de captare a energiei solare, etc;
- Regim de funcționare bivalent alternativ sau paralel – sistemul este utilizat în combinație cu un alt sistem de încălzire Sistemul va asigura temperatura necesară până la un anumit punct, după care un alt sistem (ex. un cazan) va asigura energia termică. În timpul funcționării bivalente alternative sistemul de utilizare a energiei geotermice funcționează împreună cu un alt sistem de încălzire pentru a asigura cererea de la o anumită temperatură.

2.4 Aspecte economice

Unul din punctele cheie pentru orice oportunitate de a produce energie este costul. În acest sens se va lua în considerare trei case unifamiliale (CU) cu cereri diferite de căldură. Acestea vor fi caracterizate în funcție de cererea de apă caldă menajeră și încălzirea a spațiului. Clădirile analizate reprezintă cererea de căldură pentru o casă unifamilială cu un consum minim de energie (CU-I), o casă izolată cu ultimele tehnologii în domeniu (CU-II) și o casă cu izolare tipică pentru Europa Centrală (CU-III). [51]

Tabel 2.2 Cifrele cheie pentru cele trei tipuri de case [51]

Cererea	unitate de măsură	CU-I	CU-II	CU-III
cerere apă caldă menajeră	GJ/a	10,7	10,7	10,7
cerere încălzire a spațiului	GJ/a	22	45	108
Total cerere căldură	kW	5	8	18

Pierderile în cazul distribuției căldurii în clădiri, consumul de energie a pompelor de circulare pentru sistemul de încălzire și cel al apei calde menajere nu

au fost luate în considerare. Aceste sisteme au fost asumate pentru sisteme bazate pe combustibili fosili și pentru energiei regenerabilă pentru a permite o comparație directă între rezultatele.

Costurile specifice furnizării de energie sunt calculate pe valoarea monetara din anul 2005 cu o inflație de 4,5%

Un parametru important este prețul energiei care descrie disponibilitatea energiei din combustibili fosili.

Tabel 2.3 Prețul combustibililor fosili în funcție de folosință [51]

Încălzire pe ulei, consumatori casnici	12 - 18 €/GJ
Gaze naturale, consumatori casnici	15 - 19 €/GJ
Gaze naturale, centrale electrice	5 - 7 €/GJ
Cărbune, centrale electrice	1,7 - 2,7 €/GJ

În 2006 prețul plătit de către operatorii centralelor electrice pentru gaze naturale și cărbuni era de aproximativ 2,2 și 6 €/GJ, dar pentru consumatorul final prețurile sunt mult mai mari.

Pentru asigurarea căldurii în cele trei tipuri de clădiri s-au luat în considerare aplicarea unei centrale pe gaz natural și una pe ulei. În tabelul 2.4 sunt reprezentate parametrii bazați pe sisteme care utilizează combustibilii fosili pentru generare de energie termică. Apa caldă menajeră este asigurată de către schimbătoare de căldură interne.

Tabel 2.4 Parametrii sistemelor de generare a căldurii bazate pe combustibili fosili [51]

Cererea	unitate de măsură	CU-I		CU-II		CU-III	
Cerere apă caldă menajeră	GJ/a	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7
Cerere încălzire a spațiului	GJ/a	22	45	45	108	108	108
Capacitatea centralei	kW	5	8	9	18	20	20
Combustibil		gaze naturale	gaze naturale	gaze naturale	gaze naturale	ulei	ulei
Tehnologie		cazan, cu condensare	cazan, cu condensare	cazan și rezervor de apă caldă	cazan, cu condensare	cazan pe ulei	cazan pe ulei
Durata de viață tehnică	ani	15	15	15	15	15	15
Eficiența cazan	%	104	104	93	104	93	93
Eficiența sistemului	%	95	98	88	101	91	91
Consum de combustibil	GJ/a	34,5	56,6	63,2	117,2	131	131
Rezervor stocare apă caldă	l	160	160	160	160	160	160

Pentru determinarea costului de investiții în calcul au fost introduse costuri pentru cazan, arzător, rezervor de apă caldă, structuri precum camera tehnică, coșul de fum, rezervorul de ulei, precum și costuri de manoperă. Costurile privind operarea includ, printre altele, prestări de servicii (reparații, mentenanță), energie electrică consumată. În tabelul 2.5 avem prezentate aceste costuri în funcție de cerere, capacitatea cazanului, tehnologia pe baza căruia funcționează sistemul de încălzire.

Tabel 2.5 Costurile de furnizare a energiei termice pe baza combustibililor fosili [51]

Cererea	unitate de măsură	CU-I			CU-II		CU-III	
		5	8	8	18	20		
Capacitatea centralei	kW	5	8	8	18	20		
Tehnologie		cazan, cu condensare (gaze naturale)	cazan, cu condensare (gaze naturale)	cazan și rezervor de apă caldă (gaze naturale)	cazan, cu condensare	cazan pe ulei		
Combustibil		gaze naturate	gaze naturale	gaze naturale	gaze naturale	ulei		
Investiții								
Cazan, arzător	€	2800	2800	2600	3100	3000		
Rezervor, coș de fum, etc	€	2600	2600	2600	2600	3200		
Manoperă	€	830	830	830	830	950		
Total	€	6230	6230	6030	6530	7150		
Cost de funcționare	€/a	225	233	174	283	349		
Costurile combustibilului	€/a	575	943	1053	1953	1963		
Costurile de furnizare a energiei termice	€/GJ	40	31	28.3	24.3	22.7		
	€/kWh	0.144	0.112	0.102	0.087	0.082		

Putem observa că sistemele bazate pe ulei au un cost de furnizare a energiei termice de aproximativ 23 €/GJ, în schimb cele gaz sunt puțin mai mari ajungând la 24 €/GJ. În ambele cazuri costurile sunt generate de cheltuieli pe combustibil și funcționarea sistemului. În același timp putem observa costul de furnizare a energiei termice care este mai mare cu scăderea capacității termice instalate. (ex. CU-I unde avem un cost de furnizare a energiei termice de 40/ €/GJ, comparativ cu CU-II unde avem un cost 28 – 31 €/GJ).

În cazul sistemelor de utilizare a energiei geotermice vom lua pentru comparație trei tipuri de sisteme:

- sistemul de utilizare a energiei geotermice cu schimbătoare de căldură orizontale
- sistemul de utilizare a energiei geotermice cu schimbătoare de căldură verticale
- sistemul de utilizare a energiei geotermice folosind apa freatică

Pentru a estima costurile pentru furnizarea energiei din surse geotermice folosind sistemele de mai sus se va prezenta valoarea investiției, costul funcționării plus costurile de furnizare a căldurii. În funcție de condițiile geologice specifice

locației alese pentru amplasarea sistemului geotermic, apar diferențe semnificative în sistemul de captare a energiei, implicând astfel și costuri diferite. Astfel costurile prezentate în continuare pot fi considerate ca valori medii de referință. În cazuri individuale, costurile pot fi mai mari sau mai mici funcție de condițiile locale.

Tabel 2.6 Configurația de referință a sistemelor de utilizare a energiei geotermice [51]

Cererea	unitate de măsură	CU-I	CU-II	CU-III
Cerere apă caldă menajeră	GJ/a	10,7	10,7	10,7
Cerere încălzire a spațiului	GJ/a	22	45	108
Capacitatea nominală	kW	5	8	18
Sursa de căldură				
schimbătoare de căldură orizontal așezate în sol (SO)		X	X	X
schimbătoare de căldură orizontal așezate în sol cu evaporare directă (SOD)		X	X	X
schimbătoare de căldură vertical așezate în sol (SV)			X	X
apă freatică (AF)			X	X

Sistemele de utilizare a geotermiei cu schimbătoare de căldură orizontal așezate în sol folosesc conducte din HDPE îngropate la 1,2 m adâncime. Fluidul de lucru este un amestec de propilen-glicol 30%, apă 70%,

Pentru sistemele cu schimbătoare de căldură orizontal așezate în sol cu evaporare directă tuburi din cupru, având un înveliș protector de plastic sunt îngropate în sol pe un strat de nisip la 1,2 m adâncime.

Sistemele de utilizare a energiei geotermice cu schimbătoare de căldură vertical așezate în sol considerate a extrage un flux de 50 W/m din sol se vor folosi sonde 2 x 60 m pentru CU-I iar pentru CU-II 3 x 90 m. Sondele HDPE sunt în formă de dublu U și instalate în foraje care apoi sunt umplute cu o suspensie din bentonită ciment și apă.

Investițiile în sistemele de utilizare a energiei geotermice sunt influențate de mărimea sistemului și tipul de tehnologie aplicat.

Tabel 2.7 Costurile de investiție și funcționare a sistemelor de utilizarea a energiei geotermice [51]

Sistemul	CU-I		CU-II				CU-III			
	SO	SOD	SO	SOD	SV	AF	SO	SOD	SV	AF
Sursa de căldură										
Investiții										
Sursă de căldură în €	1514	1514	2267	2267	4845	4784	4239	4239	1029 5	5027
Pompa de căldură în €	4966	4542	6056	5450	6056	5753	9266	9266	9266	9266
Apă caldă în €	1671	1671	1671	1671	1671	1671	1671	1671	1671	1671
Altele în €	1575	1696	1514	1635	2120	3149	2846	2846	3452	4179
Total în €	9726	9423	1150 8	1102 3	1469 2	1535 7	1802 2	1802 2	2468 4	2014 3

Mentenanță în €	172	166	196	187	221	307	297	297	339	403
Energia electrică în €	397	362	636	580	646	588	1285	1178	1312	1178
Costurile de furnizare a energiei termice										
€/GJ	43,9	41,8	33,3	31,3	38,5	40,6	26,3	25,4	31,6	28,3
€/kWh	0,158	0,150	0,120	0,113	0,139	0,146	0,095	0,092	0,114	0,102

Costurile de investiție, funcționare și mentenanță a sistemelor de utilizare a energiei geotermice sunt în general mai mari decât ale sistemelor de încălzire pe combustibili fosili. Pentru exemplificare s-au luat în considerare trei spații de locuit cu diferite grade de izolație în care s-au propus sisteme de încălzire bazate pe energie regenerabilă (geotermică) și sisteme de încălzire pe combustibili fosili. Astfel pentru sisteme ce funcționează pe combustibili fosili avem costuri totale de investiții între 6030 – 7150 €. În schimb în cazul sistemelor de utilizare a energiei geotermice costurile inițiale se încadrează între 9726 – 24684 €. Costul final pentru un kWh energie termică furnizată din sisteme regenerabilă variază între 0,092 – 0,158 €/kWh iar pentru sisteme pe combustibili fosili 0,082 – 0,144 €/kWh.

2.5 Impactul asupra mediului

Nu există posibilitatea de a produce sau a transforma o formă de energie pentru a putea fi utilizată de om fără a exista un impact direct sau indirect asupra mediului. Exploatarea energiei geotermale are un impact asupra mediului înconjurător dar putem spune că este una dintre cele mai puțin poluante forme de energie. În ceea ce privește efectul asupra mediului, când exploatăm energia geotermală, el este proporțional cu dimensiunea exploatării lui. În tabelul 2.3 este evidențiată probabilitatea și severitatea relativă a efectelor asupra mediului a proiectelor de utilizare directă a energiei geotermale. [63]

Tabel 2.8 Probabilitatea și severitatea potențialului impact asupra mediului în utilizării directe a energiei geotermale [63])

Impactul	probabilitatea de apariție	Severitate și consecințe
Poluarea aerului	reduc	moderat
Poluarea apei de suprafață	moderat	moderat
Poluarea subteranului	reduc	moderat
Nivel de zgomot	mare	reduc – moderat
Probleme socio-economice	reduc	reduc
Poluare chimică sau termică	reduc	moderat – mare
Eliminare deseuri	moderat	moderat – mare

Modificarea mediului trebuie evaluată atent deoarece orice schimbare poate declanșa o reacție în lanț a căror impact este greu de anticipat. O creștere cu 2° – 3°C a temperaturii unui corp de apă, rezultată din descărcarea apelor uzate de la o

centrală geotermală poate afecta acel ecosistem. Plantele și animalele sensibile la variațiile de temperatură pot să dispară gradual lăsând peștii fără sursa de hrană.

Primul efect perceptibil asupra mediului este cel al forării. Operațiile necesare procesului de forare va modifica morfologia solului putând vătăma fauna și vegetația locală.

Instalarea conductelor care vor transporta fluidul geotermal, construcția și utilizarea centralelor va afecta de asemenea vegetația, fauna și morfologia solului.

În timpul funcționării centralelor geotermale, fluidele geotermale (abur sau lichid) conțin gaze și chimicale dizolvate cum ar fi dioxidul de carbon (CO_2), hidrogen sulfurat (H_2S), clorură de sodiu (NaCl), arsenic (As), mercur (Hg) care sunt surse de poluare în cazul în care sunt eliberate în mediul ambiant. Există fluide geotermale care sunt inofensive pentru mediu cum ar fi cele din Islanda, dar acestea sunt foarte rare.

Poluarea aerului cu hidrogen sulfurat este principalul poluant în cazul producerii de curent electric folosind energia geotermală. Există și emisii de dioxid de carbon la centralele geotermale dar sunt mult mai mici decât cele pe combustibili fosili. Pentru fiecare kWh de electricitate produsă avem 13 – 380 g emisii de CO_2 în cazul centralelor geotermale, pentru centrale pe cărbune avem 1042 g/kWh, iar pentru gaze naturale avem 453 g/kWh emisii de dioxid de carbon.

Deversarea de ape uzate provenite de la utilizarea energiei geotermale poate produce efecte negative din cauza concentrațiilor de substanțe chimice toxice cum ar fi borul, fluorul, arsenic, etc. Extragerea unor cantități mari de fluide geotermale poate duce la efectul de surpare. În multe cazuri acest efect poate fi redus prin reinjectarea apei uzate geotermale.

În cazul folosirii sistemelor de utilizare a energiei geotermice care extrage sau introduce căldură putem avea efecte care nu se limitează la terenurile învecinate. În cazul în care vecinii sunt împiedicați să folosească sisteme de utilizare a energiei geotermice proprii din cauza efectului pe care îl are propriul sistem, putem vorbi de „furt de căldură/frig”. Există dreptul, în țări dezvoltate în domeniul exploatarea energiei geotermice, precum Germania, de a acționa în instanță și a cere daune beneficiarului instalației. Dacă utilizatorul instalației geotermice posedă aprobare de exploatare și autorizație de utilizare a apei atunci vecinii nu pot apela la dreptul de respingere a acesteia. De aceea este foarte important ca la acordarea aprobărilor să se ia în calcul și interesele potențiale opuse. [63][86]

2.6 Obiectivele cercetării doctorale

Obiectivul principal urmărit în teza este analiza impactului utilizării sistemelor de exploatare a energiei geotermice de mică adâncime asupra regimului termic subteran, cu implicații asupra randamentului propriu și asupra mediului subteran prin scăderea/creșterea temperaturii pe mantaua schimbătoarelor de căldură, respectiv în vecinătatea acestora. Analiza se referă la următoarele aspecte:

- a. Identificarea parametrilor fizici reprezentativi pentru energia geotermică de mică adâncime din județul Timiș.
- b. Estimarea potențialului energiei geotermale de mică adâncime din județul Timiș, bazată pe valorile parametrilor geotermici caracteristici di regiune.

- c. Modelarea proceselor de transfer de căldură în domeniul exterior schimbătoarelor de căldură: procese de transfer și parametri specifici, ecuații generale, formularea matematică a problemelor de transfer specifice sistemelor de captare, soluții analitice reprezentative și metode numerice de rezolvare.
- d. Dezvoltarea unor metode matematice/numerice de prognoză a regimului temperaturii subterane în zonele limitrofe schimbătoarelor de căldură și implicit a impactului sistemelor de utilizare a geotermiei de mică adâncime pentru încălzire, respectiv răcire, asupra regimului termic al subteranului și prin aceasta asupra randamentului sistemului.
- e. Verificarea metodelor de modelare și a soluțiilor propuse prin compararea rezultatelor teoretice cu cele măsurate pe un sistem pilot cu sonde verticale.

CAPITOLUL III – ESTIMAREA POTENTIALULUI RESURSELOR GEOTERMALE

3.1 Potențialul geotermal din Romania

Conform Muffler și Cataldi, [65] atunci când ne referim la resursele geotermale, ne referim, de obicei, la o *bază de resurse accesibile*. Aceasta resursă este de fapt energia termică înmagazinată în subteran până la o adâncime specifică dintr-o zonă anume, cu măsurători locale ale mediei anuale a temperaturii. Baza de resurse accesibile include *resursele accesibile* – care reprezintă resursele ce pot fi extrase economic și legal o anumită perioadă de timp (mai puțin de 100 ani). În această categorie regăsim resursele identificate într-o anumită zonă ce pot fi extrase legal, competitiv economic, cu alte surse comerciale de energiei fiind cunoscute și caracterizate prin foraje, probe geochimice, geofizice sau geologice. [63]

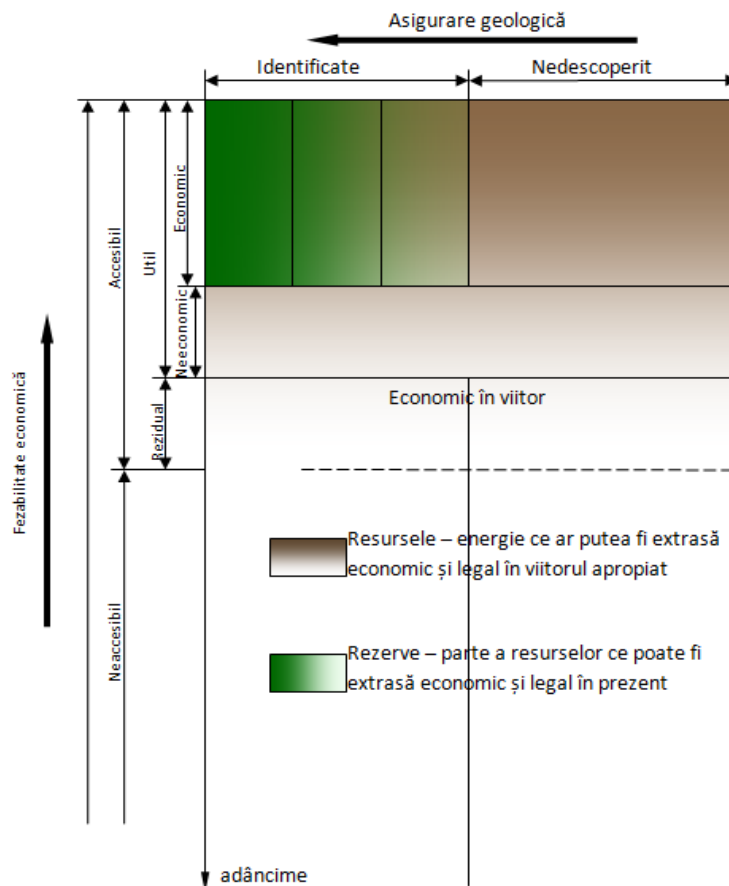


Figura 3.1 Diagrama resurse geotermale [65]

Astfel pentru a evalua resursele geotermale trebuie să estimăm, la un moment dat, energia termică conținută în subteran într-o anumită regiune și condițiile economice, legislative și tehnologice prin care putem utiliza această energie. Această evaluare are scopul principal de a compara formele de energie existente exploatare.

Evaluarea potențialului geotermal în România s-a bazat pe existența unui număr de peste 200 foraje pentru hidrocarburi cu adâncimi situate între 800 și 3500 m unde au fost găsite resurse geotermale de joasă și medie entalpie (40-120 °C). În decurs de 25 de ani circa 100 de foraje au fost analizate, permițând o estimare a potențialului energetic al acestui tip de resursă regenerabilă.

Utilizarea energiei geotermice extrase este folosită în proporție de 37% pentru încălzire, 30% pentru agricultura (sere), 23% în procese industriale, 7% în alte scopuri. Dintr-un număr de 14 sonde geotermale săpate în intervalul 1995-2000 la adâncimi de 1500-3000 m, numai două sonde au fost neproductive, înregistrându-se o rată de succes de 86%.

Tabel 3.1 Sinteza parametrilor din perimetrele geotermale din România [104]

Nr crt	Sistemul geotermal	Aria estimată	Nr. de sonde	Adâncimea de forare	Debitul exploatabil	Temp. resursei	Energia teoretică* potențială
		km ²		m	$\frac{l \cdot s^{-1}}{m^3 \cdot h^{-1}}$	°C	MW _t
1	Crișul Negru-Someș Săcuieni, Marghita Ciurmeșiu, Salonta - județele Bihor și Satu-Mare	3570	18	1500	$\frac{148}{533}$	77	29,14
2	Borș Orașul Borș - județul Bihor	13	4	2800	$\frac{30}{108}$	100	8,79
3	Oradea Municipiul Oradea - județul Bihor	77	12	2800	$\frac{151,5}{545,4}$	83,8	34,1
4	Mureș - Crișul Negru Curtici, Macea, Municipiul Arad - județul Arad	1060	113	1500	$\frac{79}{285}$	58	9,3

5	Banatul de Vest Nădlac, Sănnicolau Mare, Săravale, Tomnatic, Lovrin, Jimbolia, Periam, Teremia Mare, Comloșu Mare, Grabat, Beregsăul Mic - județele Arad și Timiș	2790	20	2000	$\frac{318}{1144,8}$	77	62,75
---	--	------	----	------	----------------------	----	-------

Notă* - calculată considerând că apa geotermală se răcește până la 30°C

Măsurătorile temperaturilor din foraje au permis elaborarea unor hărți geotermice pentru întregul teritoriu al României arătând distribuția temperaturilor la diferite adâncimi, 1,2,3 și 5km. Hărțile indică zone favorabile exploatării energiei geotermale cu temperaturi între 60 – 140 °C. În Câmpia de Vest sunt caracteristice temperaturi între 60 -120°C, iar în Carpații Orientali: Oaș-Gutâi-Țibleș și Călimani-Grughiu-Harghita găsim resurse de 140°C.

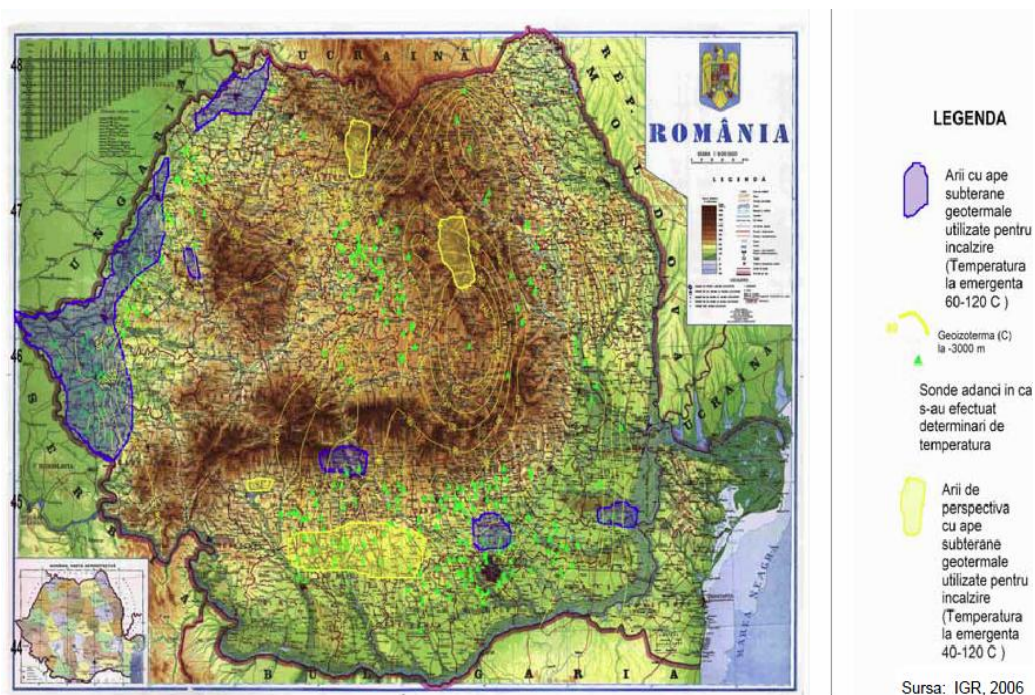


Figura 3.2: Harta geotermală cu temperaturi de la 60°C la 120°C [104]

Zonele reprezentate pot fi utilizate pentru diferite tipuri de utilizări directe ale energiei geotermale cât și pentru sisteme de utilizare a energiei geotermice de mică adâncime.

În figura 3.3 sunt reprezentate zonele cu temperaturi mai mari de 140°C unde se pot lua în considerare aplicații electroenergetice.

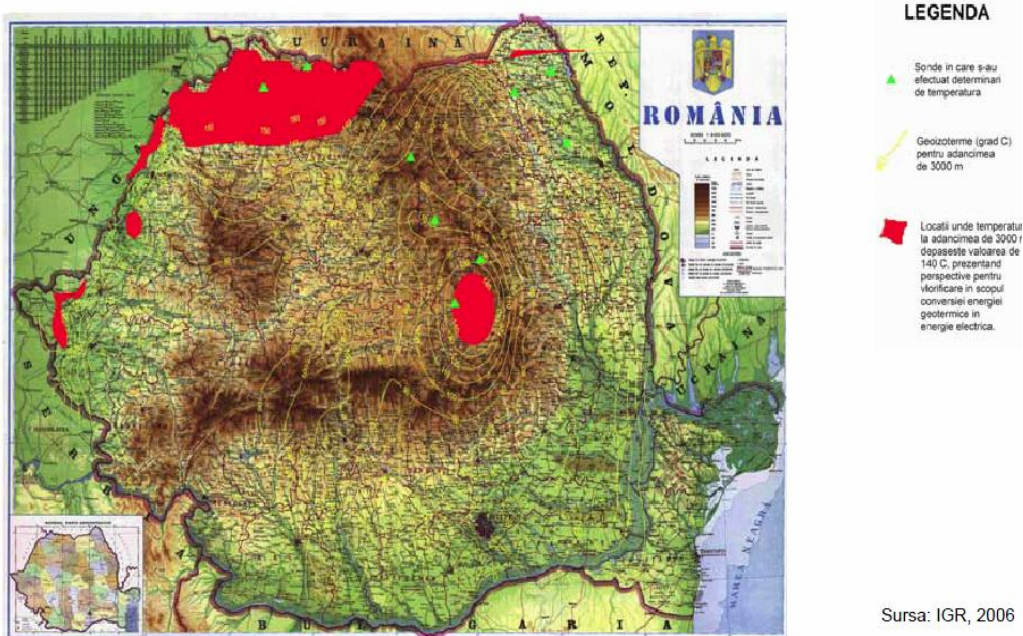


Figura 3.3: Harta geotermală cu temperaturi de 140°C la 3km adâncime [104]

Sintetizând potențialul energetic geotermal al României rezultă tabelul 3.2

Tabel 3.2 Potențial energetic geotermal din România [106]

Parametru	UM	Tehnic	Economic
Putere nominală	MW _t	480	375
Energie electrică	TJ/an	9000	7000
	mii tep/an	215	167

3.2 Evaluarea potențialului energiei geotermale (de mare adâncime) din județul Timiș

Studiul evaluării potențialului energiei geotermale din județul Timiș a fost realizat în cadrul unui proiect „Studiul potențialului de energie din surse regenerabile la nivelul județului Timiș” implementat de Consiliul Local Jimbolia, realizat de către Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) Stuttgart, în care au fost stabilite mai multe obiective:

- identificarea resurselor regenerabile de energie la nivelul județului Timiș
- stabilirea potențialului energetic teoretic din surse regenerabile
- stabilirea potențialului energetic tehnic care să țină seama de performanța tehnologiilor de conversie și de alte criterii

- clarificarea detaliilor privind amplasarea instalațiilor de producere de energie alternativă, punerea în conformitate cu normele europene precum și stabilirea unor condiții și recomandări:
 - criteriile de alegere a zonei de interes pe baza evaluărilor experților
 - identificarea locațiilor cele mai interesante, care să prezinte avantaje precum infrastructura rutieră, energetică
 - aspecte privind evaluarea impactului asupra mediului înconjurător
 - aspecte privind identificarea reglementărilor legale în vigoare privitor la posibilitățile de racordare și furnizare a energiei.

Studiul a fost menit să rezolve anumite nevoi și constrângeri existent în județul Timiș.

Nevoi:

- politică energetică deschisă spre cerere și dezvoltarea producției descentralizate
- scăderea gradului de dependență față de importurile de energie
- diminuarea efectelor negative ale procesului de producție a energiei asupra mediului
- promovarea energiilor regenerabile și creșterea investițiilor în energie regenerabilă

Constrângeri:

- inexistența studiilor la nivel județean care să confere o bază pentru conceperea unei strategii energetice
- lipsa unei legislații complete pentru încurajarea investițiilor în domeniu
- lipsa unor stimulente de susținere a utilizării resurselor energetice regenerabile

Astfel din studiul potențialului de energie din surse regenerabile la nivelul județului Timiș a fost prezentată doar partea estimării potențialului de energie geotermală din județul Timiș

3.2.1 Parametrii caracteristici

Pentru a analiza potențialul energiei geotermale din Timiș s-au folosit hărțile geotermale de la IGR (Institutul Român de Geologie), ICEMENERG și BERD (Banca Europeană de Dezvoltare). Din hartă rezultă că temperaturile sunt peste 100°C la 3000 m adâncime. Harta ICEMENERG fig. 3.2, arată o temperatură de 60 – 120°C pentru 3000 m adâncime pentru zona vestică a județului Timiș. Circa 10% din județul Timiș are un potențial de 140°C. Harta BERD, (fig. 3.4) în schimb, arată temperaturi de la 70 – 120°C pentru județul Timiș

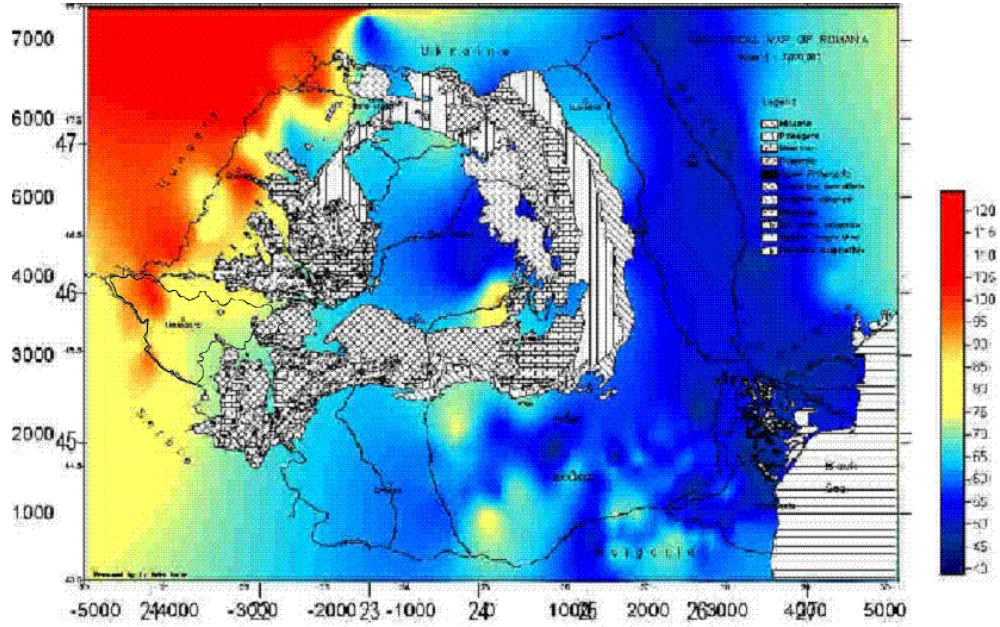


Fig. 3.4 Harta energiei geotermale din România studiu BERD [104]

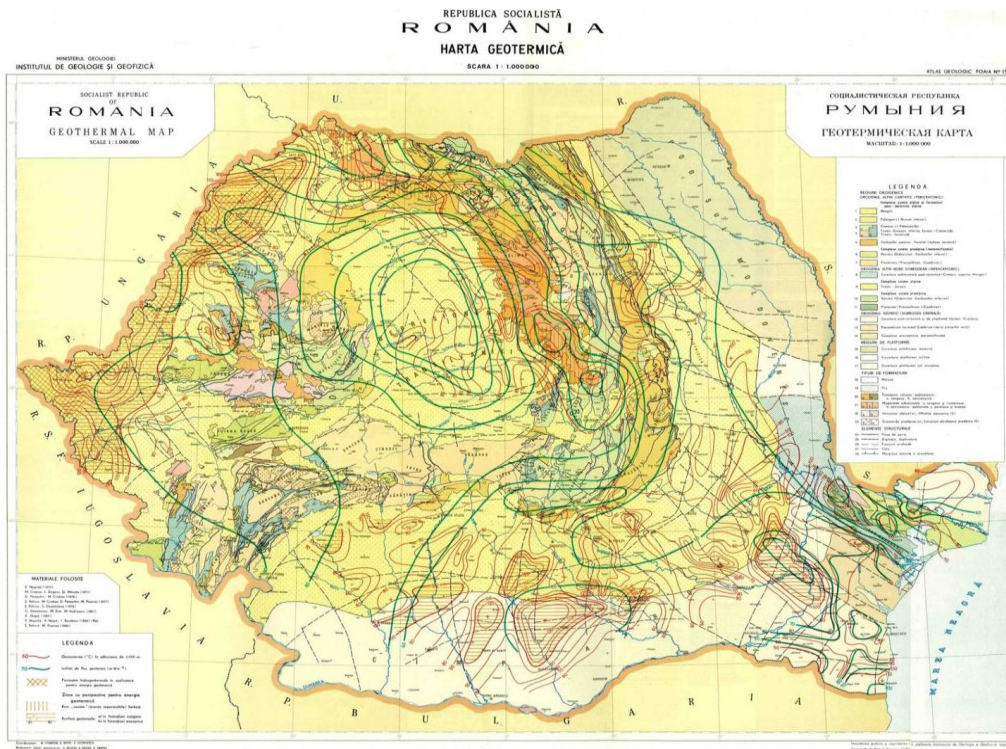


Fig. 3.5 Harta geotermală a României (IGR 1985)

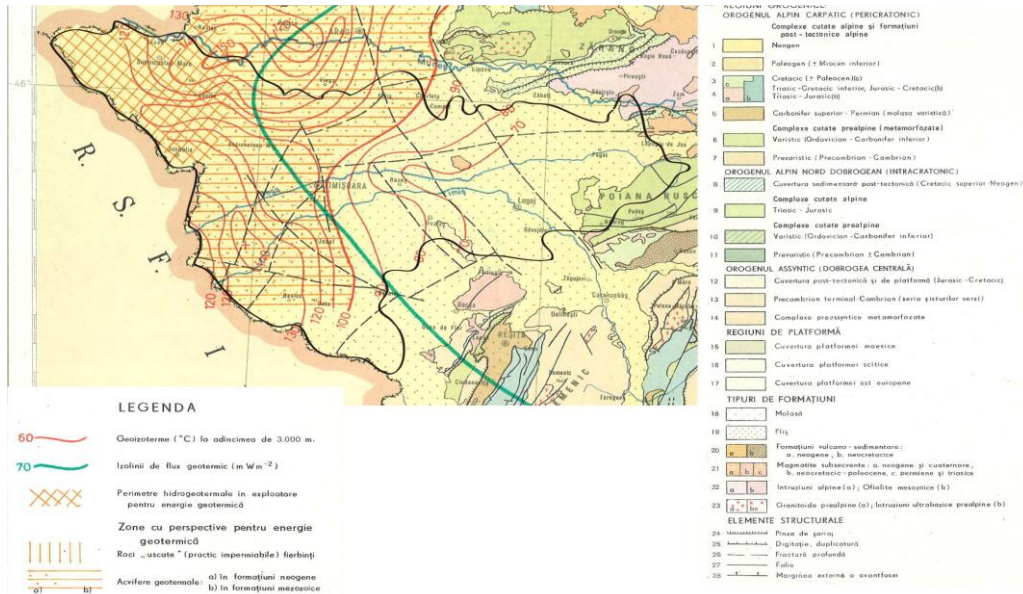


Fig. 3.6 Harta geotermală a județului Timiș (IGR 1985)

Harta prezentată de IGR (fig. 3.5) are cele mai multe detalii și estimează o temperatură de peste 100°C pentru mai mult de 50% din județ. Figura 3.6 prezintă focalizat harta geotermală a județului Timiș. Tipul predominant de roci este molasa, alcătuită din gresii, șisturi și conglomerate. Harta conține și informații despre fluxul geotermal. În partea de est a județului Timiș se înregistrează un flux de 80 – 90 W/m, iar în partea de vest 90 – 100 W/m.

3.2.2 Estimarea potențialului energiei geotermale (de mare adâncime) din județul Timiș

Pentru a estima potențialul geotermal din Timiș au fost considerate anumite ipoteze simplificatoare.

Au fost utilizate două temperaturi a resursei geotermale, 100°C și 130°C iar, temperatura de suprafață a fost considerată a fi 30°C. Temperatura de 100°C este considerată a fi prezentă în circa 50% din suprafața județului, în schimb temperatura de 130°C este prezentă în 15% din județ. Utilizând ecuația 3.1 s-a estimat potențialul geotermal din Județul Timiș. [104].

$$E_{th} = c_g \cdot \rho_G \cdot V \cdot (T_g - T_s) \quad 3.1$$

s-au folosit următorii parametri:

$$c_g = \text{capacitatea specifică a rocii } 0,92 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$\rho_G = \text{densitatea rocii } 2323 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V = \text{volumul rocii } V = A \cdot h$$

$$A_1 = 0,5 \cdot 8679 \text{ km}^2$$

$$A_2 = 0,15 \cdot 8679 \text{ km}^2$$

$$h = 1 : 1 : 100 \text{ m}$$

$$T_{01} = \text{temperatura rocii } 100^\circ\text{C}$$

$$T_{02} = \text{temperatura rocii } 130^\circ\text{C}$$

$$T_s = \text{temperatura de la suprafață } 30^\circ\text{C}$$

Grosimea rezervorului geotermal nu este stabilită astfel că energia potențială a fost calculată pentru o înălțime (adâncime) de la 0 la 100 în pași de 1 m. Potențialul energiei geotermale de mare adâncime din județul Timiș este de circa ~65 PJ în cazul temperaturii de 100°C a resursei geotermale și ~28 PJ în cazul temperaturii de 130°C.

Potențialul geotermal din Municipiul Timișoara este prezentat în figura 3.8. Potențialul energiei geotermale de mare adâncime (3000m) disponibil în Timișoara este de 55,5 *TJ. Conform literaturii de specialitate se poate utiliza între 15 și 30% din potențial. Acest lucru însemnând ca se poate folosi între 8,325 – 16,65 TJ din potențialul geotermal total. [106]

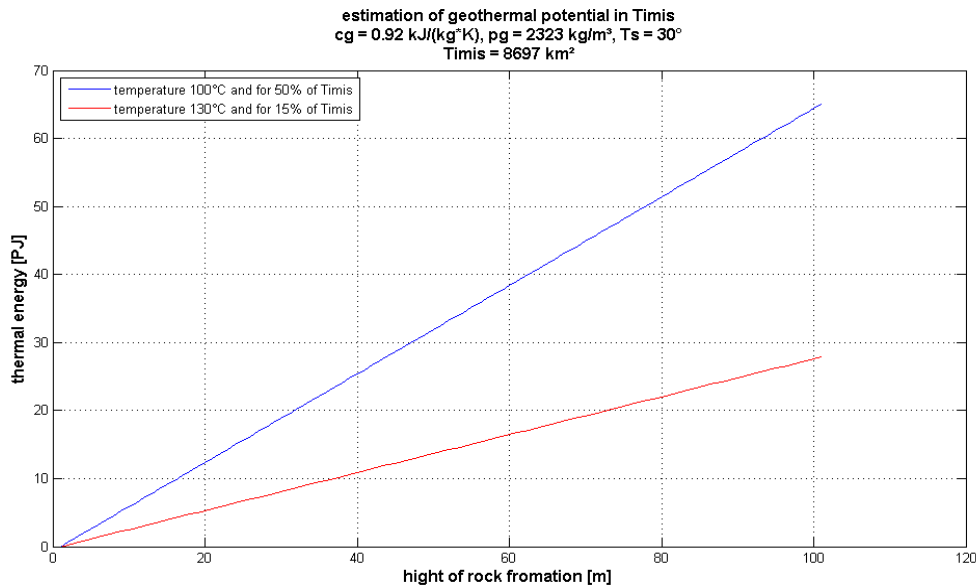


Fig. 3.7 potențialul geotermal în județul Timiș pentru roci tip gresie [104]

Timpul de utilizare al resursei geotermale până la epuizare depinde de mai mulți factori dintre care enumerăm fluxul de căldură, instalațiile de exploatare, debitul resursei geotermale. Fără acești parametri nu se poate da o durată a duratei de viață a rezervorului geotermal.

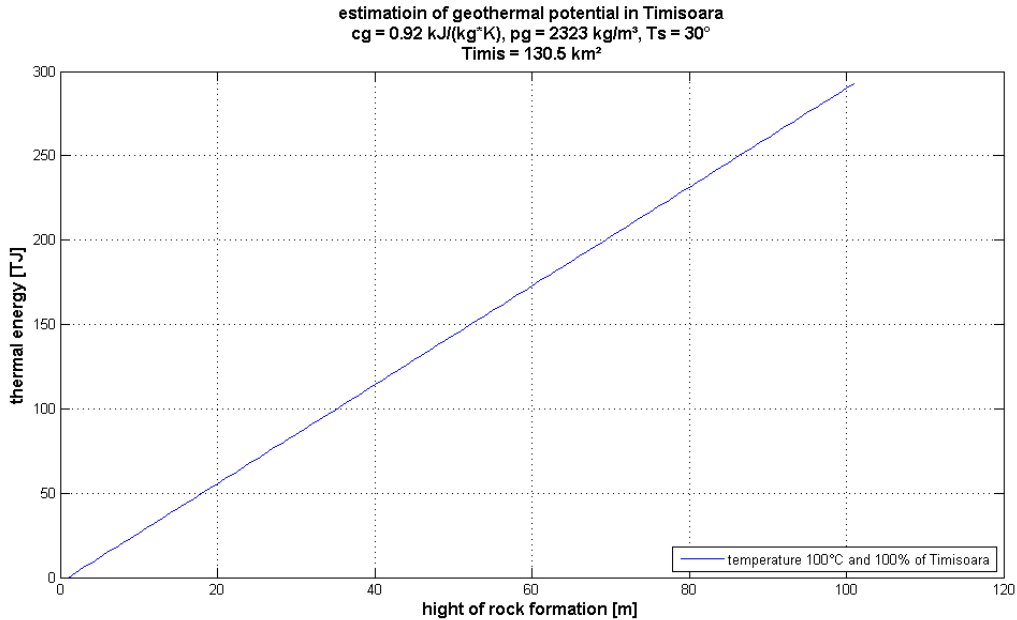


Fig. 3.8 Potențial geotermic din Timișoara pentru roci de tip gresie (studiu)

3.3 Evaluarea potențialului energiei geotermice (de mică adâncime) din județul Timiș

În studiul de evaluare a energiilor regenerabile din județul Timiș, realizat de către Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) Stuttgart nu a fost analizată și potențialul energiei geotermice de mică adâncime. Astfel în cele ce urmează se va estima potențialul energiei geotermice utilizând parametrii identificați caracteristici zonei.

3.3.1 Parametrii caracteristici

Pentru a putea calcula eficient potențialul energiei geotermale de mică adâncime din județul Timiș trebuie să avem, mai întâi parametrii specifici energiei geotermice de mică adâncime, ai acestei zone.

Conform hărți geologice a României, în zona județului Timiș avem mai multe tipuri de soluri. Astfel regăsim roci magmatice (bazalt, granodiorit, aplit, etc), roci metamorfice (filite, micașturi și paragneise, etc), marne, nisipuri, etc. La adâncimi de până în 100 de m, pe teritoriul județului Timiș se întâlnesc marne, nisipuri, pietrișuri, argile, depozite loessoide, bazalt, granodiorit, micașturi,

paragnaise, calcare, conglomerate, gresii, etc. Predominant pentru zona Timișului fiind pietrișurile, nisipurile și argilele.

În Municipiul Timișoara, în cadrul programului NUCELU s-au efectuat două foraje. Datele geotehnice din aceste foraje sunt considerate caracteristice pentru întregul județ Timiș deoarece alte date nu sunt disponibile. Forajul F1 este amplasat în sudul orașului Timișoara în incinta INCERC. Forajul F2 a fost amplasat în nordul orașului, în incinta Institutului Agronomic Timișoara.

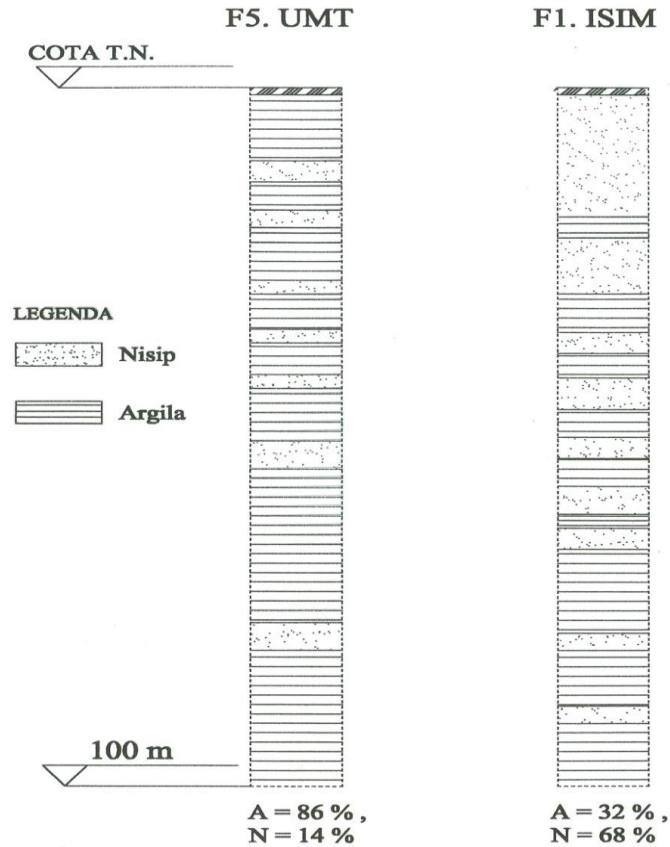


Fig. 3.9 Profile geotehnice caracteristice pentru Timișoara [73]

Studiul geotehnic al celor două amplasamente relevă, prin încercări de laborator, stratificațiile. Pentru cele două amplasamente au rezultat următoarele stratificații:

Foraj F1

Amplasament : zona de sud a municipiului Timișoara în incinta INCERC Timișoara

- Sol vegetal și umplutură
- Praf argilos maroniu
- Nisip prăfos gri
- Argilă plastic gri
- Nisip mare și mijlociu cu pietriș gri
- Argilă vârtoasă gri maronie
- Nisip prăfos mijlociu și mare cu pietriș gri

- Nisip argilos gri
- Nisip prăfos gri
- Praf nisipos argilos gălbui

Foraj F2

Amplasament: zona de nord a municipiului Timișoara în incinta Institutului Agronomic Timișoara

- Teren vegetal
- Argilă prăfoasă neagră
- Argilă prăfoasă maronie-gri cu intercalații de calcar
- Argilă prăfoasă gri - cărămizie
- Argilă prăfoasă gri
- Argilă plastic vârtoasă maro cu calcar la -9.30 m
- Nisip prăfos gri maroniu
- Nisip fin maro
- Nisip cu pietriș gri
- Praf argilos plastic vârtoș gri maroniu cu intercalații de calcar
- Nisip prăfos gri maro
- Argilă plastic tare gri maronie
- Argilă plastic vârtoasă gri
- Argilă plastic vârtoasă neagră-maro
- Argilă plastic vârtoasă gri maronie
- Argilă plastic tare cărămizie gri
- Argilă prăfoasă nisipoasă maronie
- Argilă nisipoasă cărămizie
- Nisip mijlociu și fin gri
- Argilă prăfoasă maro
- Argilă nisipoasă gri cu concrețiuni calcaroase
- Argilă prăfoasă maronie-gri

Putem sintetiza faptul că aceste stratificația la o adâncime de 100 de m este constituită din argilă și nisip în diferite procentaje. Conform acestor foraje în Timișoara, pana la o adâncime de 100 de m avem, argila 86% și nisip 14% sau 32% argila și 68% nisip.

În tabelul 3.3 sunt prezentați valorile parametrilor specifici energiei geotermice. Luând valorile acestor parametri și procentajul fiecărui tip de sol se va stabili densitatea și capacitatea specifică de căldură specifică județului Timiș.

Tabel 3.3 Valori ai unor parametrii caracteristici energiei geotermice [60]

Tipuri de material	Conductivitate termică λ în $\left(\frac{W}{mK}\right)$	Căldura specifică volumetrică (qC) în $\left(\frac{J}{m^3K}\right)$
Bazalt	1,7-2,5	$(2,3-2,6) \times 10^6$
Calcar	2,8	$(2,1-2,3) \times 10^6$
Gresie	2,3	$(1,6-2,8) \times 10^6$
Pietriș (uscat)	0,4	$1,5 \times 10^6$
Pietriș (umed)	1,8	$2,4 \times 10^6$
Nisip (uscat)	0,4-0,8	$(1,3-1,6) \times 10^6$
Nisip (umed)	2,4-3,2	$(2,2-2,9) \times 10^6$
Argilă (uscată)	0,8-2,0	$(1,4-3,0) \times 10^6$
Argilă (umedă)	1,2-1,6	$(2,1-2,4) \times 10^6$

Argilă prăfoasă (umedă)	1,7	$(1,6-3,4) \times 10^6$
Apă	0,6	$4,2 \times 10^6$

Notă:

- capacitatea termica specifica

$$[C_p] = \frac{J}{kg \cdot K} \text{ sau } [C_{p,mol}] = \frac{J}{mol \cdot K} \text{ sau } [C_p] = \frac{J}{m^3 \cdot K}$$

- capacitate termica volumetrica $s = \frac{J}{m^3 \cdot K}$ sau $\rho C_p = \frac{J}{m^3 \cdot K}$

- densitate $\rho = \frac{kg}{m^3}$

Astfel pentru soluri umede vom avea:

$$\text{argila umedă avem } \rho \cdot C_p = (2,1 - 2,4) \cdot 10^6 \left(\frac{J}{m^3 K} \right)$$

$$\text{nisip umed } \rho \cdot C_p = (2,2 - 2,9) \cdot 10^6 \left(\frac{J}{m^3 K} \right)$$

pentru forajul cu 86% argilă și 14% nisip vom avea:

$$2,1 \cdot 0,86 + 2,2 \cdot 0,14 = 2,1 \left(\frac{MJ}{m^3 K} \right)$$

$$2,4 \cdot 0,86 + 2,9 \cdot 0,14 = 2,5 \left(\frac{MJ}{m^3 K} \right)$$

pentru forajul cu 32% argilă și 68% nisip vom avea:

$$2,1 \cdot 0,32 + 2,2 \cdot 0,68 = 2,3 \left(\frac{MJ}{m^3 K} \right)$$

$$2,4 \cdot 0,32 + 2,9 \cdot 0,68 = 2,7 \left(\frac{MJ}{m^3 K} \right)$$

$$\text{rezultă că } (\rho \cdot C_p)_m = 2,4 \left(\frac{MJ}{m^3 K} \right)$$

unde $(\rho \cdot C_p)_m$ este capacitatea căldurii specifice a mediului (argila și nisip)

$$\text{pentru apă avem } (\rho \cdot C_p)_a = 4,2 \left(\frac{MJ}{m^3 K} \right)$$

astfel pentru mediul rocă plus apă, unde n_p este 0,2:

$$(\rho \cdot C_p)_M = n_p \cdot (\rho \cdot C_p)_m + (1 - n_p) \cdot (\rho \cdot C_p)_a$$

$$(\rho \cdot C_p)_M = 3,8 \left(\frac{MJ}{m^3 K} \right)$$

Conductivitatea termică este :

$$\text{pentru argilă } \lambda = (1,2 - 1,6) \left(\frac{W}{mK} \right)$$

$$\text{pentru nisip } \lambda = (2,4 - 3,2) \left(\frac{W}{mK} \right)$$

pentru forajul cu 86% argilă și 14% nisip vom avea:

$$1,2 \cdot 0,86 + 2,4 \cdot 0,14 = 1,4 \left(\frac{W}{mK} \right)$$

$$1,6 \cdot 0,86 + 3,2 \cdot 0,14 = 1,8 \left(\frac{W}{mK} \right)$$

pentru forajul cu 32% argilă și 68% nisip vom avea:

$$1,2 \cdot 0,32 + 2,4 \cdot 0,68 = 2 \left(\frac{MJ}{m^3K} \right)$$

$$1,6 \cdot 0,32 + 3,2 \cdot 0,68 = 2,7 \left(\frac{MJ}{m^3K} \right)$$

rezultă că $\lambda_M = 2,1 \left(\frac{MJ}{m^3K} \right)$

unde λ_M reprezintă conductivitatea termică a mediului (argilă + nisip).

Temperatura din sol la o adâncime de 50 m este considerată a fi 13°C iar la 100 m 15°C. Temperatura medie anuală din județul Timiș este ~11°C

3.3.2 Estimarea potențialului energiei geotermice (de mică adâncime) din județul Timiș

Pentru estimarea potențialului energiei geotermice (de mică adâncime) vom folosi următoarea relație

$$E_e = (\rho \cdot C)_M \cdot V \cdot \Delta T$$

unde:

$E_e [J]$ - potențialul energetic

$(\rho C)_m = 3,84 \left(\frac{MJ}{m^3K} \right)$ - capacitatea de căldură specifică a mediului (rocă plus apă)

$V - [m^3]$ volumul resursei

$V = A \cdot h - [m^3]$ volumul resursei

$A = 8679 \text{ km}^2$

$h = 100 \text{ m}$

$t_s = 15 - 17 [^\circ C]$ temperatura subteranului în timpul injecției de căldură

$t_m = 11 [^\circ C]$ temperatura subteranului nemodificată

$\Delta T = t_s - t_m - [K]$ reprezintă diferența dintre temperatura subteranului nemodificată și temperatura la care ajunge solul în timpul funcționării unui sistem de utilizare a energiei geotermice. Este cantitatea de căldură care poate fii extrasă/introdusă din sol. În cazul de față a fost introdusă o cantitate energie termică.

Valorile potențialului energiei geotermice din județul Timiș sunt prezentate în figurile 3.10 și 3.11.

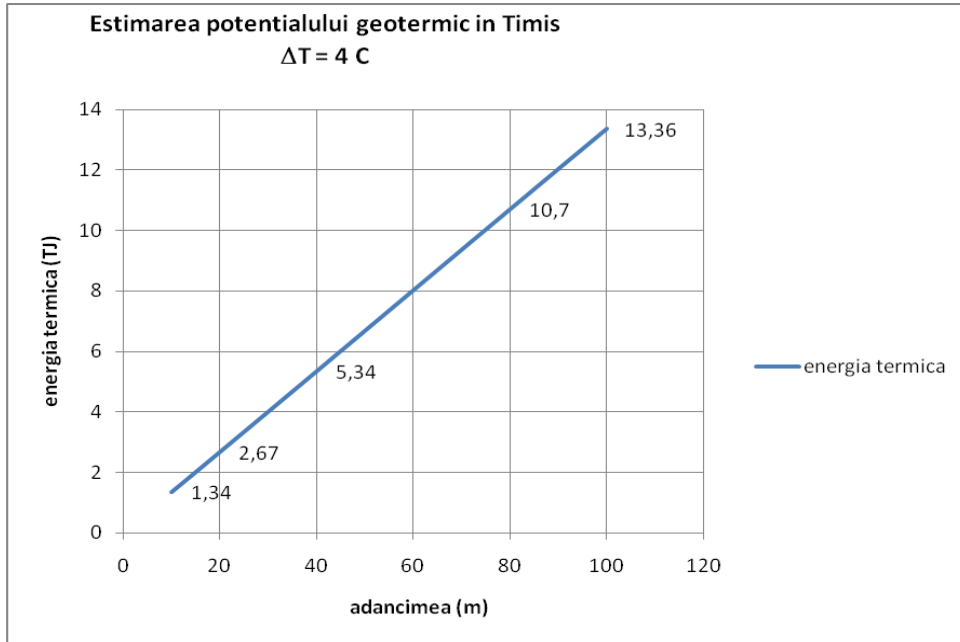


Fig. 3.10 Potențialul geotermic din județul Timiș

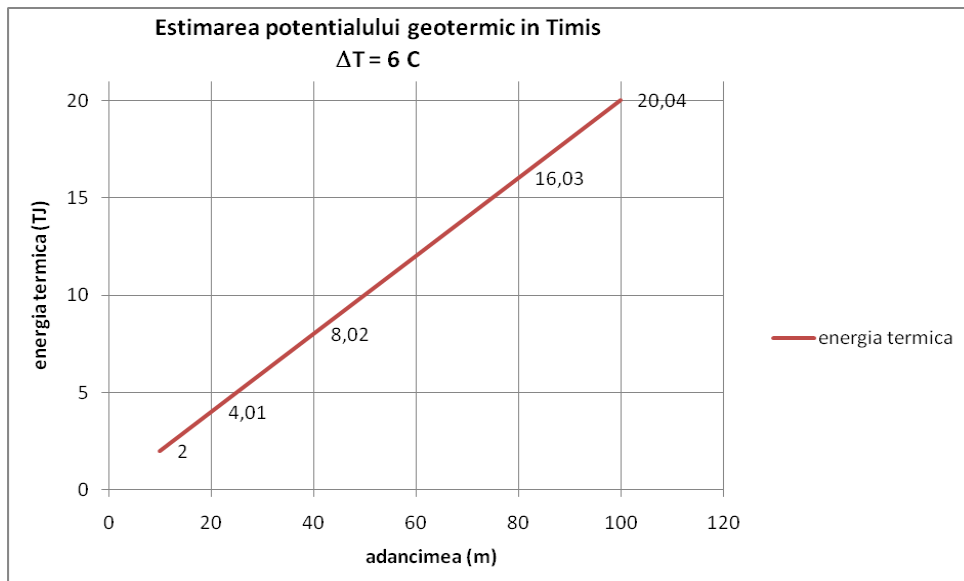


Fig. 3.11 Potențialul energetic al energiei geotermice din județul Timiș

În figura 3.10 este prezentat potențialul energetic al geotermiei de la 10 până la 100 de m când $t_s = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, iar în figura 3.11 reiese potențialul pentru $t_s = 17 \text{ }^\circ\text{C}$. Observăm că pentru o temperatură de $17 \text{ }^\circ\text{C}$ avem un potențial de 2 TJ de la 10 m adâncime. Pentru o adâncime de 40 m potențialul crește la 8,02 TJ. Acest lucru înseamnă că nu trebuie să avem foraje adânci, scumpe pentru a putea utiliza eficient

energia geotermică prin sistemele de utilizare geotermice prezentate în capitolul anterior.

Desigur potențialul energetic din subteran nu poate fi extras integral. La o rată de extragere de 15 - 30 % avem circa $0,3 \cdot 10^{12}$ J sau $2,4 \cdot 10^{12}$ J energie geotermică, disponibilă.

CAPITOLUL IV BAZELE MODELĂRII MATEMATICE, ECUAȚII GENERALE, FORMULAREA MATEMATICĂ A PROBLEMELOR PENTRU CÂMPUL TEMPERATURILOR ÎN MODELAREA SISTEMELOR GEOTERMALE

4.1 Parametrii caracteristici în cadrul proceselor de transfer de căldură în medii poroase

Descrierea proceselor de transfer de căldură în medii poroase impune prezentarea unor noțiuni de bază și parametrii.

Temperatura (Θ) reflectă media energiei cinetice totale a particulelor din materie (energie termică, căldură). Aceasta se măsoară în Kelvin (K) sau Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Transferul de căldură este energie termică care "curge" din regiuni cu temperatură mai ridicată către regiuni cu temperatură mai scăzută. În mediul poros, considerat ca mediu continuu ocupând spațiul tridimensional temperatura Θ ca funcție variabilă, va fi reprezentată ca fiind o funcție de spațiu x, y, z și de timp t :

$$\theta = \theta(x, y, z, t) \quad (4.1)$$

Conductivitatea termică (λ) este proprietatea materialelor care descrie capacitatea lor de a conduce energia termică. Conductivitatea termică este măsurată în watt per kelvin-metru ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-1}$; W/Km). Înmulțit cu o diferență de temperatură (în K) și o arie (în m^2) și împărțit cu o grosime (în m), conductivitatea termică prezice rata pierderii de energie (în W) printr-o secțiune de material

Capacitatea specifică de căldură (C), este cantitatea măsurabilă fizic ce caracterizează cantitatea de căldură necesară pentru a schimba temperatura unui corp cu o anumită valoare exprimată în Joule (J) per masa (kg) și Kelvin (K) (J/kgK). Pentru anumite aplicații se folosește căldura specifică volumetrică (ρC), care reprezintă capacitatea specifică de căldură pe unitatea volum ($\text{J/m}^3\text{K}$). Unde ρ reprezintă densitatea corpului (kg/m^3).

Difuzivitatea termică (a) reprezintă raportul dintre conductivitatea termică și căldura specifică volumetrică. Unitatea de măsură este (m^2/s)

$$a = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (4.2)$$

Substanțele cu difuzivitate termică ridicată își ajustează rapid temperatura cu cea a mediului din jurul lor deoarece conduc căldura mai rapid și nu au nevoie de multă energie din vecinătatea lor, pentru a atinge echilibrul termic.

Mărimile caracteristice ale mediului subteran (λ, ρ, C_p, a) se calculează în funcție de cele două componente ale mediului subteran (fluid și solid). Astfel pentru o mărime oarecare (ϕ) avem:

$$\phi = (1 - n)\phi_R + n\phi_w \quad (4.3)$$

unde indicele "w," reprezintă apa, iar indicele "R," reprezintă roca; Φ reprezintă variabila (ex. conductivitatea termică λ).

Unele valori ale parametrului, difuzivitate termică (a) pentru un sol cu porozitatea $n=0,2$

- Bazalt $a = (5,5 - 9,0) \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
- Calcar $a = (10,0 - 11,0) \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
- Gresie $a = (6,7 - 11,5) \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Putem nota faptul ca o valoare de $a = 8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ acoperă relativ bine toate tipurile de soluri pentru calcule estimative a problemelor de transfer de căldură în subteran

Tabel 4.1 Valori orientative pentru parametrii principale ai transferului de căldură din sol [60]

Tipuri de material	Conductivitate termică λ în $\left(\frac{W}{mK}\right)$	Căldura specifică volumetrică (ρC) în $\left(\frac{J}{m^3K}\right)$	Difuzivitate termică (a) în $\left(\frac{m^2}{s}\right)$
Bazalt	1,7-2,5	$(2,3-2,6) \times 10^6$	$(6,5-11,0) \times 10^{-7}$
Calcar	2,8	$(2,1-2,3) \times 10^6$	$(12,1-13,3) \times 10^{-7}$
Gresie	2,3	$(1,6-2,8) \times 10^6$	$(8,0-14,0) \times 10^{-7}$
Pietriș (uscat)	0,4	$1,5 \times 10^6$	$2,7 \times 10^{-7}$
Pietriș (umed)	1,8	$2,4 \times 10^6$	$7,5 \times 10^{-7}$
Nisip (uscat)	0,4-0,8	$(1,3-1,6) \times 10^6$	$(2,5-6,2) \times 10^{-7}$
Nisip (umed)	2,4-3,2	$(2,2-2,9) \times 10^6$	$(8,3-14,5) \times 10^{-7}$
Argilă (uscată)	0,8-2,0	$(1,4-3,0) \times 10^6$	$(2,7-7,1) \times 10^{-7}$
Argilă (umedă)	1,2-1,6	$(2,1-2,4) \times 10^6$	$(5,0-7,6) \times 10^{-7}$
Argilă prăfoasă (umedă)	1,7	$(1,6-3,4) \times 10^6$	$(5-15) \times 10^{-7}$
Apă	0,6	$4,2 \times 10^6$	$1,5 \times 10^{-7}$

4.2 Procese de transfer de căldură în medii poroase

Considerând ipoteza curgerii laminare și monofazice, prin analogie cu transferul de masă putem distinge 3 fenomene de transfer de căldură: conducția, convecția, dispersia.

4.2.1 Conducția termică

Conducția termică poate fi definită ca fiind transportul de căldură într-un mediu staționar prin difuziune datorită existenței unui gradient termic. Transferul de energie se face în ambele medii, solid și lichid. Pentru calcul putem astfel lua în considerare ambele medii ca unul unitar, sau calculăm separat fiecare mediu în parte. Ecuația fluxului de căldură este dată de legea lui Fourier.[36][62] Astfel, pentru mediu solid avem:

$$\vec{q}_{cs} = -\vec{\lambda}_s \nabla \theta \quad (4.4)$$

iar pentru mediul fluid:

$$\vec{q}_{cfl} = -\vec{\lambda}_n \nabla \theta \quad (4.5)$$

într-un mediu poros apă-rocă:

$$\vec{q}_c = -\vec{\lambda}_M \nabla \theta_M \quad (4.6)$$

unde

\vec{q}_c este vectorul fluxului de căldură prin conductie (în $\frac{J}{m^2s}$)

$\vec{\lambda}_M$ = tensorul conductivității termice solului (mediul poros M, matrice rocă-apă)

$\left(\frac{W}{mK}\right)$; $\lambda_M = (1 - n_p) \lambda_R + n_p \lambda_W$

n_p = porozitatea rocii (considerata de obicei constantă)

θ_M = temperatura mediului poros M (matrice rocă-apă) [°C]

4.2.2 Convecția termică

Convecția termică este definită ca fiind transferul căldură într-un mediu poros având ca mediu de transport un fluid în mișcare. Fluxul de căldură prin procesul de convecție se poate calcula cu ajutorul vitezei Darcy:

$$\vec{q}_{conv} = (\rho C)_w \vec{V}_{pw} \theta = n_p \vec{V}_{pw} (\rho C \theta)_w \quad (4.7)$$

unde :

\vec{q}_{conv} = vectorul fluxului de căldură prin convecție [J/m^2s]

$(\rho C)_w$ = căldura specifică volumetrică a fluidului [J/m^3K]

\vec{V}_{pw} = viteza de mișcare apei în pori, unde:

$$\vec{V}_{pw} = \frac{1}{n_p} \vec{V}_w \text{ [m/s]}$$

\vec{V}_w = viteza de infiltrație Darcy

4.2.3 Dispersia termică

Prin analogie cu dispersia cinematică a transferului de masă, numită și macrodispersie, dispersia termică este consecința eterogenității mediului și a

prezenței porilor. Pentru reprezentarea matematică a fluxului de căldură prin dispersie, o relație similară cu legea Difuziei Fick se poate presupune [8][9][62]

$$\vec{q}_{disp} = -n_p \vec{\bar{D}}_{ds} \nabla (\rho C \theta)_w \quad (4.8)$$

unde:

\vec{q}_{disp} = vectorul fluxului de căldură dispersiv [J/m²s]

$\vec{\bar{D}}_{ds}$ = tensorul de dispersie [m²/s]

n_p = porozitatea

În general în cadrul curgere acviferul în spațiu 3D tensorul de dispersie are 9 componente:

$$\vec{\bar{D}}_{ds} \Rightarrow \begin{bmatrix} D_{dsxx} & D_{dsxy} & D_{dsxz} \\ D_{dsyx} & D_{dsyy} & D_{dsyz} \\ D_{dszx} & D_{dszy} & D_{dszz} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Componentele coeficienților de dispersie pot fi exprimate utilizând componentele vitezei în pori (V_{px} , V_{py} , V_{pz}), dispersivitatea longitudinală (a_L) și respectiv, dispersivitatea transversală (a_T):

Cazuri practice de transfer de căldura prin dispersie:

$$\begin{aligned} D_{dsxx} &= a_L \frac{V_{px}^2}{V_{pw}} + a_T \frac{V_{py}^2 + V_{pz}^2}{V_{pw}} & D_{dsxy} = D_{dsyx} &= (a_L - a_T) \frac{V_{px} V_{py}}{V_{pw}} \\ D_{dsxz} = D_{dszx} &= (a_L - a_T) \frac{V_{px} V_{pz}}{V_{pw}} & D_{dsyy} &= a_L \frac{V_{ay}^2}{V_{pw}} + a_T \frac{V_{px}^2 + V_{pz}^2}{V_{pw}} \\ D_{dsyz} = D_{dszy} &= (a_L - a_T) \frac{V_{py} V_{pz}}{V_{pw}} & D_{dszz} &= a_L \frac{V_{pz}^2}{V_{pw}} + a_T \frac{V_{px}^2 + V_{py}^2}{V_{pw}} \end{aligned} \quad (4.10)$$

viteza în pori
 $V_{pw} = \sqrt{V_{px}^2 + V_{py}^2}$

- mișcare apei subterane în plan unidimensional ($V_{pz} = 0; V_{py} = 0; V_{px} = V_{pw}$) și dispersie bidimensională ($\theta = \theta(x, y, t)$) când tensorul de dispersie are numai doua componente:

$$\vec{\bar{D}}_{ds} \Rightarrow \begin{bmatrix} D_{Lds} & 0 \\ 0 & D_{Tds} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

D_{Lds} și D_{Tds} reprezintă coeficientul longitudinal și transversal de dispersie:

$$D_{Lds} = a_L V_{pw} \quad (4.12a)$$

$$D_{Tds} = a_T V_{pw} \quad (4.12b) \quad (4.12)$$

- mișcarea apei subterane în plan bidimensional ($V_{pz} = 0; V_{py} \neq V_{px} \neq 0$) și dispersie bidimensională ($\theta = \theta(x, y, t)$) când tensorul de dispersie are următoarele componente:

$$D_{dsxz} = D_{dszx} = D_{dsyz} = D_{dszy} = D_{dszz} = 0 \Rightarrow \vec{\vec{D}}_{ds} \Rightarrow \begin{bmatrix} D_{dsxx} & D_{dsxy} \\ D_{dsyx} & D_{dsyy} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Aceste componente pot fi exprimate după cum urmează:

$$\begin{aligned} D_{dsxx} &= a_L \frac{V_{px}^2}{V_{pw}} + a_T \frac{V_{py}^2}{V_{pw}}; \\ D_{dsxy} = D_{dsyx} &= (a_L - a_T) \frac{V_{px} V_{py}}{V_{pw}}; \\ D_{dsyy} &= a_L \frac{V_{py}^2}{V_{pw}} + a_T \frac{V_{px}^2}{V_{pw}}; \end{aligned} \quad (4.14)$$

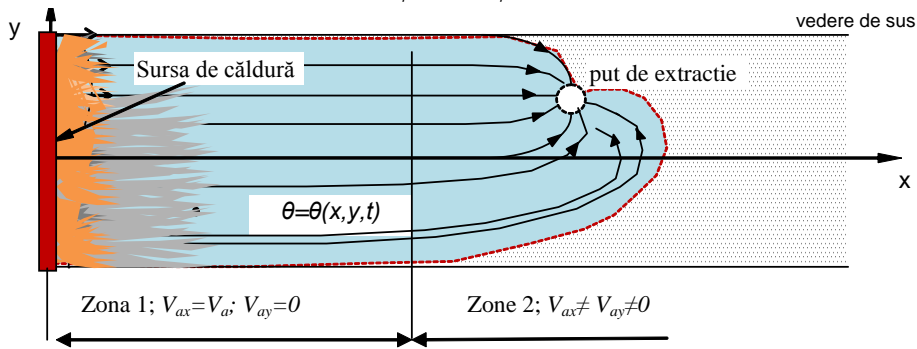


Fig. 4.1 Mișcarea apei subterane 2D ($V_p = V_p(x, y)$), dispersia căldurii 2D

$$\Theta = \Theta(x, y, t)$$

Variabilele introduse, denumite coeficient de dispersivitate (a_L și a_T) depind de caracteristicile acviferului și de mărimea ariei de transfer de căldură. Următoarele valori pentru dispersivitatea longitudinală a_L sunt orientative și pot fi folosite în funcție scara de lungime la care se vrea stabilirea dispersiei:

Tabel 4.2 Valori ale dispersivității longitudinale

Scara de lungime L (m)	1	10	100
Dispersivitatea a_L	0,02	0,3	1-2

Dispersivitatea transversală se calculează în general după $a_T = 0,1a_L$

Astfel fluxul total de căldură care include fluxul convectiv de căldură, fluxul de căldură al conductivității termice și fluxul de căldură dispersiv este exprimat prin următoarea relație:

$$\vec{q}_H = \vec{q}_c + \vec{q}_c + \vec{q}_{ds} = n_p \vec{V}_{pw} (\rho C \theta)_w - \lambda_M \nabla \theta_M - n_p \vec{D}_{ds} \nabla (\rho C \theta)_w \quad (4.15)$$

Ecuțiile de mai sus, descriu procesele de transport de căldură, iar în continuare vor fi folosite pentru a deduce ecuația de bază.

4.3 Ecuații de bază ale transferului de căldură în medii poroase

4.3.1 Derivarea ecuației generale a transferului de căldură

Considerăm un material într-un mediu poros care corespunde volumului V funcție de timpul t care este limita la suprafața A funcție de timpul t : $V(t) \subset R^3$; $A(t)$

Se consideră următoarele funcții:

- cantitatea de căldură totală dintr-o unitate de volum compusă din o matrice rocă-apă $e_H(x, y, z, t)$ [J/m^3]

$$e_H = (\rho C \theta)_M \quad (4.16)$$

- sursa de energie termică per unitate de volum și unitate de timp σ_{HS} în [J/m^3s]

- fluxul de căldură total $\vec{q}_H(x, t, z, t)$ de la 4.15

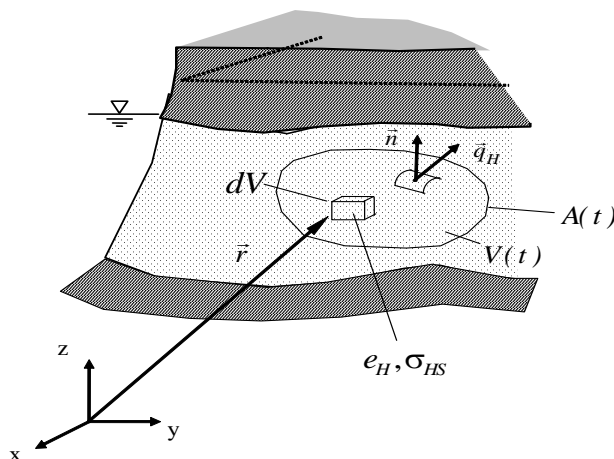


Fig. 4.2 Schiță de principiu a derivării ecuației transferului de căldură în medii poroase. raport David

Aplicabile sunt:

- principiul generalizat al conservării energiei termice pentru materialul $V(t)$ limitat de aria $A(t)$:
-

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} e_H dV = \int_{V(t)} \sigma_{HS} dV \quad (4.17)$$

- teorema transportului pentru „ e_H ” ca funcție generalizată a densității

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} e_H dV = \int_{V(t)} \frac{\partial e_H}{\partial t} dV + \int_{A(t)} \vec{n} \cdot \vec{q}_H dA \quad (4.18)$$

Vectorul fluxului de căldură poate fi exprimat astfel:

$$\vec{q}_H = e_H \vec{v}_H = e_H \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (4.19)$$

Aplicând aceste relații putem obține:

$$\int_{V(t)} \frac{\partial e_H}{\partial t} dV + \int_{A(t)} \vec{n} \cdot \vec{q}_H dA = \int_{V(t)} \sigma_{HS} dV \quad (4.20)$$

Folosind teorema lui Gauss pentru termenul al doilea în ecuația (4.20) rezultă:

$$\int_{V(t)} \left[\frac{\partial e_H}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q}_H - \sigma_{HS} \right] dV = 0 \quad (4.21)$$

Din moment ce $V(t)$ este un volum arbitrar, rezultă că integrantul este nul:

$$\frac{\partial e_H}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q}_H - \sigma_{HS} = 0 \quad (4.22)$$

Aceasta este **forma generală a ecuației transferului de căldură** într-o matrice rocă-apă în cazul în care matricea este imobilă.

Înlocuind e_H din (4.16) și vectorul fluxului total de căldură din (4.15) vom obține următoarea formă explicită a ecuației transferului de căldură:

$$\frac{\partial (\rho C \theta)_M}{\partial t} + \nabla \cdot \left[n_p \vec{v}_{pw} (\rho C \theta)_w - \lambda_M \nabla \theta_M - n_p \vec{D}_{ds} \nabla (\rho C \theta)_w \right] = \sigma_{HS} \quad (4.23)$$

$\theta(x, y, z, t)$ este funcția de bază a transferului de căldură (în general necunoscută) și reprezintă temperatura din mediul poros (ex. subteranul).

Pentru a simplifica versiunea de bază a ecuației, pentru a rezolva probleme practice de transfer de căldură, avem nevoie de ipoteze și notații suplimentare

- Este, de obicei, acceptată ipoteza că pentru a modela practic probleme geotermice, parametrii cei mai importanți (cum ar fi căldura specifică, conductivitatea termică) sunt constanți.

$$(\rho C)_M = \text{constant}; (\rho C)_W = \text{constant}; \lambda_M = \text{constant} \quad (4.24)$$

- Distribuția temperaturii are următoarele proprietăți:

$$\frac{\partial \theta_M}{\partial t} \approx \frac{\partial \theta_W}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \text{ si } \nabla \theta_W = \nabla \theta \quad (4.25)$$

- Factorul de retardare termic este definit ca fiind:

$$R = \frac{(\rho C)_M}{n_p (\rho C)_W} = \frac{n(\rho C)_W + (1-n)(\rho C)_R}{n_p (\rho C)_W} = 1 + \frac{(1-n_p)}{n_p} \cdot \frac{(\rho C)_R}{(\rho C)_W} \quad (4.26)$$

- Difuzia termică aparentă datorită conductivității:

$$D_c = \frac{\lambda_M}{n_p (\rho C)_W} \quad (4.27)$$

- Tensorul dispersie/difuziei totale conține și efectul conductivității și al dispersiei:

$$\vec{\vec{D}}_{\Sigma D} = D_c \vec{\vec{I}} + D_{ds} \quad (4.28)$$

unde $\vec{\vec{I}}$ este tensorul unitate, pentru tensorul dispersiei D_{ds}

- Este de asemenea considerată ecuația de continuitate pentru mișcarea apei incompresibilă :

$$\nabla \cdot \vec{V}_W = 0 \Rightarrow \nabla \cdot n_p \vec{V}_{pw} = n_p \nabla \cdot \vec{V}_{pw} = 0 \Rightarrow \nabla \cdot \vec{V}_{pw} = 0 \quad (4.29)$$

Cu aceste ipoteze și notații ecuația generală care guvernează transferul de căldură în medii poroase se poate scrie sub următoarea formă:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\vec{V}_{pw}}{R} \cdot \nabla \cdot \theta - \nabla \cdot \left(\frac{\vec{\vec{D}}_{\Sigma D}}{R} \cdot \nabla \theta \right) = \sigma_{HS} \quad (4.30)$$

Această ecuație reprezintă distribuția temperaturii într-un rezervor geotermal luând în considerare toate procesele importante de transfer de căldură: conducție, convecție și dispersie datorită mișcării apei subterane. Este important de notat că determinarea distribuției temperaturii $\Theta(x,y,z,t)$ este principalul obiectiv al unei modelări de transfer de căldură. Pentru aceasta este necesar ca primul pas să fie aflarea vitezei mișcării apei subterane $\vec{V}_{pw}(x,y,z,t)$ apoi rezolvarea scenariilor ecuației transferului de căldură (4.30) care trebuie să fie cuplată cu ecuațiile mișcării apei subterane. Pentru probleme practice, de cele mai multe ori, este suficient să considerăm mișcarea liniară, datorită faptului că mișcarea apei subterane este neliniară doar în perioade foarte scurte (la începutul perioadei și la sfârșitul perioadei

de exploatare a rezervorului geotermal). În aceste condiții, în continuare se va folosi următoarea ecuație a mișcării apei subterane:

$$\nabla \cdot (\vec{k} \cdot \nabla h) = \sigma_{ws} \quad (4.31)$$

în cazul general de mediu poros anizotrop, sau

$$\nabla \cdot (k \nabla h) = \sigma_{ws} \quad (4.31^*)$$

în cazul mediului poros omogen

unde :

\vec{k} este tensorul conductivității hidraulice în cazul mediului poros anizotrop

$k = k(x, y, z)$ în cazul mediului poros izotrop și neomogen;

$k = \text{constant}$ în cazul mediului poros izotrop și omogen

σ_{ws} - sursa apei subterane

$h(x, y, z)$ este funcția înălțimii piezometrice;

4.3.2 Forme particulare al ecuației generale

Rezolvarea problemelor în aplicațiile de exploatare a rezervoarelor de energie geotermală impune utilizarea unor *forme particulare* (forme particulare ale mișcării și transferului de căldură) ale ecuației generale (4.30) care vor fi prezentate mai jos.

Mișcarea bidimensională (2D) a acviferului și mișcarea bidimensională (2D) a transferului de căldură ne interesează în cadrul rezervoarelor geotermale.

În acest caz ecuația de bază a transferului de căldură (4.30) poate fi scrisă utilizând notații scalare de forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{V_{pwx}}{R} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{V_{pwy}}{R} \frac{\partial \theta}{\partial y} - \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\Sigma xx} \frac{\partial \theta}{\partial x} + D_{\Sigma xy} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) - \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{\Sigma yx} \frac{\partial \theta}{\partial x} + D_{\Sigma yy} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) = \sigma_{HS}$$

$$\theta = \theta(x, y, t)$$

$$D_{\Sigma xx} = D_c + D_{dsxx}; \quad D_{\Sigma yy} = D_c + D_{dsyy}$$

$$D_{\Sigma xy} = D_{\Sigma yx} = D_{dsxy} = D_{dsyx};$$

(4,32)

Pentru D_{dsxx} , D_{dsyy} and $D_{dsxy} = D_{dsyx}$ vezi (4.14)

Pentru D_c is valid (4.27)

Pentru mișcarea bidimensională a acviferului, avem următoarea ecuație de bază obținută din (4.31*):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) = q_{ws} \quad (4.33)$$

cu $T = k\tilde{h}_w$ fiind transmisivitatea acviferului, având conductivitatea hidraulică k și medie a adâncimii \tilde{h}_w
 $h(x,y)$ fiind înălțimea piezometrică

În cazul mișcării unidimensionale (1D) a acviferului și bidimensionale (2D) a transferului de căldură următoarele înlocuiri au loc:

$$\begin{aligned} V_{pwx} &= V_{pw}, \quad V_{pwy} = 0 \\ D_{\Sigma xx} &= D_c + a_L V_{pw}, \quad D_{\Sigma yy} = D_c + a_T V_{pw}, \quad D_{\Sigma xy} = D_{\Sigma yx} = 0 \end{aligned} \quad (4.34)$$

Rezultă că ecuația transferului de căldură ia următoarea formă:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{V_{pw}}{R} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\Sigma xx} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{\Sigma yy} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) = \sigma_{HS} \quad (4.35)$$

$$\theta = \theta(x, y, t)$$

Pentru a rezolva probleme ale aplicațiilor de exploatare a energiei geotermice este necesar să folosim ecuații în coordonate polare, mai ales când modelăm puțuri de extracție și reinjecție a apei subterane.

În acest caz ecuația (4.30) devine:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{V_{rpw}}{R} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{D_{\Sigma D}}{R} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) &= \sigma_{HS} \\ \theta = \theta(r, t); \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} & \\ D_{\Sigma D} = D_c + D_{ds} ; \quad D_c = \frac{\lambda_M}{n_p(\rho C)_w} ; \quad D_{ds} = a_L V_{rpw} & \end{aligned} \quad (4.36)$$

V_{rpw} este viteza în pori având o direcție radială

4.3.3 Ecuatii simplificate depinzând de importanța proceselor conductive/convective

În modelarea proceselor de transfer de căldură, pentru rezolva probleme practice ale utilizării energiei geotermale putem neglija anumite forme de transfer de căldură. Astfel putem deosebi doua cazuri.

Cazul 1: Transportul convectiv este neglijabil în comparație cu transportul conductiv. Acest lucru se întâmplă când mișcarea apei subterane este neglijabilă în comparație cu transferul de căldură conductiv.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{\vec{D}_c}{R} \cdot \nabla \theta \right) = \sigma_{HS} \quad (4.37)$$

Cazul 2: Transportul conductiv de căldură este neglijabil în comparație cu transportul convectiv. Situația se întâlnește când acviferul este extras ca furnizor de energie termică.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\vec{V}_{pw}}{R} \nabla \cdot \theta - \nabla \cdot \left(\frac{\vec{D}_{ds}}{R} \nabla \theta \right) = \sigma_{HS} \quad (4.38)$$

Daca dispersia convectivă este neglijabilă ecuația de bază devine:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\vec{V}_{pw}}{R} \nabla \cdot \theta = \sigma_{HS} \quad (4.39)$$

4.3.4 Evaluarea dispersiei pentru probleme practice

Dispersia (aparentă) termică (D_c) datorită conducției poate fi calculată utilizând relația (4.27) Pentru aceasta avem nevoie de valorile conductivității termice din tabelul 4.1 pentru roci și sol (bazalt, calcar, gresie, nisip umed, argilă). Din tabel luăm valoarea medie a conductivității termice a acestor roci, $\lambda_M = 2,2$ W/mK. Având conductivitatea termică a apei $\lambda_w = 0,6$ W/mK și porozitatea $n_p = 0,2$ obținem media conductivității termice a matricei saturate rocă-apă:

$$\lambda_M = n_p \lambda_w + (1 - n_p) \lambda_R = 0,2 \cdot 0,6 + (1 - 0,2) \cdot 2,2 = 1,88 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \quad (4.40)$$

$$\Rightarrow D_c = \frac{\lambda_M}{n_p (\rho C)_w} = \frac{1,88}{0,2 \cdot 4,2 \cdot 10^6} = 2,24 \cdot 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (4.40)$$

Pentru a evalua magnitudinea dispersiei mecanice (D_{ds}) datorită mișcării apei subterane se consideră trei scări de lungimi, 1m, 10m și 100m. Aceste pot lungimii corespunde cu zona învecinată unui puț de extracție/injecție (1m), aria învecinată unui foraj (10m) și o arie distantă (100m). Conform acestor distanțe se consideră câteva valori realiste diferite ale înălțimii piezometrice: 1/5 la o arie de 1m, 1/50 la 10m și 1/500 la arie de 100m. Conductivitatea hidraulică este ($k=10^{-5}$ m/s) iar porozitatea $n_p = 0,2$. Utilizând aceste valori, în tabelul 4.3 valorile calculate ale ambelor dispersii. S-a folosit valori ale dispersivității din tabelul 4.2 și legea lui Darcy, formula dispersiei (4.12a) și (4.27).

Din aceste evaluări ale coeficienților de dispersie putem vedea, că, pentru valorile medii ale parametrilor-cheie care apar în aplicații practice, dispersia mecanică D_{ds} este de aproximativ 10 ori mai mic decât D_c dispersie termica aparentă.

Tabel 4.3 Valori ale coeficientului de dispersiei

Lungimea	1 m	10 m	100 m
Coeficient de dispersivitate a	0,02	0,3	1,0
Gradientul pierderea înălțimii piezometrice $I = \Delta h / \Delta L$	1/5	1/50	1/250
Viteza în pori $V_{pw} = 1/n_p * kI$	10^{-5} m/s	10^{-6} m/s	10^{-7} m/s
Dispersia datorită mișcării apei subterane $D_{ds} = a_L V_{pV}$	$2 * 10^{-7}$ m ² /s	$3 * 10^{-7}$ m ² /s	$2 * 10^{-7}$ m ² /s
Valoarea medie a coeficientului de dispersie: $D_{ds} = 2,3 * 10^{-7}$ m ² /s			

Chiar și cu viteze mai mari în pori, când D_{ds} atinge o valoare mai mare, rămâne relativ mic. Cu toate acestea, se recomandă întotdeauna să se estimeze atât dispersia mecanică, cât și cea aparentă și să se i-a în considerare parametrii câmpului reală și condițiile reale de curgere.

Pentru factorul de întârziere R putem lua valorile din tabelul 4.1.

Valoarea medie a căldurii specifice pentru rocă $(\rho C)_R \cong 2,2 \text{ J} / \text{m}^3 \text{K}$, pentru apă $(\rho C)_w = 4,2 \text{ J} / \text{m}^3 \text{K}$, iar pentru porozitate $n_p = 0,2$.

Astfel factorul de întârziere R este:

$$R = 1 + \frac{1 - n_e}{n_e} \cdot \frac{(\rho C)_R}{(\rho C)_w} = 3,1$$

Se poate observa că există similarități între ecuația transferului de căldură în medii poroase și ecuația transportului de poluant în medii poroase. Ecuația (4.30) este similară cu ecuația transportului poluantului în acvifer, doar sensul fizic la simbolurilor este diferit:

Transfer de căldură $\theta(x, y, z; t)$ – distribuția temperaturii

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\vec{V}_{pw}}{R} \cdot \nabla \cdot \theta - \frac{1}{R} \nabla \cdot (\vec{D}_{\Sigma D} \cdot \nabla \theta) = \sigma_{HS}$$

$$\vec{D}_{\Sigma D} = D_{cd} \vec{I} + \vec{D}_{ds}$$

 D_c difuzia termica aparentaprin conductie ($\frac{\lambda_M}{(\rho C)_M}$) \vec{D}_{ds} dispersia caldurii datorita
miscarea apei subterane(ex. cazul 1D $\|\vec{D}_{ds}\| = D_W = \alpha_L V_{pw}$) R factorul de intarziere termica

$$R = 1 + \frac{1 - n_p}{n_p} \cdot \frac{(\rho C)_R}{(\rho C)_W}$$

transport de poluanți $c(x, y, z; t)$ – distribuția concentrației

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\vec{V}_{pw}}{R} \cdot \nabla \cdot c - \frac{1}{R} \nabla \cdot (\vec{D}_{\Sigma D} \cdot \nabla c) = \sigma_{HS}$$

Tensorul difuziei/dispersie soluției

$$\vec{D}_{\Sigma D} = D_m \vec{I} + \vec{D}_{ds}$$

 D_m coeficientul de
difuzie moleculara \vec{D}_{ds} dispersia solutie datorita
miscarii acviferului(ex. cazul 1D $\|\vec{D}_{ds}\| = D_W = \alpha_L V_{pw}$) R factorul de intarziere datorita adsorbției

$$R = 1 + \frac{1 - n_p}{n_p} \rho_k \frac{c_a}{c}$$

 ρ_k densitatea roci (piatra) c_a concentratia fazei adsorbite

Prin similaritatea acestor două ecuații putem utiliza aceleași soluții de bază și aceleași metode, incluzând produse software cu precizarea că este necesar notarea corectă a corespondenței parametrului și sensul lui fizic.

CAPITOLUL V – METODE DE REZOLVARE ȘI SOLUȚII ALE MODELULUI MATEMATIC

5.1 Aspecte generale

Analogie/echivalența dintre procesul mișcării apei prin mediile poroase și transferul de căldură prin mediile poroase ne permite să folosim soluții analitice și numerice (programe de calcul) dintr-un domeniu pentru a studia procese din alt domeniu. Astfel ca exemplu se pot folosi programe de calcul cunoscute și aplicate în cadrul modelării mișcării în medii poroase pentru studiul (modelarea) proceselor de transfer conductiv de căldură. Această analogie a fost aplicată în cadrul tezei.

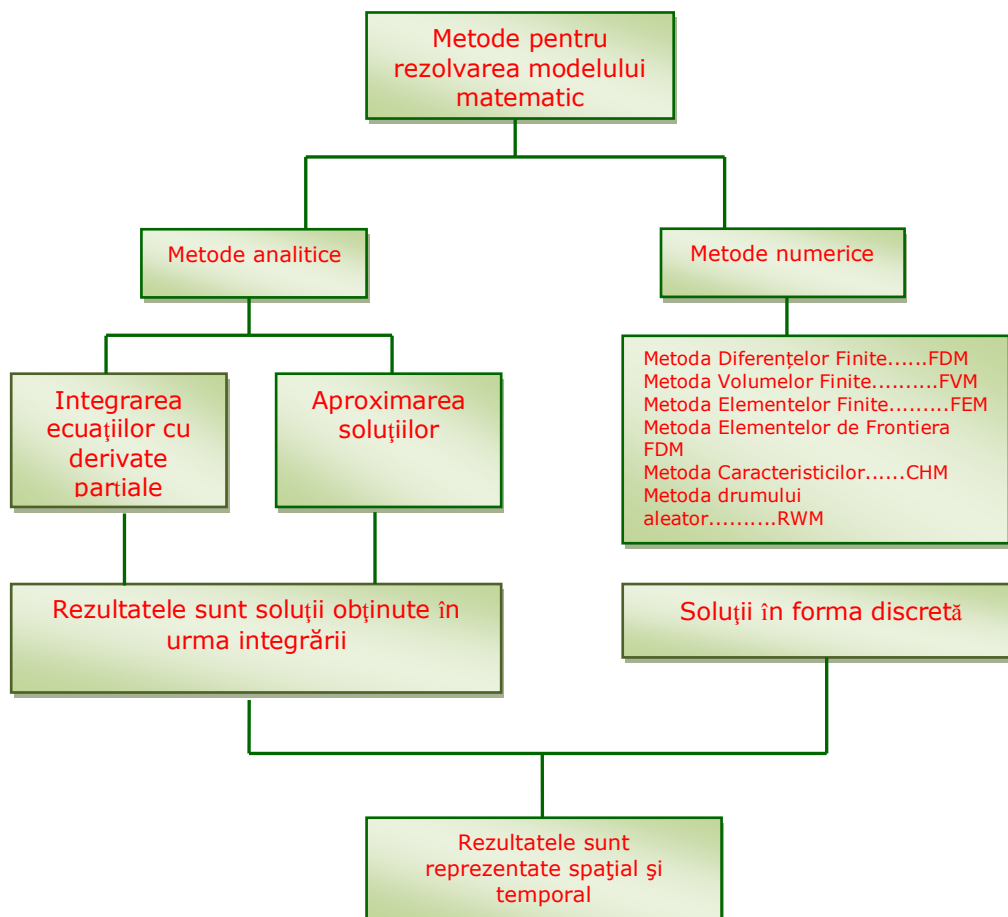


Fig. 5.1 Metode de rezolvare a modelului matematic [22]

Pentru a rezolva un model matematic avem la dispoziție două metode:

- metoda analitică, care permite o simplificare a sistemului real și o rezolvare rapidă, în cazul în care parametrii din zona studiată nu variază sau condițiile de margine, complexe;
- metoda numerică permite variația parametrilor și a condițiilor de margine astfel încât modelul numeric să corespundă cât mai bine cu sistemul real;

Există mai multe tipuri de metode analitice și numerice pentru a rezolva un model analitic:

Fiecare dintre cele două metode are avantaje și dezavantaje. Metoda analitică permite rezolvarea unor domenii mici, omogene permițând simplificarea majoră a sistemului real obținând rezultate exacte. În schimb, când sistemul real conține parametrii variabili ce nu pot fi neglijați sau considerați constanți metoda analitică nu poate fi folosită.

Metoda numerică permite modelarea unui sistem cât mai apropiat de cel real (parametrii variabili din sistem, geometria sistemului, condițiile de margine) dar rezultatul obținut nu poate fi considerat exact, ci doar o aproximare a răspunsului real al sistemului.

5.2 Metoda analitică, soluții

Pentru a obține o soluție a procesului de transfer de căldură dintr-un rezervor geotermal (ex. distribuția temporală și spațială a temperaturii) trebuie definită problema urmărind puncte cheie, specifice procesului care urmează a fi studiat. Acestea sunt:

- Schematizarea ariei luate în calcul
- Stabilirea proprietăților acviferului caracteristice transferului de căldură (ex. porozitatea n_p , conductivitatea termică λ , capacitatea specifică volumetrică (ρC))
- Condițiile inițiale și la limită (ex cunoașterea condițiilor de la începutul procesului la $t = 0$ și la marginea ariei schematizate unde are loc procesul de transfer de căldură)
- Forma particulară a ecuației de bază a proceselor de transfer de căldură în concordanță cu problema schematizată.

Având aceste puncte specifice stabilite, obținem ecuații cu derivate parțiale care rezolvă procesul de transfer de căldură considerat.

Precum spuneam mai sus avem nevoie de a stabili domeniul de discretizare. În cazul tezei a fost luat ca domeniu de discretizare perimetrul din jurul unui schimbător de căldură din incinta firmei Merkapt.

În continuare se prezintă parametrii caracteristici acestui domeniu. Acești parametrii se calculează în funcție de cele două componente ale mediului subteran: solid și fluid.

- Capacitatea specifică de căldură (**C**)

$$[C] = \frac{J}{kgK}$$

- Difuzivitatea termică (α)

$$[a] = \frac{m^2}{s}$$

- Conductivitatea termică (λ)

$$[\lambda] = \frac{W}{mK}$$

- Densitatea (ρ)

$$[\rho] = \frac{kg}{m^3}$$

De exemplu pentru pământ umed ce conține proporții diferite de nisip argilă, argilă nisip avem un coeficient al conductivității termice care variază între

$$\lambda_{pământ} = 1,2 - 3,2 \left(\frac{W}{mK} \right) \text{ iar } (\rho C)_{pământ} = 2,1 - 2,4 \left(\frac{MJ}{m^3K} \right) \text{ astfel din relația (4.2)}$$

$$\alpha_{pământ} = \frac{\lambda_{pământ}}{(\rho C)_{pământ}}$$

$$\Rightarrow \alpha_{pământ} = (5,71 \div 13,33) \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

Dacă există apă subterană efectul acesteia va apărea prin intermediul porozității. astfel o porozitatea de 20% va însemna că:

$$\lambda_M = n_p \cdot \lambda_{apa} + (1 - n_p) \cdot \lambda_{pământ} \quad \lambda_M = n_p \cdot \lambda_{apa} + (1 - n_p) \cdot \lambda_{pământ}$$

$$\lambda_M = 0,2 \cdot 0,6 + (1 - 0,2) \cdot 1,2 \text{ sau } \lambda_M = 0,2 \cdot 0,6 + (1 - 0,2) \cdot 3,2$$

$$\lambda_M = 1,1 \frac{W}{mK} \quad \lambda_M = 1,88 \frac{W}{mK}$$

$$\lambda_{apă} = 0,6 \frac{W}{mK} \text{ iar } (\rho C)_{apă} = 4,2 \frac{MJ}{m^3K}$$

$$\Rightarrow \alpha_{apă} = 1,43 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

Pentru capacitatea de căldură specifică volumetrică a mediului (rocă + apă) devine:

$$\begin{aligned}
(\rho C)_M &= n_p \cdot (\rho C)_{ap\acute{a}} + (1 - n_p) \cdot (\rho C)_{p\acute{a}m\acute{a}nt} \\
\text{iar } (\rho C)_M &= 0,2 \cdot (4,2 \cdot 10^6) + (1 - 0,2) \cdot 2,1 \\
(\rho C)_M &= 2,52 \frac{MJ}{m^3K} \\
\Rightarrow a_M &= (4,37 \div 7,46) \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}
\end{aligned}$$

unde a_M reprezintă difuzivitatea termică a mediului (rocă + apă)
 λ_M reprezintă conductivitatea termică a mediului (rocă + apă)
 $(\rho C)_M$ reprezintă capacitatea termică specifică volumetrică a mediului (rocă + apă).

Pentru modelarea câmpului de temperatură în zona sistemelor geotermice cu schimbătoare de căldură cu sistem închis este suficient să se ia în considerare ecuația transferului de căldură prin conducție într-un mediu cu caracteristici termice constante (mișcarea apei și dispersia lipsește):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla \cdot \nabla \theta \quad (5.1)$$

unde $\theta = \theta(x, y, z)$ câmpul de temperatură

Neglijând gradientul de căldură de-a lungul sondei și considerând un mediu omogen, ecuația (5.1) se poate scrie, în coordonate polare, sub forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (5.2)$$

unde câmpul de temperatură $\theta(r, t)$ este o funcție de poziția punctului

$(r = \sqrt{x^2 + y^2})$ - distanța radială, , temperatura θ ; $\infty \leq r \leq r_s$

Pentru determinarea soluției fundamentale corespunzătoare unei sonde se iau în considerare următoarele condiții la limită și de margine.

Condiții inițiale:

$$t = 0, \theta(x, y, t = 0) = \theta_0,$$

Condiții la limită

$$\begin{aligned}
r = r_s : & \quad 2\pi r_s m \lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} = \begin{cases} Q_\theta, & t \leq t_f \\ 0, & t > t_f \end{cases} \\
r \rightarrow \infty : & \quad \theta = \theta_0
\end{aligned}$$

unde t_f = timpul de funcționare (extracție/injecție căldură)

adică din sondă se extrage un "debit" Q în $[W]$ de căldură pe unitatea de lungime de sondă (Q în $\frac{W}{m}$ lungime sondă).

O alta formulare a condiției la limită cu funcția Dirac

$$2\pi r_s m \lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=r_s} = Q_\theta [1 - \delta(t - t_F)]$$

$$\delta(t - t_F) = \begin{cases} 0, & t < t_F \\ 1, & t \geq t_F \end{cases}$$

când Q_θ este dat

$$\Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=r_s} = \frac{Q_\theta}{2\pi r_s m \lambda}$$

condiția de tip Neumann

Când avem extragere de căldura $Q_\theta < 0$;

Când avem injecție de căldură $Q_\theta > 0$

Obs. Cu ajutorul unui schimb de variabilă:

$$\theta(r, t) - \theta_0 = \xi(r, t)$$

Problema la limita se poate reformula în "xi"

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial r} \right) \quad (5.3)$$

Astfel având condițiile inițiale:

$$t = 0; \quad \xi(r, t = 0) = 0$$

și condițiile la limită:

$$r = r_s : \quad \frac{\partial \xi}{\partial r} \Big|_{r=r_s} = \frac{Q_\theta}{2\pi r_s m \lambda} [1 - \delta(t - t_F)]$$

$$r \rightarrow \infty : \quad \xi \rightarrow 0$$

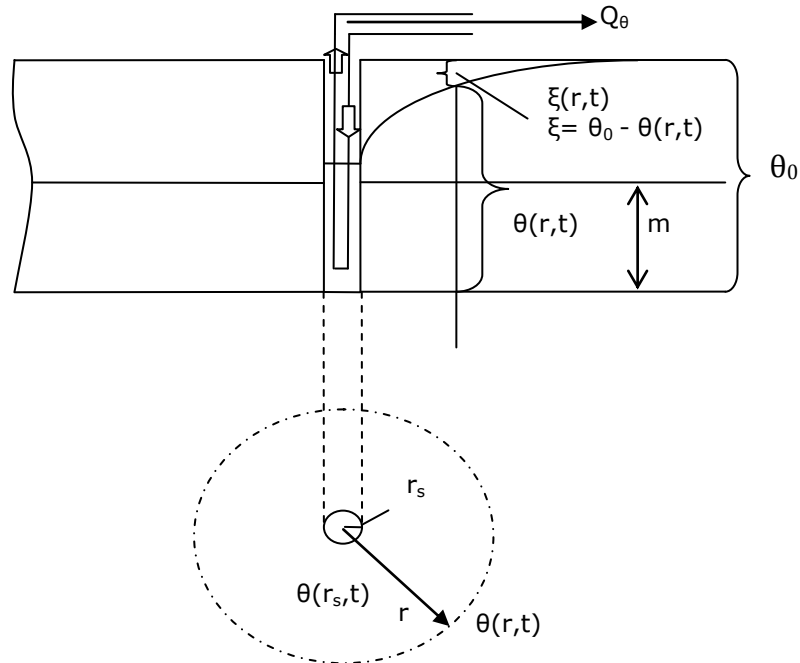


Fig. 5.2 Câmpul termic exterior sondelor

unde:

Q_θ – "debitul" de căldură extras [J/s]

r_s – raza sondei

$\theta(r,t)$ – temperatura [°C] la distanța r și timpul t

r – distanța dintre sondă și un punct oarecare

θ_0 – temperatura neperturbată a mediului

În figura 5.1 avem reprezentat un foraj din care extragem energie termică. Figura schematizează fenomenul de transfer de căldură când extragem energie termică

Soluția fundamentală a ecuației (5.3) având condițiile inițiale și condițiile la limită, pentru o sondă, este de forma:

$$\begin{aligned} \xi_F(r,t) &= \mp \frac{|Q|}{4\pi\lambda m} E_I\left(-\frac{r^2}{4at}\right), \text{ pentru } t \leq t_F \\ \xi_R(r,t) &= \mp \frac{|Q|}{4\pi\lambda m} \left[E_I\left(-\frac{r^2}{4at}\right) - E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t-t_F)}\right) \right], \text{ pentru } t > t_F \end{aligned} \quad (5.4)$$

unde:

$\xi_{F,R}(r,t)$ – temperatura în punctul oarecare M situat la distanța r de sondă, în timpul funcționării/staționării sistemului, la momentul t ;

λ – coeficientul de conductivitate termică a mediului;

Q – "debitul" de căldură pe unitatea de lungime a sondei;

λ – conductivitatea termică.

Semnul (\mp) se refera la sistemele de încălzire (-) respectiv de răcire (+)

$$\text{Notând cu } E_I = \left(-\frac{r^2}{4at} \right) = E_I(-\xi)$$

$E_I(-\xi)$ fiind integrala exponențială:

$$\begin{aligned} E_I(\xi) &= \int_{\xi}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx & (5.5) \\ 0 &\leq \xi \leq \infty \\ -\infty &\leq E_I(-\xi) \leq 0 \end{aligned}$$

Relația (5.5), este dată în grafice sau tabele destul de complicate. În literatură găsim aproximări pentru această integrală [13]

$$E_I(\xi) = \ln(\gamma\xi) - \xi + \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n \frac{\xi^n}{n \cdot n!} \quad (5.6)$$

unde $\gamma = 1,781$ - constanta lui Euler

În literatură găsim aproximări pentru $E_I(\xi)$

$$E_I(-\xi) = \ln \gamma \xi = \ln \left(\frac{1,781 \cdot r^2}{4at} \right) \cong \ln \left(0,45 \frac{r^2}{at} \right) \quad (5.7)$$

valabil doar în cazul în care:

$$E_I(-\xi) \leq 0,065$$

Pentru $E_I(\xi)$ s-a stabilit o aproximație proprie, pentru :

$$E_I(-\xi) = \begin{cases} E_1(-\xi) = \ln \left(1,54 \frac{r^2}{4at} \right) = \ln(1,54\xi) = \ln \left(\frac{0,65}{\xi} \right), \text{ pentru } \xi \leq 0,2 \\ E_2(-\xi) = \frac{1,25}{\exp \left[2 \cdot (\xi - 0,2)^{0,82} \right]}, \text{ pentru } \xi \geq 0,2 \end{cases} \quad (5.8)$$

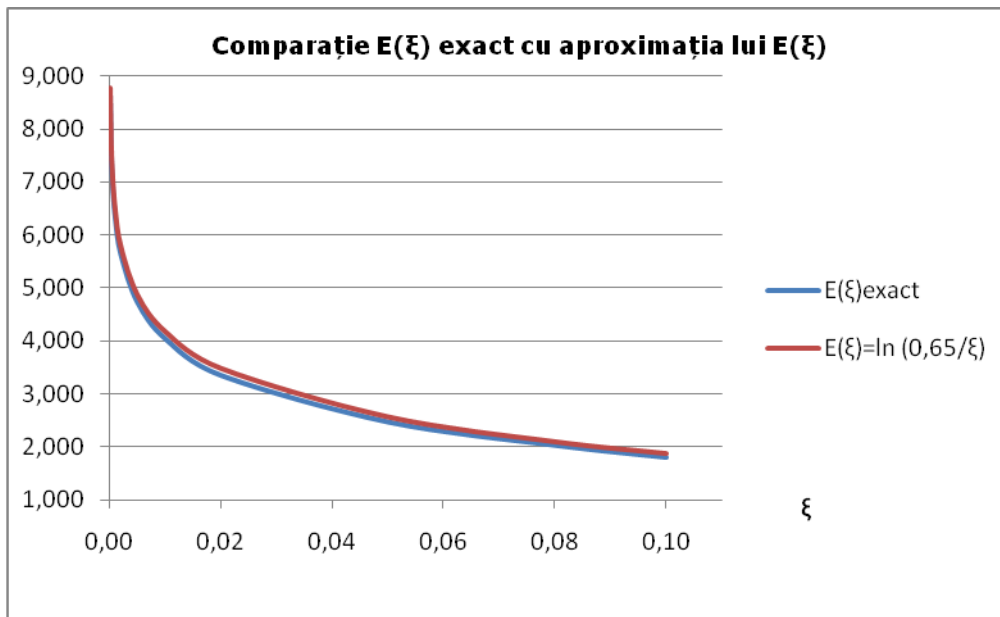
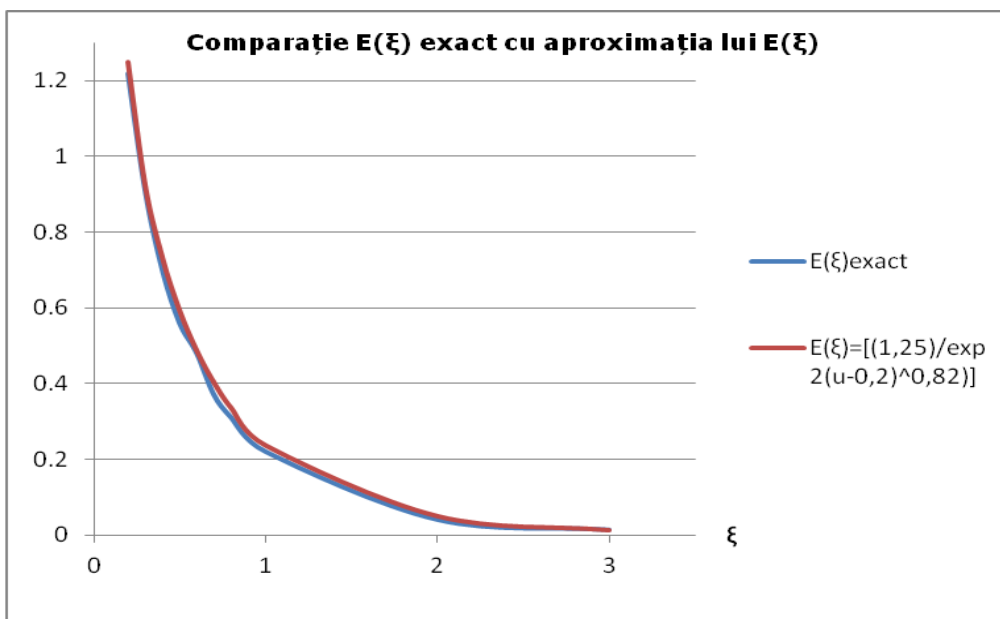
În aproximarea (5.8) funcția logaritmică $E_1(\xi)$ este propusă pentru a obține o acoperire bună a celor exacte (erori sub 3%). Această aproximație ne permite folosirea logaritmului pe o variație mai mare de valori (condiția fiind ca $E_I(\xi) < 0,2$ față de $E_I(-\xi) \leq 0,065$). Pentru verificarea aproximației s-a realizat o comparație a valorilor exacte cu cele calculate. Rezultatul se poate urmări în Fig.5.3 și 5.4.

Tabel 5.1 Comparație funcție $E_1(\xi)$ cu funcția $E(\xi)$ exactă

ξ	$E(\xi)$ exact	$E_1(-\xi) = \ln(0,65 \cdot \xi^{-1})$
0,0001	8,6300	8.7796
0,0003	7,5300	7.6809
0,0005	7,0200	7.1701
0,001	6,3300	6.4770
0,002	5,6400	5.7838
0,005	4,7300	4.8675
0,01	4,0400	4.1744
0,02	3,3500	3.4812
0,05	2,4700	2.5649
0,08	2,0300	2.0949
0,1	1,8000	1.8718

Tabel 5.2 Comparație funcție $E_2(\xi)$ cu funcția $E(\xi)$ exactă

ξ	$E(\xi)$ exact	$E_2(\xi) = 1,25 \cdot e^{-2(u-0,2)^{0,82}}$
0,2	1,22	1,2500
0,3	0,91	0,9235
0,4	0,7	0,7325
0,5	0,56	0,5933
0,6	0,48	0,4866
0,7	0,37	0,4026
0,8	0,31	0,3354
1	0,22	0,2364
2	0,04	0,0490
3	0,013	0,0119

Fig. 5.3 Comparația valorilor exacte cu funcția $E_1(\xi)$ Fig. 5.4 Comparația valorilor exacte cu funcția $E_2(\xi)$

Se poate observa că erorile funcției $E_1(\xi)$, $E_2(\xi)$ în comparație cu $E(\xi)$ exact (luate din tabel) sunt foarte mici confirmând faptul că relația de calcul poate fi utilizată, erorile fiind acceptabile.

În timpul utilizării practice un sistem de utilizare a energiei geotermice, are o funcționare ciclică. Astfel se pune problema de a stabili temperatura într-un punct oarecare la timpul t , în urma realizării a n cicluri de funcționare. Astfel în figurile (5.4, 5.5, 5.6) se prezintă o schema de principiu a funcționării în regim de trei cicluri a unui sistem de utilizare a energiei geotermice folosind schimbătoare de căldură vertical așezate în sol. Folosind aceste scheme se vor prezenta soluțiile analitice pentru calculul regimului termic din jurul schimbătoarelor de căldură în cicluri de funcționare-staționare.

În figura 5.5 avem reprezentat schema reală a variației regimului termic subteran S_0 , în urma a trei cicluri de funcționare.

În figura 5.6 regăsim schema reală S_0 echivalând transferul de căldură cu mișcarea apei (cu debite) (S_{echiv})- modelul de calcul exact al temperaturii din subteran în urma a trei cicluri de funcționare

În figura 5.7 schema reală a sistemului S_0 (trei cicluri de funcționare) este redusă la un singur ciclu de funcționare S_s , pentru un calcul simplificat al sistemului real S_0 .

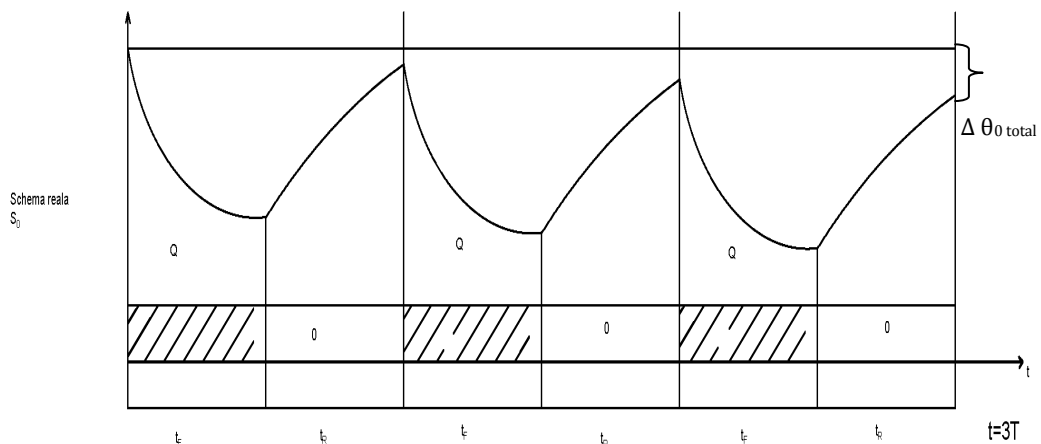


Fig. 5.5 Schema reală (S_0) regimului termic subteran în timpul funcționării sistemului în cicluri (3 cicluri).

Q – "debitul" de căldură extras;

t_{F1}, t_{F2}, t_{F3} – este timpul de funcționare (când se extrage/introduce căldură în sol)

t_{R1}, t_{R2}, t_{R3} – timpul de staționare al sistemului

$\Delta\theta_{total}$ – este diferența de temperatură dintre valoarea temperaturii inițiale θ_0 și

valoarea temperaturii din subteran în urma a trei cicluri de funcționare.

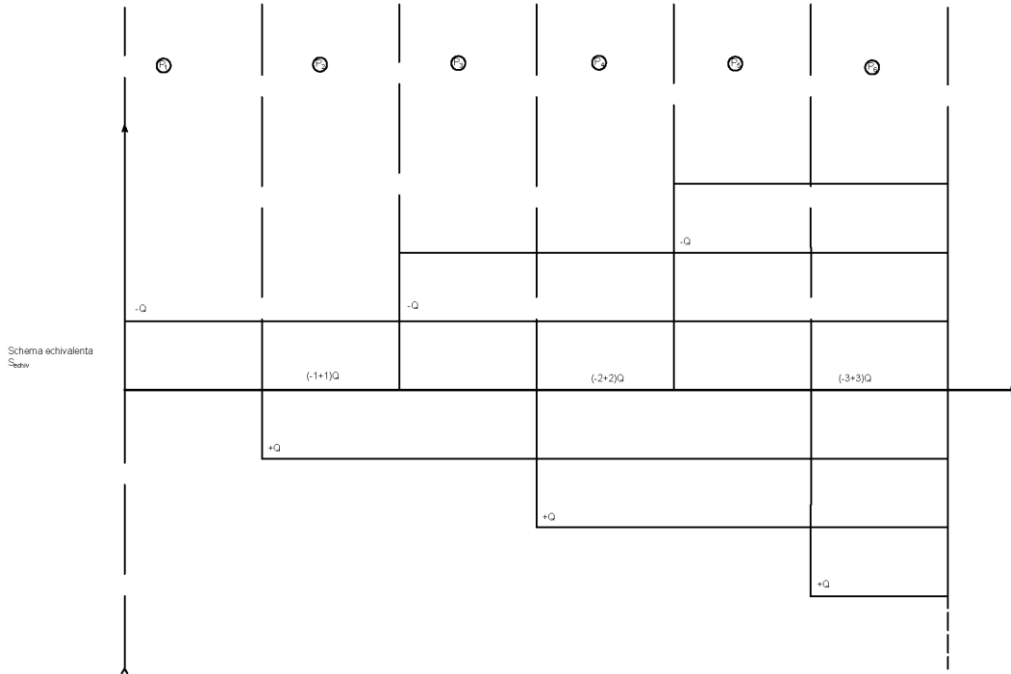


Fig. 5.6 Schema reală \$S_0\$ echivalând transferul de căldură cu mișcarea apei (cu debite) (\$S_{echiv}\$)

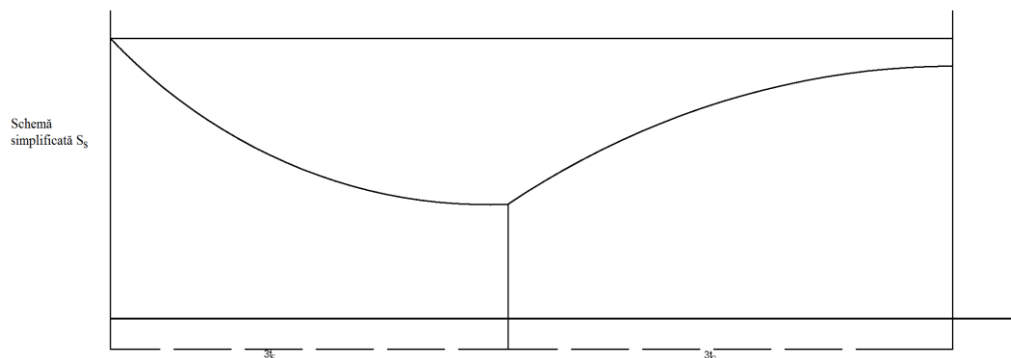


Fig. 5.6 schema simplificată a sistemului (\$S_5\$)

Soluția exactă pentru distribuția spațială și temporală a sistemului este relația (5.4):

$$\xi(r, t) = \mp \frac{|Q|}{4\pi\lambda m} E_1\left(-\frac{r^2}{4at}\right), \text{ pentru } t \leq t_f$$

$$\xi(r, t) = \mp \frac{|Q|}{4\pi\lambda m} \left[E_1\left(-\frac{r^2}{4at}\right) - E_1\left(-\frac{r^2}{4a(t-t_f)}\right) \right], \text{ pentru } t > t_f$$

Folosind relația pentru cele trei scheme vom avea următoarele soluții.

Soluția pentru sistemul real \$S_0\$

Pentru \$S_0\$ la sfârșitul celor trei cicluri de funcționare, vom avea următoarea soluție:

soluția pentru S_0 având 3 cicluri

$$t_{total} = 3T$$

$$unde: \begin{cases} T - t_F = t_R \\ t_{F_1} = t_F; t_{F_2} = T + t_F; t_{F_3} = 2T + t_F \end{cases}$$

$$\Delta\theta_{S_0}(r, t = 3T) = \pm \frac{Q}{4\pi m \lambda} \begin{cases} E_I\left(-\frac{r^2}{4a3T}\right) - E_I\left(-\frac{r^2}{4a(3T - t_F)}\right) \\ E_I\left(-\frac{r^2}{4a2T}\right) - E_I\left(-\frac{r^2}{4a(2T - t_F)}\right) \\ E_I\left(-\frac{r^2}{4aT}\right) - E_I\left(-\frac{r^2}{4a(T - t_F)}\right) \end{cases}$$

soluția pentru S_0 având n cicluri

$$t_{total} = n \cdot T :$$

$$\Delta\theta_{S_0}(r, n \cdot T) = \pm \frac{Q}{4\pi m \lambda} \left[\sum_{j=1}^n E_I\left(-\frac{r^2}{4ajT}\right) - \sum_{j=1}^n E_I\left(-\frac{r^2}{4a(jT - t_F)}\right) \right] \quad (5.9)$$

pentru S_{echiv} la sfârșitul celor 3 cicluri vom avea:

$$\begin{aligned} E_I(-\xi) &= E_I\left(-\frac{r^2}{4at}\right) & 0 \leq t \leq t_{F_1} & \quad P1 \\ E_I(-\xi) &= E_I\left(-\frac{r^2}{4at}\right) - E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t - t_{F_1})}\right) & t_{F_1} \leq t \leq T & \quad P2 \\ E_I(-\xi) &= E_I\left(-\frac{r^2}{4at}\right) - E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t - t_{F_1})}\right) + & T \leq t \leq t_{F_2} & \quad P3 \\ &+ E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t - T)}\right) \\ E_I(-\xi) &= E_I\left(-\frac{r^2}{4at}\right) - E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t - t_{F_1})}\right) + & t_{F_2} \leq t \leq 2T & \quad P4 \\ &+ E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t - T)}\right) - E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t - t_{F_2})}\right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_I(-\xi) &= E_I\left(-\frac{r^2}{4at}\right) - E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t-t_{F_1})}\right) \\
&+ E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t-T)}\right) - E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t-t_{F_2})}\right) & 2T \leq t \leq t_{F_3} & \text{P5} \\
&+ E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t-2T)}\right) \\
E_I(-\xi) &= E_I\left(-\frac{r^2}{4at}\right) - E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t-t_{F_1})}\right) \\
&+ E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t-T)}\right) - E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t-t_{F_2})}\right) + & t_{F_3} \leq t \leq 3T & \text{P6} \\
&+ E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t-2T)}\right) - E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t-t_{F_3})}\right)
\end{aligned}$$

Soluția prin schema simplificată S_s

soluția pentru S_0 având 3 cicluri $t_{total} = 3 \cdot T$

$$\Delta\theta_{S_s}(r, t = 3T) = \pm \frac{Q}{4nm\lambda} \left[E_I\left(-\frac{r^2}{4a3T}\right) - E_I\left(-\frac{r^2}{4a3(T-t_f)}\right) \right]$$

soluția pentru S_s având n cicluri

$t_{total} = n \cdot T$

$$\Delta\theta_{S_s}(r, nT) = \pm \frac{Q}{4nm\lambda} \left[E_I\left(-\frac{r^2}{4anT}\right) - E_I\left(-\frac{r^2}{4an(T-t_f)}\right) \right] \quad (5.10)$$

Generalizând pentru $n \times T$ cicluri, cu același timp de funcționare t_f în fiecare perioadă putem evalua influența numărului de cicluri "n" și stabili eroare de evaluare prin soluționarea distribuției temperaturii a sistemului real S_0 cu sistemul simplificat S_s .

În situația în care aproximația $\frac{r^2}{4a(jT-t_f)} < 0,2$ este adevărată vom folosi putem

$$E_I(-\xi) = \ln\left(\frac{0,65}{\xi}\right)$$

relația soluției S_0 (5.9) va deveni:

$$\begin{aligned}
\Delta\theta_{S_0}(r, nT) &= \pm \frac{Q}{4\pi m\lambda} \left[E_1\left(-\frac{r^2}{4ajT}\right) - E_1\left(-\frac{r^2}{4a(jT-t_F)}\right) \right] \\
&= \pm \frac{Q}{4\pi m\lambda} \ln \frac{jT-t_F}{jT} = \\
&\pm \frac{Q}{4\pi m\lambda} \ln \left(1 - \frac{t_F}{jT}\right) \\
\Rightarrow \Delta\theta_{S_0} &= \frac{Q}{4\pi m\lambda} \ln \sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{t_F}{jT}\right)
\end{aligned} \tag{5.11}$$

unde:

$$\ln \sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{t_F}{jT}\right) = \ln \prod_{j=1}^n \left(1 - \frac{t_F}{jT}\right)$$

notăm cu :

$$\ln \prod_{j=1}^n \left(1 - \frac{t_F}{jT}\right) = F_n \left(n, \frac{t_F}{T}\right)$$

astfel soluția S_0 va deveni:

$$\Delta\theta_{S_0} = \frac{Q}{4\pi m\lambda} F_n \left(n, \frac{t_F}{T}\right) \tag{5.12}$$

unde F_n este coeficientul de influență a numărului de cicluri.

5.3 Metoda numerică, soluții

Din multitudinea de programe software existente pentru modelare numerică a fost folosit programul de calcul ASMWIN (Aquifer Simulation Model For Windows). ASMWIN este un program de modelare subterană 2-D a mișcării apei subterane și a transportului de poluanți gratuit. Acest program de calcul include mai multe unelte de pentru modelarea numerică, dintre care amintim:

- ASMSIM1, modul care rezolvă ecuații liniare ale curgerii folosind metoda gradientilor conjugați sau metoda iterativa Cholesky;
- ASMOPTI, acest modul ajuta la calibrarea modelului;
- ASMPATH oferă metode de interpolare și integrare
- ASMT2SIM și ASMWALK, sunt utilizate pentru simularea transportului poluanților folosindu-se metoda diferențelor finite sau metoda drumului aleator [14]

Modelul de curgere utilizează datele de intrare și condițiile la limită pentru a obține ca rezultate: înălțimile piezometrice și implicit câmpul de viteze.

Pentru crearea unui model de curgere este necesară introducerea datelor de intrare după o tehnică secvențială.

Pașii care se urmează în program sunt:

- încadrarea domeniului de curgere într-un domeniu spațial: definirea lungimii și lățimii și a numărului de celule pe verticală și pe orizontală.
- precizarea tipului de acvifer (sub presiune sau cu nivel liber)
- precizarea condițiilor la limita și de margine ale domeniului prin specificarea unui cod aferent nivelelor constante (-1), și a celor cunoscute ce urmează a fi determinate (1), sau a celulelor care nu fac parte din domeniu (0)
 - introducerea grosimii stratului acvifer prin indicarea unei cote superioare a acviferului și a unei cote inferioare
- precizarea caracteristicilor fizice ale acviferului, conductivitate/transmisivitate hidraulică și porozitate efectivă
- precizarea valorilor debitelor pompate / injectate din domeniul modelat

După ce toți parametrii au fost introduși se poate rula programul, stabilindu-se metoda de rezolvare a sistemului de ecuații rezultat.

După cum se precizează mai sus ASMWIN rezolvă probleme de transport de poluanți și mișcare ale apei subterane. Rezultă că softul lucrează cu alte tipuri de parametrii decât cei necesari rezolvării problemelor de transfer termic.

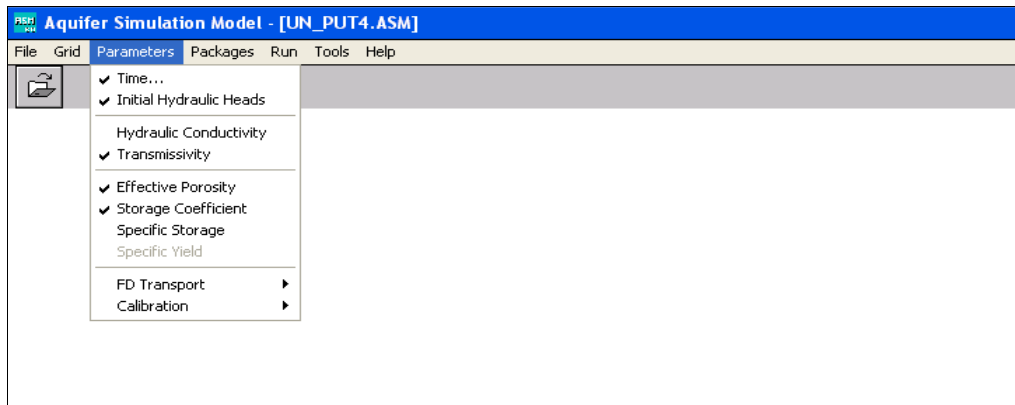


Fig. 5.8 Parametrii disponibili în ASMWIN

Apare astfel nevoia de a echivala parametrii utilizați în mișcarea apei și transportului de poluanți cu parametrii transferului de căldură.

Astfel în tabelul 5.1, de mai jos, sunt prezentați parametrii echivalenți utilizați. Unde debitul de apă extras Q_w reprezintă cantitatea de căldură extrasă, înălțimea piezometrică $h(r,t)$ este $\xi(r,t)$, h_0 - nivelul acviferului neperturbat devine θ_0 (temperatura mediului neperturbat), coeficientul de permeabilitate k devine conductivitatea termică λ .

Tabel 5.3 Echivalența parametrilor de intrare

Introducere date de intrare ASMWIN		
Pentru apă		Pentru căldură
Lungime	identic	Lungime
Discretizare	identic	Discretizare
Condiții la limită		
$h(r,t)$	echivalent	$\xi(r,t)$

h_0	echivalent	θ_0
k	echivalent	λ
n porozitate	identic	n porozitate
Q - debit calculat	echivalent	θ temperatura calculat

În figura 5.9 este reprezentată schema unui puț de extracție al apei subterane folosit pentru a exemplifica parametrii din hidraulică echivalați cu cei din transportul de căldură.

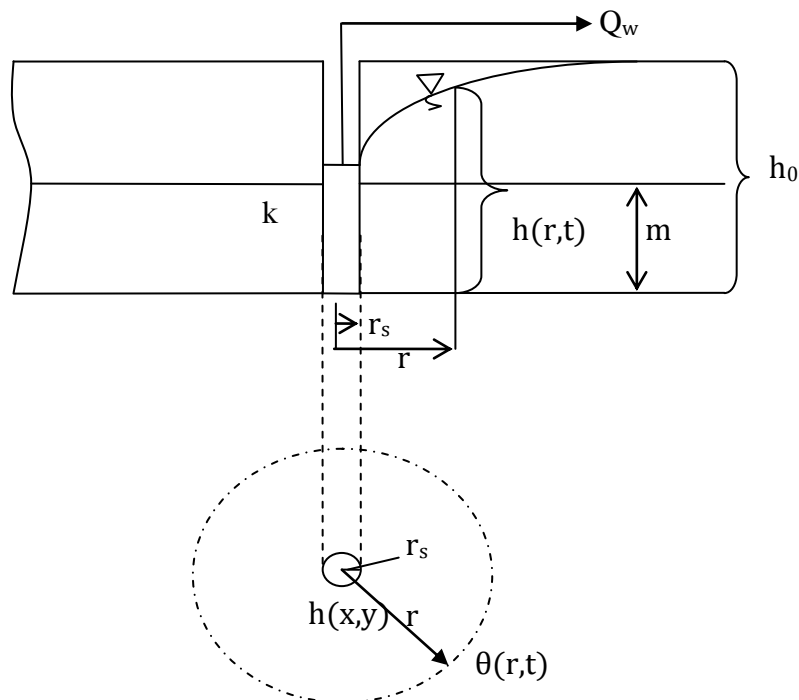


Fig. 5.9 Schema unui puț de extracție, parametrii acviferului

Pentru a stabili conductivitatea hidraulică folosim condiția:

$$a = \frac{k_f m}{n} \Rightarrow \frac{\lambda m}{(\rho C)_M}$$

$$k_{f\theta} = \frac{n}{m} \frac{\lambda_M}{(\rho C)_M} \quad (5.13)$$

unde $k_{f\theta}$ coeficientul de conductivitate hidraulică echivalent

n - porozitatea

m - grosimea stratului acvifer

Pentru modelul numeric avem nevoie de a stabili transmisivitatea echivalentă T^* care rezultă din condiția ca fluxul calculat cu volumul finit Q_N să fie identic, la același Δh , cu cel analitic Q_A .

Astfel din

$$Q_{ana} = \frac{2\pi k_{r\theta} m \Delta h}{\ln\left(1 + \frac{\Delta h}{2r_s}\right)}$$

și

$$Q_{num} = 8m\Delta h k^*$$

$$Q_{ana} = Q_{num} \Rightarrow \frac{2\pi k_{r\theta} m \Delta h}{\ln\left(1 + \frac{\Delta h}{2r_s}\right)} = 8m\Delta h k^*$$

rezultă:

$$k^* = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\ln\left(1 + \frac{\Delta x}{2r_s}\right)} k_{r\theta} \quad (5.14)$$

unde:

k^* - este conductivitatea hidraulică echivalentă

r_s - raza puțului

Δh înălțimea piezometrică

Pentru transmisivitate echivalentă T_θ folosim relația

$$T_\theta = k_{r\theta} m \quad (5.15)$$

pentru transmitivitatea echivalentă T^* avem relația:

$$T^* = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\ln\left(1 + \frac{\Delta x}{2r_s}\right)} T_\theta \quad (5.16)$$

Pentru introducerea parametrului "debit de injecție/extragere" avem:

$$Q_w = 2\pi r_s k_{r\theta} m \frac{\partial h}{\partial r} = 2\pi r_s \frac{n}{m} \frac{\lambda_M}{(\rho C)_M} m \frac{\partial h}{\partial r}$$

$$= \frac{n}{m(\rho C)_M} \cdot 2\pi r_s \lambda m \frac{\partial h}{\partial r}$$

Notând cu β_Q coeficientul de transformare a debitului

$$\beta_Q = \frac{m(\rho C)_M}{n}$$

unde

$$\beta_Q = \frac{Ws}{m^2K}$$

rezultă parametrul ce trebuie introdus ca debit în modelul programului ASMWIN:

$$Q_\theta = \beta_Q Q_w \Rightarrow Q_w = \frac{1}{\beta_Q} Q_\theta \quad (5.17)$$

În figura 5.10 este reprezentat modul de introducere a parametrilor echivalenți în rețeaua modelului numeric

Având parametrii fixați și integrați în model putem rula și obține rezultatele.

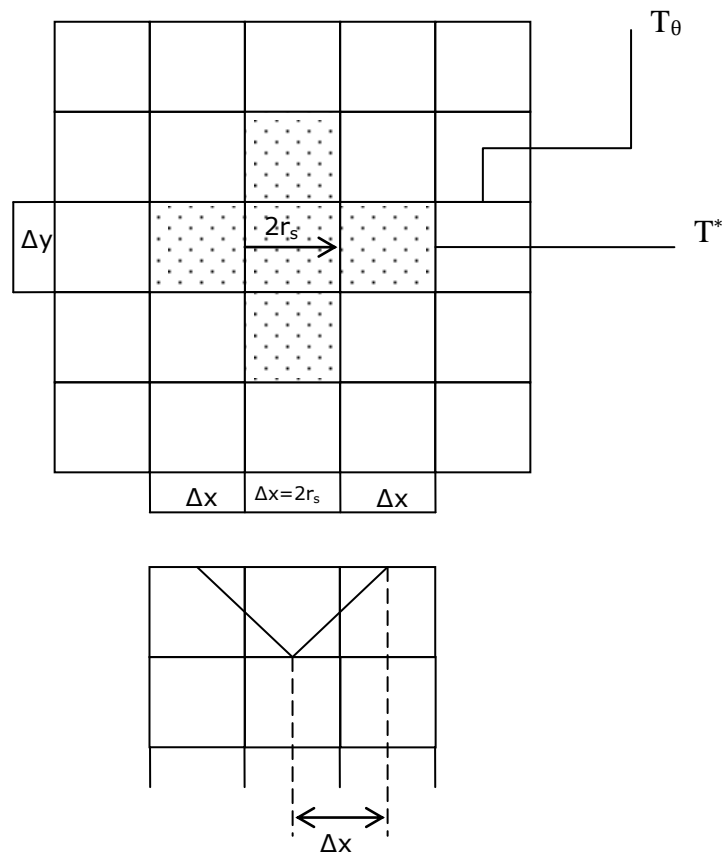


Figura 5.10 Rețeaua de discretizare a modelului și introducerea parametrilor echivalenți.

5.4 Estimarea influenței mișcării apei subterane asupra puțului de extracție/injecție al unui sistem de utilizare a energiei geotermale de mică adâncime

Sistemele de utilizare a energiei geotermale cu circuit deschis care sunt compuse dintr-un puț de extracție și unul de injecție sunt de obicei aplicate în cazul exploatării energiei geotermale dar și în cazul geotermiei de mică adâncime. Apa răcită și injectată în subteran schimbă distribuția temperaturii din sol în zona puțului de injecție. Această încălzire/răcire poate să se extindă și pe o zonă mai mare reducând sau chiar limitând performanța sistemului, de asemenea prin încălzirea/răcirea subteranului pot apărea efecte negative asupra mediului. Planificarea și execuția unor sisteme de acest gen necesită modele matematice-numerice complexe a mișcării și transportului căldurii din subteran. Metoda analitică, în comparație cu cea complexă numerică permite o analiză directă a influenței diversilor parametri, fapt ce reprezintă un avantaj al aceste metode față de cea numerică. [29]

Ecuția de bază a transferului de căldură 2D în medii poroase pentru sisteme care exploatează energia geotermală are următoarea formă:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\vec{V}_{pv}}{R} \nabla \theta - \frac{1}{R} \nabla (D_{\Sigma} \cdot \nabla \theta) = 0 \quad (5.18)$$

unde

$\theta(x,y,t)$ este câmpul de temperatură

\vec{V}_{pv} - este viteza în pori a apei freactice

$$\vec{V}_{pv} = \frac{1}{n_e} \vec{V} -$$

\vec{V} - viteza apei freactice Darcy

R - factorul de retardare ca rezultat a transferului de căldură apă rocă.

$$R = 1 + \frac{1 - n_e (\rho C)_R}{n_e (\rho C)_w} \quad (5.19)$$

$(\rho C)_R$ and $(\rho C)_w$ reprezintă capacitatea de căldură specifică pentru rocă și respectiv apă

D_{Σ} - tensorul de dispersie globală

n_e - porozitatea efectivă

Primii doi termeni ai ecuației 5.17 reprezintă transportul convectiv luând în considerare factorul de retardare. Asta pentru că de-a lungul acestui front:

$$d\theta = \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\vec{V}_{pv}}{R} \nabla \theta = 0 \quad (5.20)$$

Acest lucru înseamnă că temperatura de-a lungul acestui front rămâne constantă. Pentru deducerea ecuației 5.20 s-a folosit următoarele expresii ale componentelor vectorilor de viteza:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{V_{pvx}}{R} \quad \text{și} \quad \frac{\partial y}{\partial t} = \frac{V_{pvy}}{R} \quad (5.21)$$

Aceștia reprezentând componentii vitezei de propagare a frontului de temperatură. rezultă că frontul de propagare al temperaturii poate fi determinat utilizând modelarea mișcării apei freatice. Un prim pas este găsirea soluțiilor pentru mișcarea apei freatice și apoi din relația 5.21 putem determina intervalul de timp al propagării frontului de căldură. În acest sens este foarte productiv să găsești soluții analitice deoarece ele îți dau posibilitatea unei analize rapide a influenței diversilor parametri.

Pentru exploatări geotermale relevante se consideră mișcare a apei freatice generată de două puțuri, unul de extracție și unul de injecție. Acest tip de sistem este folosit atât în exploatarea energiei geotermale cât și a geotermiei de mică adâncime. Pentru un asemenea sistem se va analiza influența unei mișcări a apei freatice existente în subteran cu viteza Darcy uniformă V_D , produce un unghi α cu axa Ox (fig 5.11)

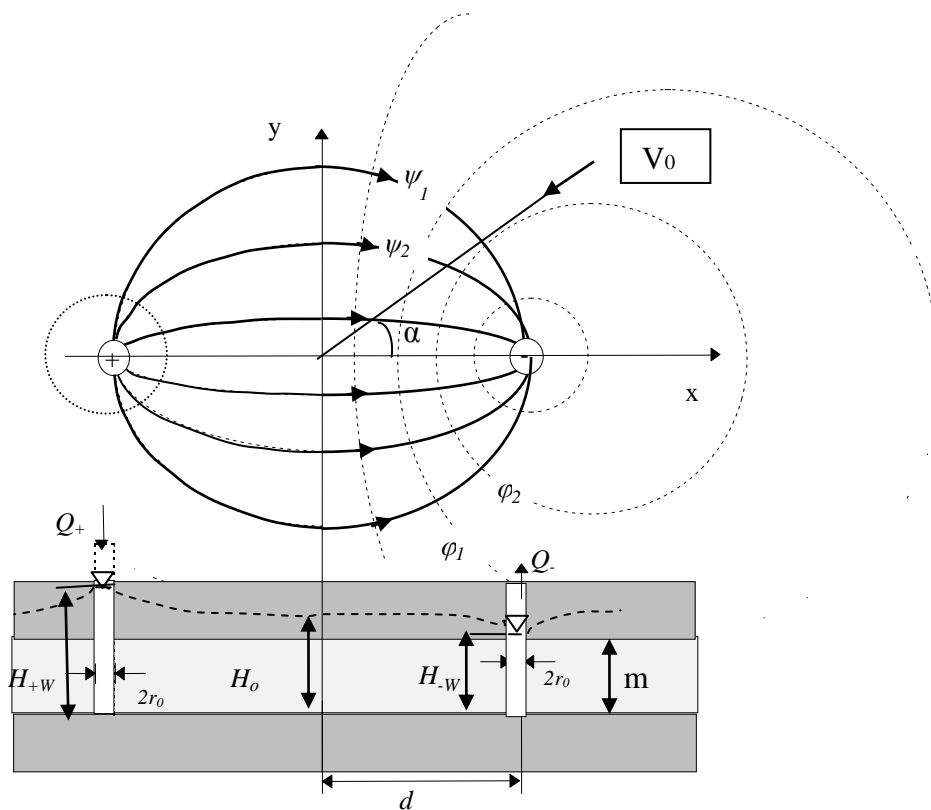


Fig. 5.11 Schița sistemului de exploatare energiei geotermale compusă din puț de exploatare și injecție [29]

Cu presupunerea că ambele puțuri au același debit avem:

$$Q_+ = Q_- = Q$$

$$\Rightarrow F(z) = -V_0 z e^{ia} - \frac{Q}{2\pi} \ln\left(\frac{z-d}{z+d}\right) \quad (5.22)$$

Viteza V_0 este exprimată utilizând gradientul I_0 a mișcării apei freatice paralele existente.

$$V_0 = k_f I_0 \quad (5.23)$$

z este o variabilă complexă (ex. $z = x+iy$) iar k_f este coeficientul de conductivitate al stratului de apă freatică.

Funcția potențial φ și funcția liniei mișcării ψ pot fi scrise:

$$\varphi = \operatorname{Re}\{F(z)\} = -kh + c = -v_0 r \cos(\theta + a) - \frac{Q}{2\pi m} \ln\left(\frac{\sqrt{(x-d)^2 + y^2}}{\sqrt{(x+d)^2 + y^2}}\right) \quad (5.24)$$

$$\psi = \operatorname{Im}\{F(z)\} = -V_0 \sin(\theta - a) - \frac{Q}{2\pi m} \left[\arctan \frac{y}{x-d} - \arctan \frac{y}{x+d} \right] \quad (5.25)$$

Din funcția potențial 5.24 putem afla componentele vitezei Darcy a apei freatice după cum urmează:

$$V_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -V_0 \cos a - \frac{Q}{2\pi m} \left[\frac{x+d}{(x+d)^2 + y^2} - \frac{x-d}{(x-d)^2 + y^2} \right] \quad (5.26)$$

$$V_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -V_0 \sin a - \frac{Q}{2\pi m} \left[\frac{y}{(x+d)^2 + y^2} - \frac{y}{(x-d)^2 + y^2} \right] \quad (5.27)$$

Presupunând că $Q_{w+} = Q_{w-} = Q$ următoarea relație între înălțimile piezometrice ale celor două puțuri este validă

din:

$$Q_{w+} = Q_{w-} = Q$$

$$\Rightarrow Q_{w-} = \frac{2\pi m k_f (H_0 - H_{-w} + I_0 d \cos a)}{\ln \frac{2d}{r_0}} \quad (5.28)$$

$$Q_{w+} = \frac{2\pi m k_f (H_0 - H_{-w} + I_0 d \cos a)}{\ln \frac{2d}{r_0}}$$

rezultă că

$$H_{w+} + H_{w-} = 2H_0 \quad (5.29)$$

Rezultă, deci, că pentru un debit Q putem calcula ambele înălțimi piezometrice pentru puțul de injecție și cel de extracție.

Notă, în cazul în care $Q_{w+} \neq Q_{w-}$ funcția potențial (5.24) devine

$$\begin{aligned}
 \varphi &= \operatorname{Re}\{F(z)\} = \\
 &= -kh + c = \\
 &= -v_0 r \cos(\theta + a) - \frac{Q_{W-}}{2nm} \ln \sqrt{(x-d)^2 + y^2} + \frac{Q_{W+}}{2nm} \ln \sqrt{(x+d)^2 + y^2} \quad (5.30)
 \end{aligned}$$

Cu aceste relații matematice este posibilă analiza influenței direcției mișcării apei freatice asupra funcționării celor două puțuri, în cazul în care $Q_{W+} = Q_{W-} = Q$. Principala problemă este determinarea influenței existenței unei mișcări a apei subterane asupra performanței sistemului. Deoarece există posibilitatea ca apa răcită de la puțul de injecție să ajungă la puțul de extracție.

Pentru exemplificare s-a analizat câteva cazuri reprezentative.

În cazul 1 apa freatică are o mișcare paralelă cu linia celor două puțuri (axa OX) înspre puțul de extracție ($\alpha=0$): Acesta este cel mai important caz. În figura (5.12) avem reprezentat acest caz folosind programul ASMWIN.

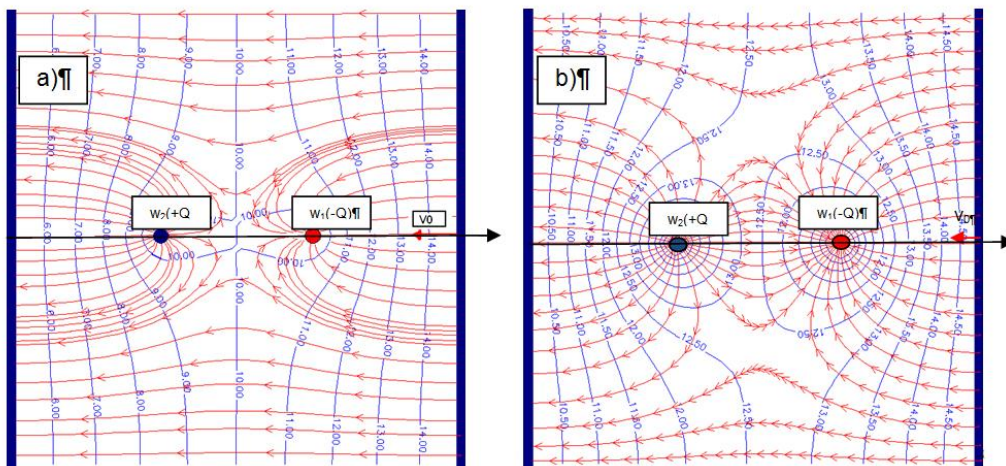


Fig. 5.12 Exemplu a influenței dintre cele două puțuri de extracție/injecție cazul 1 [29]

În cazul a). puțul de extracție W_1 interceptează mișcarea paralelă a apei geotermale și apa răcită ce provine de la puțul de injectare W_2 dar nu afectează puțul de extracție.

În cazul b). Apa răcită afectează puțul de exploatare.

Cazul 2. presupune o mișcare paralelă cu linia celor două puțuri (axa OX) înspre puțul de injecție (fig 5.13)

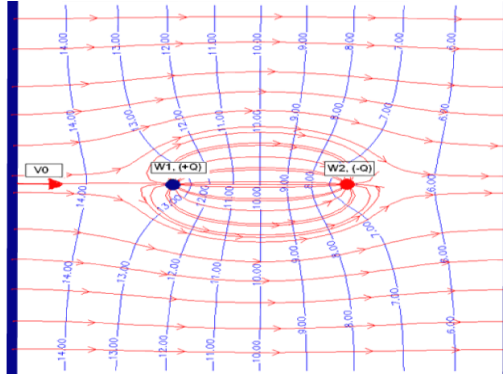


Fig. 5.13 Exemplu a influenței dintre cele două puțuri de extracție/injecție cazul 2 [29]

În cazul 2 puțul de extracție și cel de injecție sunt cuplate formând un circuit închis eliptic.

Cazul 3 presupune o mișcare perpendiculară liniei celor două puțuri (Ox) rezultând unghiul $\alpha = \pi/2$. În acest caz puțul de injecție nu influențează puțul de producție.

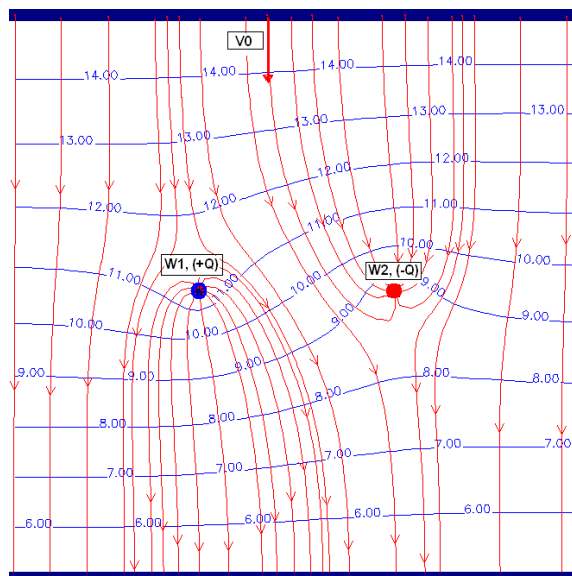


Fig. 5.14 Exemplu a influenței dintre cele două puțuri de extracție/injecție cazul 3 [29]

Modelul matematic și soluțiile analitice propuse permit estimarea rapidă a mișcării apei subterane în cazul unui sistem geotermal compus dintr-un puț de injecție și unul de extracție. Modelul numeric bazat pe analogia dintre ecuația transferului de căldură și ecuațiile curgerii apei freatice, a permis modelarea sistemului geotermal printr-un software specializat în mișcarea apei subterane și transportul poluanților în medii poroase. Această analogie permite valorificarea unor soluții cunoscute din modelarea proceselor de transport al poluanților.

CAPITOLUL VI - STUDIU DE CAZ MODELAREA MATEMATICĂ/NUMERICĂ A CÂMPULUI GEOTERMIC PE STAȚIA PILOT-MERKAPT DEBRECEN

6.1 Perimetrul zonei de amenajare a stației pilot

Studiul de caz s-a desfășurat pe standul experimental al clădirii din figura 6.1 în baza unei colaborări cu firma Merkapt și Universitatea din Debrecen.



Fig 6.1 Clădirea firmei Merkapt

În fig. 6.1 avem ilustrată clădirea firmei Merkapt unde, pentru încălzire, electricitate și apă menajeră s-a utilizat energia geotermică, eoliană și solară. Clădirea deservește ca spațiu de depozitare, birouri și stand experimental pentru cercetarea energiei geotermale mică adâncime.

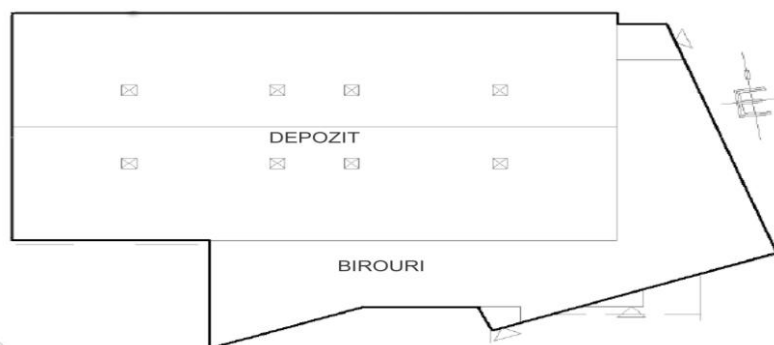


Fig. 6.2 Repartizarea spațiului util al clădirii [Merkapt]

Costurile inițiale de instalare a sistemelor de utilizare a energiei regenerabile au fost suportate împreună cu ajutorul Uniunii Europene ajungând la suma de 1 800 000 HUF. Pentru monitorizare și control au fost instalate mai multe sisteme. În studiul de caz am folosit, sistemul de utilizare a energiei geotermice (de mică adâncime). Acest sistem de încălzire este unul bivalent în care se combină energia geotermală, solară și combustibilii fosili. [Merkapt]

- Sistemul de utilizare a energiei geotermale de mică adâncime este compus din:
- două pompe de căldură Stiebel Eltron model WPF 13 M;
 - centrală termică pe combustibili fosili;
 - două rezervoare tampon (pentru încălzire/răcire);
 - un rezervor tampon pentru apă caldă menajeră;
 - două cisterne tampon îngropate în pământ pentru încălzire;
 - 16 schimbătoare de căldură verticale PE100 SDR11;
 - schimbătoare de căldură așezate orizontal în sol la circa 2 m adâncime (2047,5 m);
 - 2 colectori solari din tuburi vidate
 - 4 colectori solari ficși plus încă 2 mobili
 - colectoare solare KPE
 - 116 senzori de temperatura
 - 33 contoare de energie termică Ray 451

Obiectivul urmărit a constat în stabilirea regimului termic din jurul schimbătoarelor de căldură instalate în jurul clădirii Merkapt, prin metoda analitică și prin metoda numerică (la mantaua forajului și la distanța r , funcție de timp), prezentate în capitolul V. Rezultatele au fost comparate cu temperaturile obținute în timpul testului de răspuns termic desfășurat pe acest sistem.

Testul de răspuns termic (numit și Test de Răspuns geotermal, TRT) reprezintă o metodă de determinare a conductivității termice a subteranului și a rezistenței termice a forajului, pentru a putea determina cu acuratețe proprietățile termice ale subteranului. Avantajul TRT, în cazul site-ului de la firma Merkapt constă în faptul că datele provenite din acest experiment pot fi utilizate pentru a verifica modelul matematic elaborat pentru soluționarea distribuției temperaturii în timp și spațiu.

În figura 6.3 avem schițată un model de instalare a echipamentului de testare. Echipamentul este compus dintr-o pompă, o rezistență care încălzește fluidul, senzori care transmit datele unui computer cu software specializat pentru înregistrarea datelor.

Modul de funcționare al TRT-ului constă în introducerea unei cantități cunoscute de energie termică într-un schimbător de căldură, (lichidul de lucru, este încălzit și recirculat în sondă), forat în terenul ce urmează a fi folosit pentru extragere/injecție de energie termică. În tot acest timp se înregistrează mai mulți parametri cum ar fi energia introdusă în sondă, debitul fluidului, temperatura de intrare și ieșire a fluidului din sondă, temperatura exterioară, temperaturile de pe mantaua sondei și din jurul acesteia.

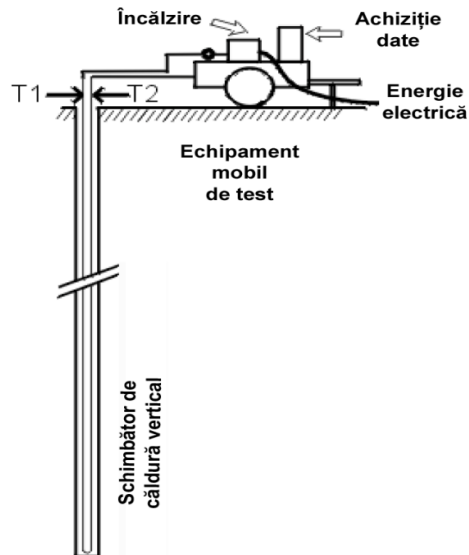


Fig. 6. 3 Schema de instalare a TRT

Pentru rezultate cât mai bune este esențial să se seteze sistemul corect și să se reducă influențele externe la minim. Testul durează în mediu 2-3 zile, însă pentru a avea date cât mai corecte, un test mai lung va îmbunătăți influențele externe asupra sistemului și fluctuațiile de energie introduse în timpul experimentului. [5]

Experimentul de la Debrecen s-a desfășurat în luna aprilie 2011. Între 4-12 aprilie unitatea de test a fost pornită introducând în sol, în medie 2200 W energie termică pe sonda 10 a sistemului existent.

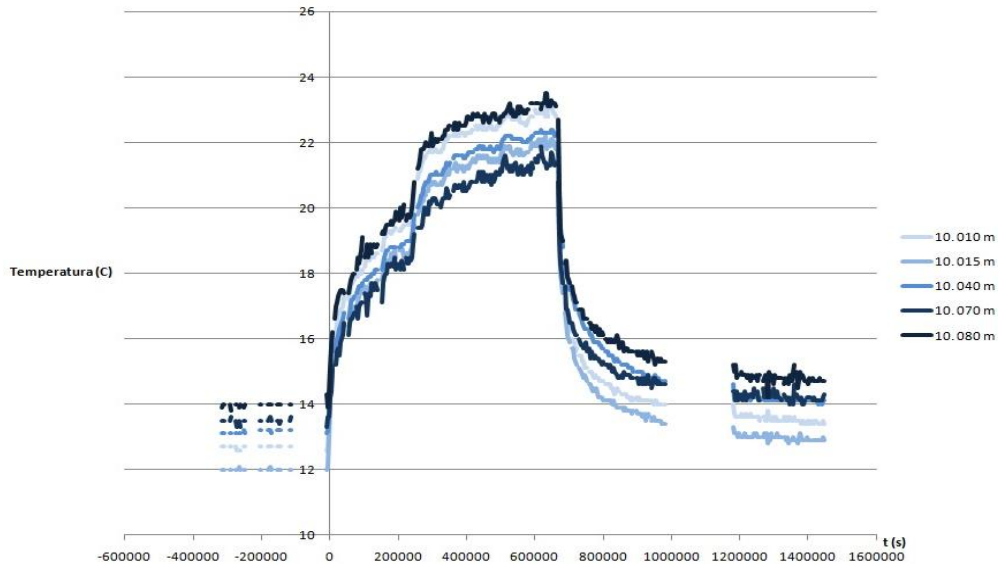


Fig. 6.4 Variația temperaturii în sonda 10 pe mantaua sondei în timpul TRT [Merkapt]

După data de 12.04 instalația a fost oprită înregistrându-se în continuare evoluția temperaturilor din subteran. Astfel s-au acumulat ~180 h de funcționare și ~480 h de staționare.

Utilizând datele înregistrate în urma testului se vor pune în practica metoda analitică și numerică (capitolul V), pentru modelarea evoluției în timp a temperaturii la distanța r funcție de t a temperaturii din jurul schimbătorului de căldură.

6.2 Parametrii caracteristici ai zonei de amplasare a stației pilot

În zona amplasamentului clădirii Merkapt este estimată o temperatura medie a subteranului de:

- 14°C la o adâncime de 50m adâncime
- 16°C la 100 m adâncime

În figura 3 avem ilustrată temperatura estimată pentru adâncimea de 50 m și 100 m

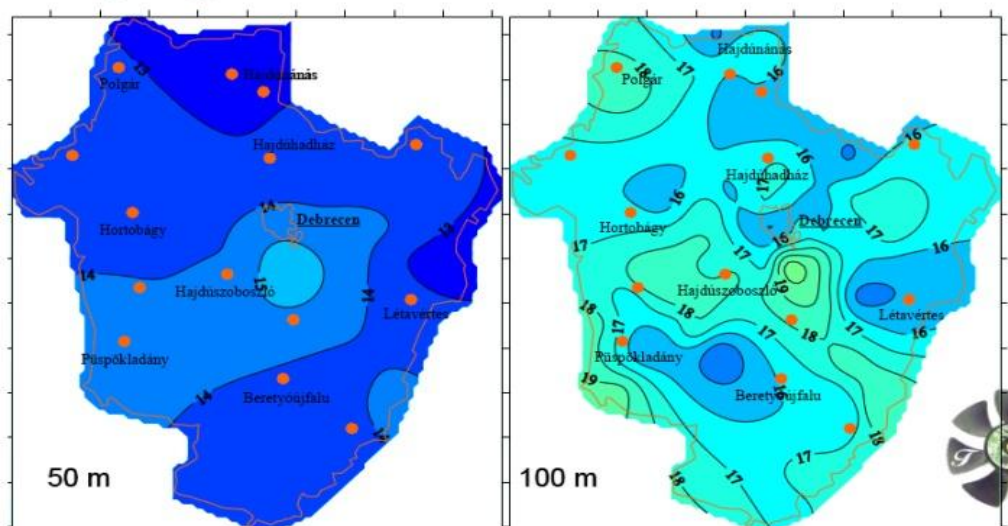


Fig. 6.5 Temperatura estimată la 50 și 100 m adâncime [Merkapt]

Temperaturile măsurate cu senzorii de pe schimbătoarele de căldură de la Merkapt sunt mai mici cu ~2-4°C.

Tabel 6.1 Temperaturi înregistrate la Debrecen [Merkapt]

data	09. 025 m	10. 040 m	11. 060 m	12. 100 m	15. 100 m
01.04.2011 00:00	12,5	13,1	12,2	13,8	13,4
02.04.2011 01:00	12,5	13,1	12,4	13,6	11,2
03.04.2011 00:00	12,5	13,2	12,5	14	11,3
04.04.2011 11:00	12,5	13,2	12,1	13,6	11,3

În zona amplasării sondelor de colectare a energiei termice s-a efectuat un foraj până la adâncimea de 100 m pentru a stabili tipurile de sol și a parametrilor caracteristici zonei. În figura 6.6 este reprezentat forajul efectuat la Debreceen pentru stabilirea stratificației solului. Se poate observa că solul este compus din diferite rapoarte de argilă-nisip asemănător terenului din județul Timiș.

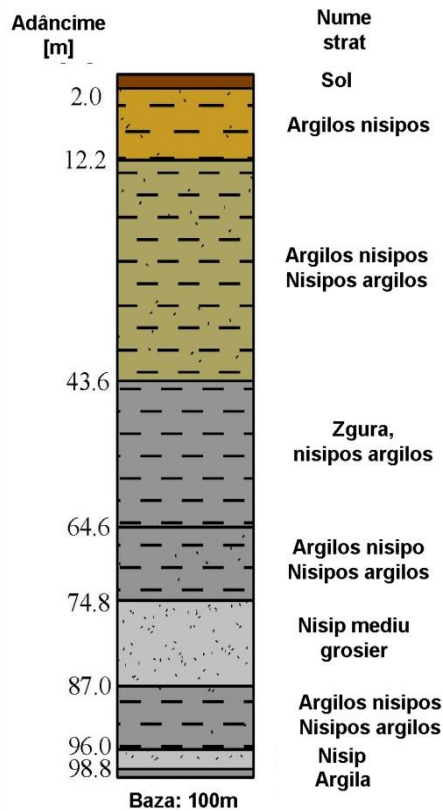


Fig. 6.6 Stratigrafia solului din Debreceen [Merkapt]

Conform literaturii de specialitate avem următoarele valori pentru parametrii principali ai transferului termic:

Tabel 6.2 Parametrii principali ai transferului de energie termică [60]

Tipuri de material	Conductivitate termică λ în $\left(\frac{W}{mK}\right)$	Căldura specifică volumetrică (ρC) în $\left(\frac{J}{m^3K}\right)$	Difuzivitate termică (a) în $\left(\frac{m^2}{s}\right)$
Bazalt	1,7-2,5	$(2,3-2,6) \times 10^6$	$(6,5-11,0) \times 10^{-7}$
Calcar	2,8	$(2,1-2,3) \times 10^6$	$(12,1-13,3) \times 10^{-7}$
Gresie	2,3	$(1,6-2,8) \times 10^6$	$(8,0-14,0) \times 10^{-7}$
Pietriș (uscat)	0,4	$1,5 \times 10^6$	$2,7 \times 10^{-7}$
Pietriș (umed)	1,8	$2,4 \times 10^6$	$7,5 \times 10^{-7}$

Nisip (uscat)	0,4-0,8	$(1,3-1,6) \times 10^6$	$(2,5-6,2) \times 10^{-7}$
Nisip (umed)	2,4-3,2	$(2,2-2,9) \times 10^6$	$(8,3-14,5) \times 10^{-7}$
Argilă (uscată)	0,8-2,0	$(1,4-3,0) \times 10^6$	$(2,7-7,1) \times 10^{-7}$
Argilă (umedă)	1,2-1,6	$(2,1-2,4) \times 10^6$	$(5,0-7,6) \times 10^{-7}$
Argilă prăfoasă (umedă)	1,7	$(1,6-3,4) \times 10^6$	$(5-15) \times 10^{-7}$
Apă	0,6	$4,2 \times 10^6$	$1,5 \times 10^{-7}$

Se observă că pentru pământ umed ce conține proporții diferite de argilă și nisip avem următoarele valori estimate:

$$\lambda_{\text{pământ}} = 1,2 - 3,2 \left(\frac{W}{mK} \right)$$

$$(\rho C)_{\text{pământ}} = 2,1 - 2,4 \left(\frac{MJ}{m^3 K} \right)$$

$$a_{\text{pământ}} = \frac{\lambda}{\rho C}$$

$$\Rightarrow a_{\text{pământ}} = (5,71 \div 13,33) \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

Dacă există apă subterană efectul acesteia va apărea prin intermediul porozității. Așadar pentru mediul rocă plus apă vom avea următorii parametri:

$$\lambda_M = n_p \cdot \lambda_{\text{apa}} + (1 - n_p) \cdot \lambda_{\text{pământ}}$$

$$\lambda_M = 1,1 \frac{W}{mK}$$

$$\lambda_M = n_p \cdot \lambda_{\text{apa}} + (1 - n_p) \cdot \lambda_{\text{pământ}}$$

$$\lambda_M = 1,88 \frac{W}{mK}$$

$$\lambda_{\text{apă}} = 0,6 \frac{W}{mK}$$

$$\text{iar } (\rho C)_{\text{apă}} = 4,2 \frac{MJ}{m^3 K}$$

$$\Rightarrow a_{\text{apă}} = 1,43 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

$$(\rho C)_M = n_p \cdot (\rho C)_{\text{apă}} + (1 - n_p) \cdot (\rho C)_{\text{pământ}}$$

$$\text{iar } (\rho C)_M = 2,52 \frac{MJ}{m^3 K}$$

$$\Rightarrow a_M = (4,37 \div 7,46) \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

Pe baza stratificației solului se considerat următorii parametrii caracteristici ai solului:

$$\lambda_M = 1,1 \frac{W}{mK}; (\rho C)_M = 2,5 \frac{MJ}{m^3K}; a_M = 4,4 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

unde $\lambda_M, (\rho C)_M, a_M$ reprezintă conductivitatea termică a mediului rocă - apă, capacitatea termică specifică a mediului roc - apă și respectiv difuzivitatea termică a mediului rocă - apă.

6.3 Modelarea analitică a temperaturii în funcție de spațiu și timp

6.3.1 Cazul pentru un ciclu de funcționare

6.3.1.1 Cazul I ($r = r_s$ - pe mantaua sondei)

Pentru a calcula distribuția temperaturii în funcție de spațiu și timp s-au folosit următorii parametrii:

Timpul de funcționare	$t_F = 180h$
Timpul total	$T = 400h$
distanța dintre un punct oarecare M și foraj	$r = r_s$
Cantitatea (debitul) de căldură introdusă	$Q = 22 W/m$
adâncimea sondei	$m = 100 m$
conductivitatea termică	$\lambda = 1,1 W/mK$
capacitatea specifică de căldură volumetrică	$\rho C = 2,5 * 10^6 J/(m^3K)$
difuzivitatea termică	$a = 4,4 * 10^{-7} m^2/s$

Observație: Datorită unor măsurători eronate, perioadele de 280 și 300 h din datele din măsurători și modelul analitic nu sunt introduse.

Cu acești parametrii, prin intermediul ecuației (5.4) s-a calculat distribuția temperaturii în timp și spațiu

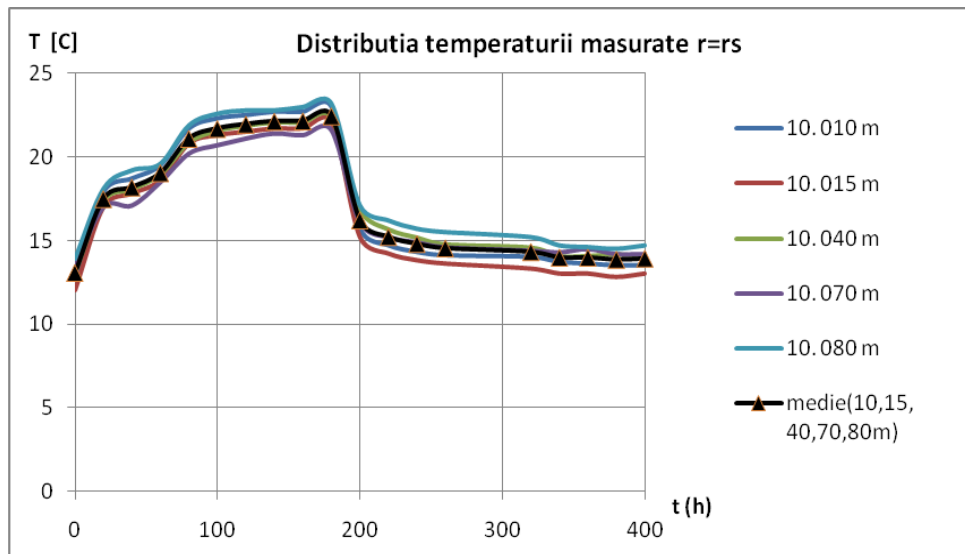
$$\begin{aligned} \xi_F(r, t) &= \frac{|Q|}{4\pi\lambda m} E_I\left(-\frac{r^2}{4at}\right), \text{ pentru } t \leq t_F \\ \xi_R(r, t) &= \frac{|Q|}{4\pi\lambda m} \left[E_I\left(-\frac{r^2}{4at}\right) - E_I\left(-\frac{r^2}{4a(t-t_F)}\right) \right], \text{ pentru } t > t_F \end{aligned} \quad (5.4)$$

Deoarece $E_I\left(-\frac{r^2}{4at}\right) < 0,2$ vom putea utiliza aproximarea (5.8)

$$E_I(-\xi) = \left\{ E_I(-\xi) = \ln\left(1,54 \frac{r^2}{4at}\right) = \ln(1,54\xi) = \ln\left(\frac{0,65}{\xi}\right), \text{ pentru } \xi \leq 0,2 \right. \quad (5.8)$$

Tabel 6.3 Măsurători ale valorilor temperaturii la $r = r_s$

timp f (h)	10. 010 m	10. 015 m	10. 040 m	10. 070 m	10. 080 m	medie (10,15,40,70,80m)
0	12.7	12	13.1	13.5	13.9	13.04
20	17.9	17	17.4	17	18.1	17.48
40	18.7	17.8	18.1	17.1	19.2	18.18
60	19.5	18.6	19	18.5	19.6	19.04
80	21.7	20.8	20.9	20.2	21.9	21.1
100	22.3	21.3	21.6	20.7	22.6	21.7
120	22.5	21.5	21.9	21.1	22.8	21.96
140	22.7	21.7	22.1	21.4	22.8	22.14
160	22.7	21.7	22.1	21.3	23	22.16
180	23	22.1	22.4	21.6	23.2	22.46
200	15.7	15.2	16.9	16.1	17.1	16.2
220	14.7	14.2	15.7	15.2	16.2	15.2
240	14.3	13.8	15.2	14.9	15.7	14.78
260	14.1	13.6	14.8	14.6	15.5	14.52
320	14	13.3	14.6	14.4	15.2	14.3
340	13.7	13	14.1	14.3	14.7	13.96
360	13.6	13	14.1	14.5	14.6	13.96
380	13.5	12.8	14.2	14.2	14.5	13.84
400	13.5	13	14.1	14.2	14.7	13.9

Fig. 6.7 Variația temperaturii la la $r = r_s$

În figura 6.7 se prezintă graficul distribuției temperaturilor (din tabelul 6.3) din subteran pe mantaua sondei numărul zece la diferite adâncimi și media acestora).

Tabel 6.4 Comparație temperatură medie măsurate cu cele calculate

timp (h)	medie(10,15,40,70,80m)	analitic
0	13.04	13.04
20	17.48	18.02
40	18.18	19.12
60	19.04	19.77
80	21.1	20.23
100	21.7	20.58
120	21.96	20.87
140	22.14	21.12
160	22.16	21.33
180	22.46	21.52
200	16.2	16.70
220	15.2	15.75
240	14.78	15.24
260	14.52	14.91
320	14.3	14.35
340	13.96	14.24
360	13.96	14.14
380	13.84	14.06
400	13.9	13.99

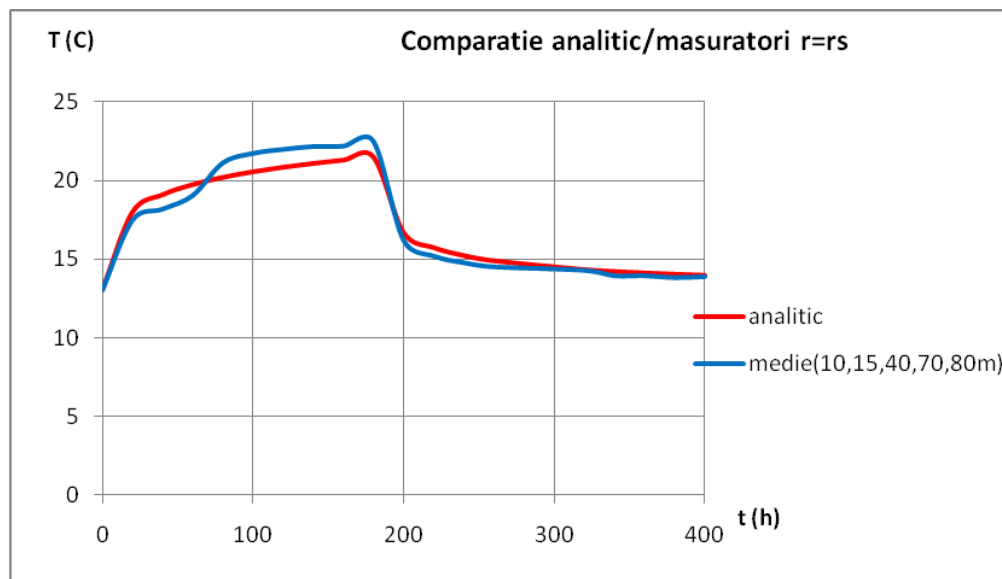


Fig. 6.8 Comparație a temperaturii măsurate cu cea calculată analitic

În figura 6.8 este reprezentat graficul mediei temperaturilor măsurate în subteran și temperaturile calculate cu soluția analitică propusă

Tabel 6.5 Comparație temperaturi măsurate medii cu cele analitice

timp f (h)	medie(40,70,80 m)	analitic
0	13.50	13.50
20	17.50	18.48
40	18.13	19.59
60	19.03	20.23
80	21.00	20.69
100	21.63	21.05
120	21.93	21.34
140	22.10	21.58
160	22.13	21.80
180	22.40	21.98
200	16.70	17.17
220	15.70	16.21
240	15.27	15.71
260	14.97	15.38
320	14.73	14.82
340	14.37	14.70
360	14.40	14.60
380	14.30	14.52
400	14.33	14.45

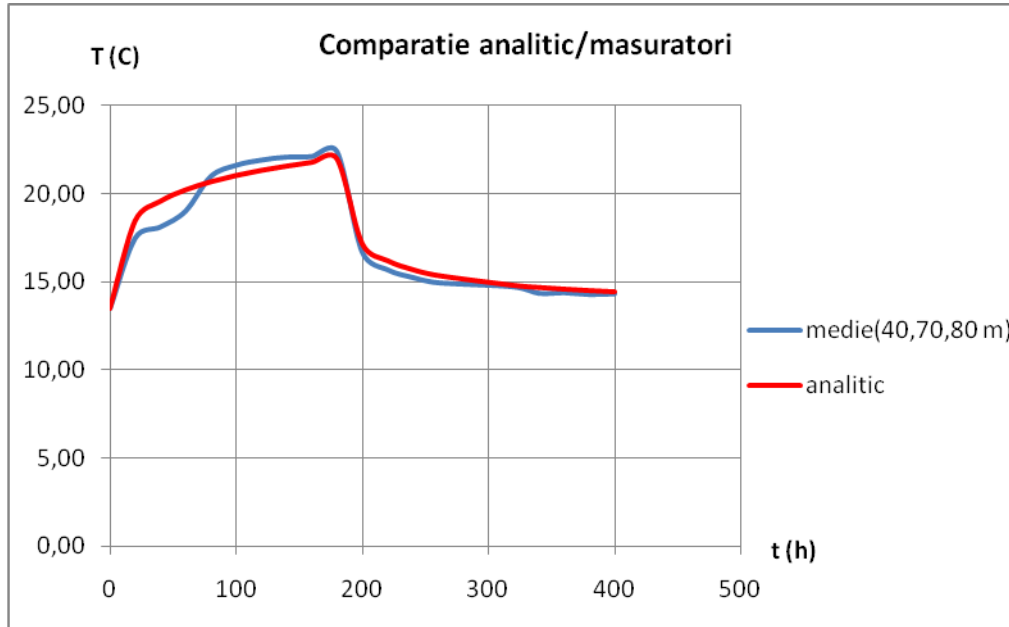


Fig. 6.9 Comparație a temperaturii măsurate cu cea calculată analitic

În figura 6.9 a fost comparată media măsurătorilor din teren cu rezultatele modelului analitic fără utilizarea temperaturilor de la 10 și 15 m adâncime.

Concluzii referitoare la distribuția temperaturii pentru un ciclu de funcționare, cazul $r=r_s$

Observând rezultatele din tabelele și graficele acestora, expuse mai sus, putem spune că soluția modelului analitic dezvoltat este bună.

Se poate observa o diferență de $\sim 1^\circ\text{C}$ la t_F max și $\sim 0,1^\circ\text{C}$ la T. Scoțând din calcul valorile temperaturilor la adâncimi de 10 și 15 m, a rezultat diferența dintre valoarea medie măsurată și valoarea calculată analitic, la t_F max, a scăzut la $\sim 0,5^\circ\text{C}$.

6.3.1.2 Cazul II ($r= 2\text{m}$)

Parametrii pentru calcul:

Timpul de funcționare	$t_F = 180\text{h}$
Timpul total	$T = 400\text{h}$
distanța un punct oarecare M și foraj	$r = 2\text{m}$
Cantitatea (debitul) de căldură introdusă	$Q = 22 \text{ W/m}$
adâncimea sondei	$m = 100 \text{ m}$
conductivitatea termică	$\lambda = 1,1 \text{ W/mK}$
capacitatea specifică de căldură volumetrică	$\rho C = 2,5 * 10^6 \text{ J/(m}^3\text{K)}$
difuzivitatea termică	$\alpha = 4,4 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

La fel ca și în cazul $r = r_s$ vom folosi ecuația (5.4) , cu diferența că pentru $E_1\left(-\frac{r^2}{4at}\right) > 0,2$ vom folosi aproximarea a doua a ecuației (5.8)

$$E_1(-\xi) = \begin{cases} E_2(-\xi) = \frac{1,25}{\exp\left[2 \cdot (\xi - 0,2)^{0,82}\right]}, & \text{pentru } \xi \geq 0,2 \end{cases} \quad (5.8)$$

Tabel 6.6 Măsurători ale valorilor temperaturii la $r = 2m$

timp f (h)	10_2 010 m	10_2 025 m	10_2 040 m	10_2 050 m	10_2 075 m	10_2 090 m	medie (10,25,40, 50,75,90)
0	12	12,3	12,3	12,5	13,9	13,9	12,82
20	12,2	12,3	12,3	12,8	13,9	14,1	12,93
40	12,1	12,3	12,3	12,8	13,8	14,1	12,90
60	12,2	12,3	12,4	12,8	13,6	14,2	12,92
80	12,1	12,3	12,6	12,6	13,5	14,5	12,93
100	12,2	12,7	12,4	12,7	14,1	13,7	12,97
120	12,2	12,5	12,4	12,9	13,8	14,2	13,00
140	12,3	13	12	13,1	14,2	13,3	12,98
160	12,1	12,7	12,4	12,7	13,8	14,1	12,97
180	12,4	12,6	12,7	12,9	13,5	14,4	13,08
200	12,4	12,9	12,6	12,9	13,8	14,1	13,12
220	12,4	13	12,7	13	13,8	14,1	13,17
240	12,5	13	12,8	13	13,9	14,1	13,22
260	12,5	13	12,9	13	13,9	14,2	13,25
320	12,5	12,9	13	12,9	13,8	14,4	13,25
340	12,6	12,9	12,8	13,1	13,8	14,2	13,23
360	12,5	12,9	12,8	13,2	13,9	14,1	13,23
380	12,5	12,9	12,9	13,1	13,8	14	13,20
400	12,6	12,8	12,8	13,1	13,9	14,2	13,23

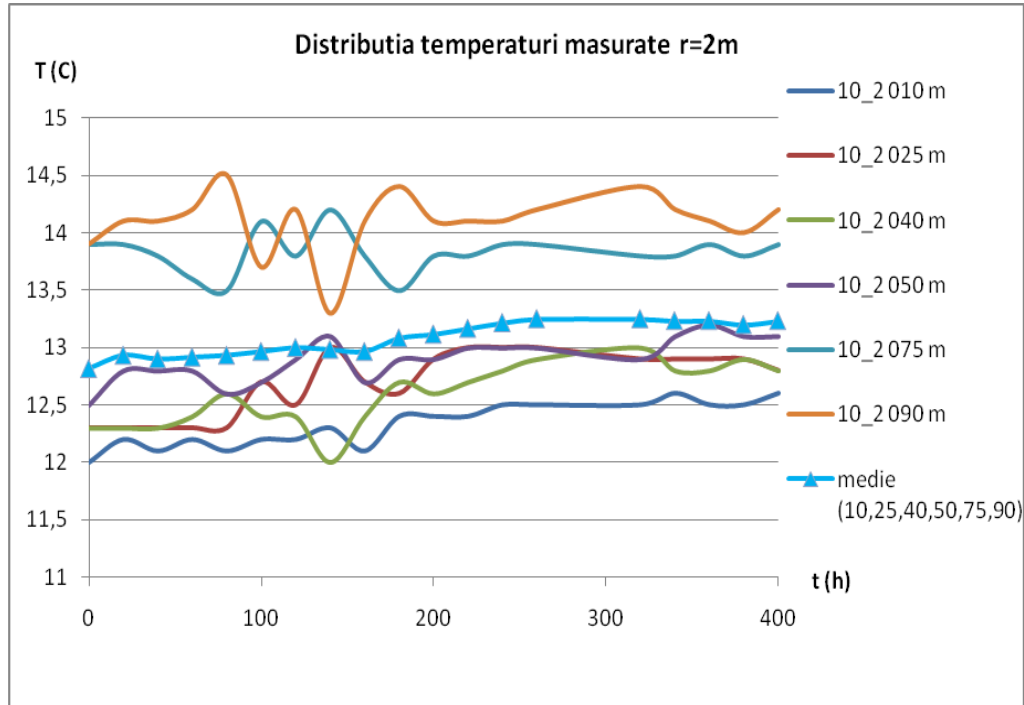
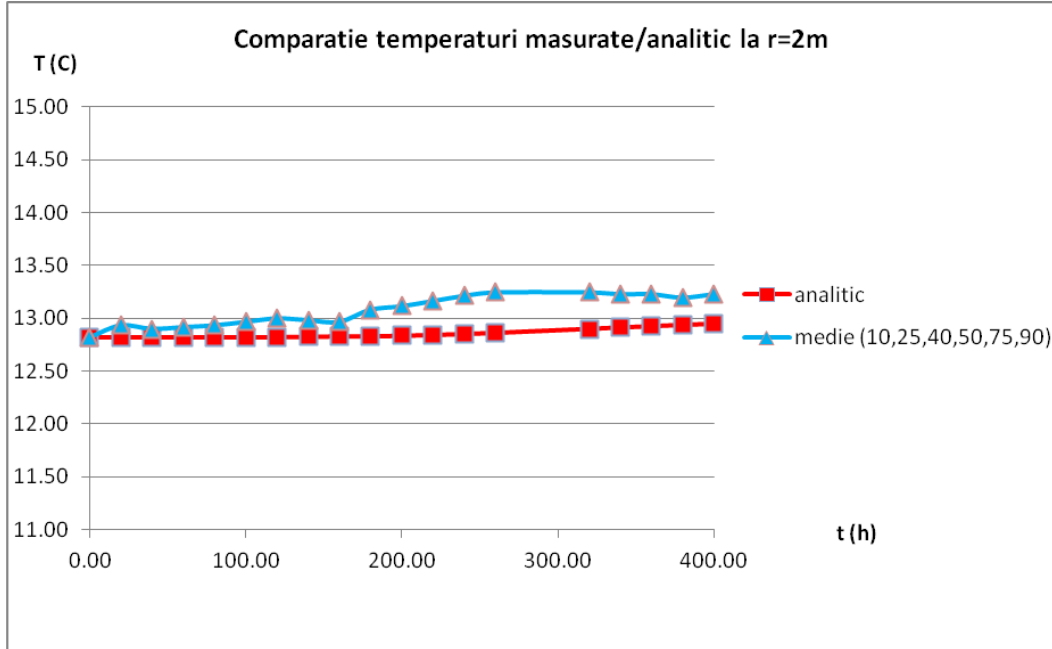


Fig. 6.10 Graficul măsurătorilor temperaturii la r=2m

În figura 6.10 avem graficul distribuției temperaturilor din subteran la sonda numărul zece la diferite adâncimi și media acestora.

Tabel 6.7 Comparație temperaturi măsurate cu cele calculate pentru r = 2m

timp f (h)	medie (10,25,40,50,75,90)	analitic
0	12,82	12.82
20	12,93	12.82
40	12,90	12.82
60	12,92	12.82
80	12,93	12.82
100	12,97	12.82
120	13,00	12.82
140	12,98	12.83
160	12,97	12.83
180	13,08	12.83
200	13,12	12.84
220	13,17	12.84
240	13,22	12.85
260	13,25	12.86
320	13,25	12.90
340	13,23	12.91
360	13,23	12.92
380	13,20	12.93
400	13,23	12.94

Fig. 6.11 Comparație temperaturi măsurate și cele analitice $r = 2$ m

În figura 6.11 putem observa comparația dintre media valorilor măsurate și rezultatul soluției analitice

Tabel 6.8 Comparație temperaturi medii măsurate cu cele calculate pentru $r = 2$ m

timp f (h)	medie (40,50,75,90)	analitic
0	13,15	13.15
20	13,275	13.15
40	13,25	13.15
60	13,25	13.15
80	13,3	13.15
100	13,225	13.15
120	13,325	13.15
140	13,15	13.15
160	13,25	13.16
180	13,375	13.16
200	13,35	13.17
220	13,4	13.17
240	13,45	13.18
260	13,5	13.19
320	13,525	13.23
340	13,475	13.24
360	13,5	13.25
380	13,45	13.26
400	13,5	13.27

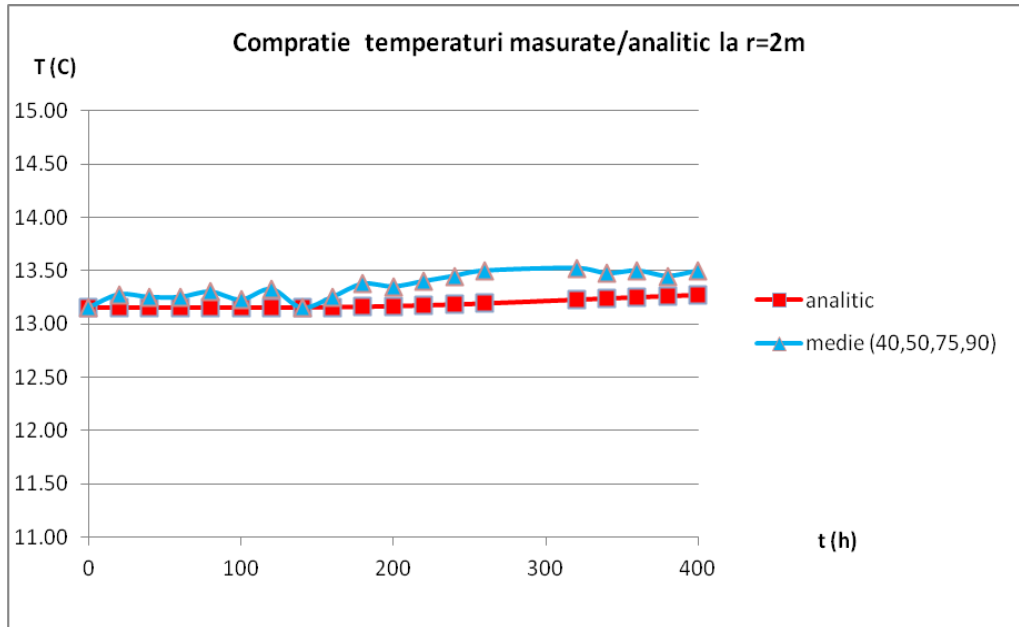


Fig. 6.12 Comparație temperaturi medii măsurate cu cele analitice la $r = 2\text{m}$

În figura 6.12 găsim graficul comparației dintre media temperaturii la $r = 2\text{m}$ și valoarea calculată analitic, fără valorile la adâncimi de 10 și 25 m.

Concluzii referitoare la distribuția temperaturii pentru un ciclu de funcționare, cazul $r = 2\text{m}$

Diferența dintre temperatura medie și cea calculată, T este de $\sim 0,29\text{ }^\circ\text{C}$ în cazul mediei tuturor valorilor măsurate și $0,23\text{ }^\circ\text{C}$ în cazul nefolosirii valorilor adâncimilor de 10 și 25 m

6.3.1.3 Cazul III ($r = 3\text{m}$)

Parametrii pentru calcul:

Timpul de funcționare	$t_f = 180\text{h}$
Timpul total	$T = 400\text{h}$
distanța un punct oarecare M și foraj	$r = 3\text{m}$
Cantitatea (debitul) de căldură introdusă	$Q = 22\text{ W/m}$
adâncimea sondei	$m = 100\text{ m}$
conductivitatea termică	$\lambda = 1,1\text{ W/mK}$
capacitatea specifică de căldură volumetrică	$\rho C = 2,5 * 10^6\text{ J/(m}^3\text{K)}$
difuzivitatea termică	$\alpha = 4,4 * 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$

Pentru $r = 3\text{m}$ $E_1\left(-\frac{r^2}{4at}\right) > 0,2$ însemnând că vom folosi a doua aproximație a ecuației

Tabel 6.9 Măsurători ale valorilor temperaturi la $r = 3\text{m}$

timp f (h)	10_3 010 m	10_3 025 m	10_3 040 m	10_3 050 m	10_3 075 m	10_3 090 m	medie (10,25,40,50,75,90)
0	12,6	11,6	12,7	12,3	13,6	13	12,63
20	12,6	11,7	12,6	12,9	13,6	13	12,73
40	12,6	11,7	12,6	12,8	13,5	13	12,70
60	12,6	11,6	12,5	13,1	13,5	13	12,72
80	12,8	11,5	12,7	13,4	13,2	13,2	12,80
100	12,4	11,9	12,8	11,4	14	13,2	12,62
120	12,6	11,7	12,5	12,8	13,5	12,9	12,67
140	12,4	11,9	12,8	11,5	14,1	13	12,62
160	12,5	11,4	12,6	13	13,2	13,3	12,67
180	12,8	11,7	12,6	13,4	13,3	13	12,80
200	12,6	11,7	12,7	12,7	13,6	13,1	12,73
220	12,6	11,7	12,7	12,7	13,7	13,1	12,75
240	12,6	11,7	12,7	12,7	13,7	13,1	12,75
260	12,6	11,6	12,8	12,7	13,4	13,4	12,75
320	12,7	11,5	12,6	13,2	13,3	13,2	12,75
340	12,7	11,8	12,7	13,1	13,6	13,1	12,83
360	12,7	11,9	12,7	12,9	13,8	13,1	12,85
380	12,7	11,9	12,8	12,9	13,7	13,1	12,85
400	12,7	11,8	12,7	13	13,6	13,1	12,82

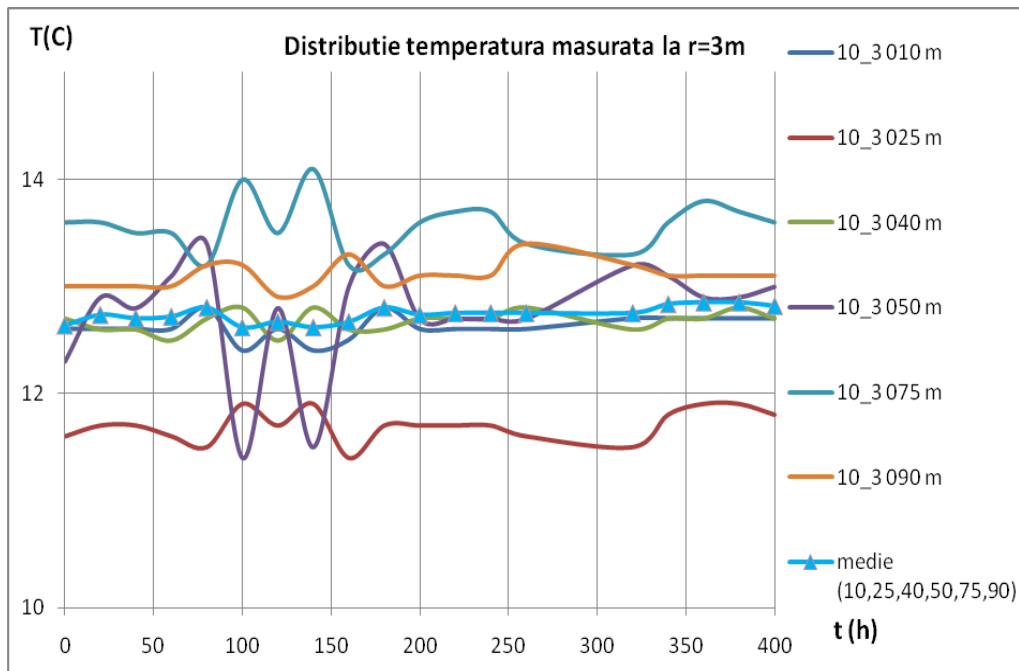
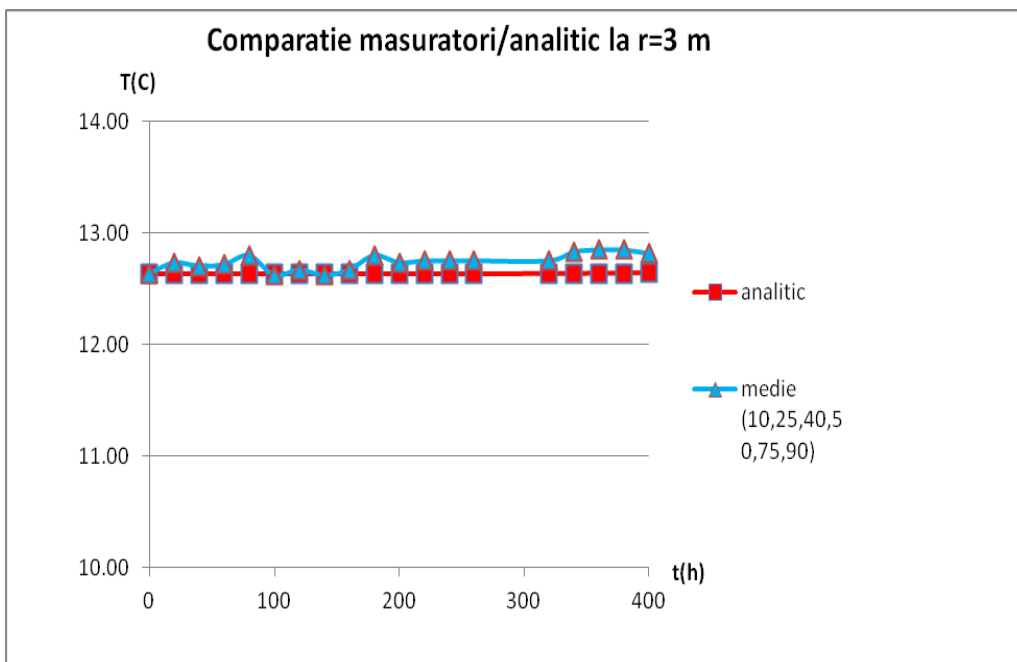


Fig. 6.13 Valorile temperaturilor măsurate și media lor

În figura 6.13 avem temperaturile măsurate în la 3m depărtare de sondă și media acestora

Tabel 6.10 Comparatie valori medii măsurători cu cele calculate analitic

timp f (h)	medie (10,25,40,50,75,90)	analitic
0	12,63	12.63
20	12,73	12.63
40	12,70	12.63
60	12,72	12.63
80	12,80	12.63
100	12,62	12.63
120	12,67	12.63
140	12,62	12.63
160	12,67	12.63
180	12,80	12.63
200	12,73	12.63
220	12,75	12.63
240	12,75	12.63
260	12,75	12.63
320	12,75	12.63
340	12,83	12.63
360	12,85	12.64
380	12,85	12.64
400	12,82	12.64

Fig. 6.14 Comparație valorilor medii măsurate cu cele calculate analitic la $r=3m$

În figura 6.14 este reprezentat graficul comparației dintre valorile măsurate medii și valorile calculate analitic pentru $r=3m$

Tabelul 6.11 Comparație valori medii măsurători cu cele calculate analitic

timp f (h)	medie (40,50,75,90)	analitic
0	12,90	12.90
20	13,03	12.90
40	12,98	12.90
60	13,03	12.90
80	13,13	12.90
100	12,85	12.90
120	12,93	12.90
140	12,85	12.90
160	13,03	12.90
180	13,08	12.90
200	13,03	12.90
220	13,05	12.90
240	13,05	12.90
260	13,08	12.90
320	13,08	12.90
340	13,13	12.90
360	13,13	12.91
380	13,13	12.91
400	13,10	12.91

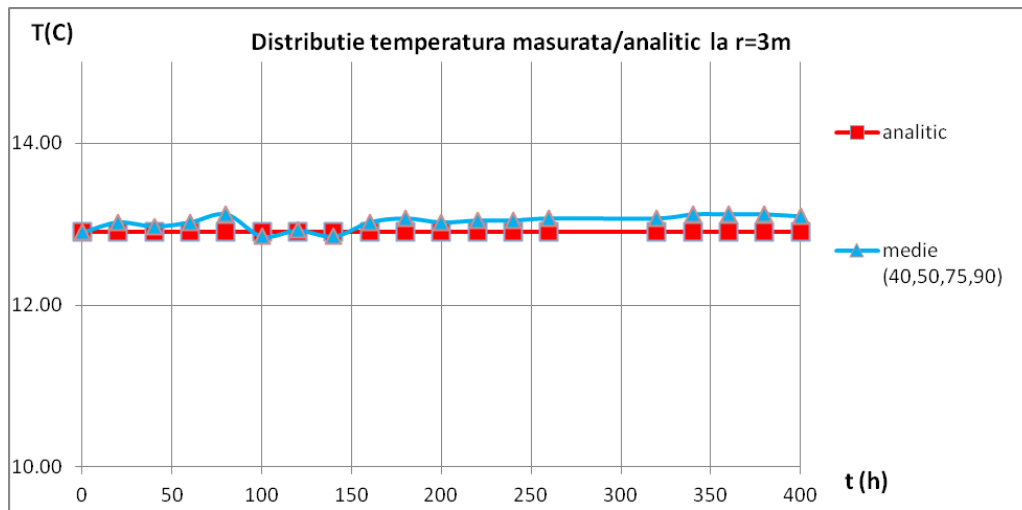


Fig. 6.15 Comparație valorilor medii măsurate cu cele calculate analitic la r=3m

În figura 6.15 este reprezentat graficul comparației dintre valorile măsurate medii și valorile calculate analitic fără valorile la adâncimi de 10 și 25 m pentru r=3m

Concluzii referitoare la distribuția temperaturii pentru un ciclu de funcționare, cazul r = 3m

Măsurătorile arată faptul că variația temperaturii la 3 m față de forajul numărul 10 este de 0,20 °C. Influența sistemului de utilizare a energiei geotermale de mică adâncime este redusă. Metoda analitică prezintă o variație a temperaturii de maxim 0,01 °C.

6.3.1.4 Cazul IV (r= 5m)

Parametrii pentru calcul:

Timpul de funcționare	$t_f = 180h$
Timpul total	$T = 400h$
distanța un punct oarecare M și foraj	$r = 5m$
Cantitatea (debitul) de căldură introdusă	$Q = 22 W/m$
adâncimea sondei	$m = 100 m$
conductivitatea termică	$\lambda = 1,1 W/mK$
capacitatea specifică de căldură volumetrică	$\rho C = 2,5 * 10^6 J/(m^3K)$
difuzivitatea termică	$\alpha = 4,4 * 10^{-7} m^2/s$

Pentru $r = 3m$ $E_r \left(-\frac{r^2}{4at} \right) > 0,2$ însemnând că vom folosi a doua aproximație a ecuației (5.8).

Tabelul 6.12 Măsurători ale valorilor temperaturi la $r = 5\text{m}$

timp f (h)	10_5 010 m	10_5 025 m	10_5 040 m	media (10,25,40m)
0	11,9	12,5	12	12,13
20	11,9	12,2	12,2	12,10
40	11,9	12,3	12,2	12,13
60	11,9	12,3	12,3	12,17
80	11,7	12,6	12,2	12,17
100	11,8	13	11,9	12,23
120	11,8	12,2	12,2	12,07
140	12	12,1	12,1	12,07
160	11,9	12,4	12,2	12,17
180	11,8	12,3	12,3	12,13
200	11,8	12,4	12,2	12,13
220	11,9	12,3	12,2	12,13
240	11,8	12,4	12,2	12,13
260	11,9	12,6	12,1	12,20
320	11,8	12,2	12,3	12,10
340	11,9	12,3	12,2	12,13
360	12	12,2	12,2	12,13
380	11,9	12,3	12,2	12,13
400	11,9	12,3	12,2	12,13

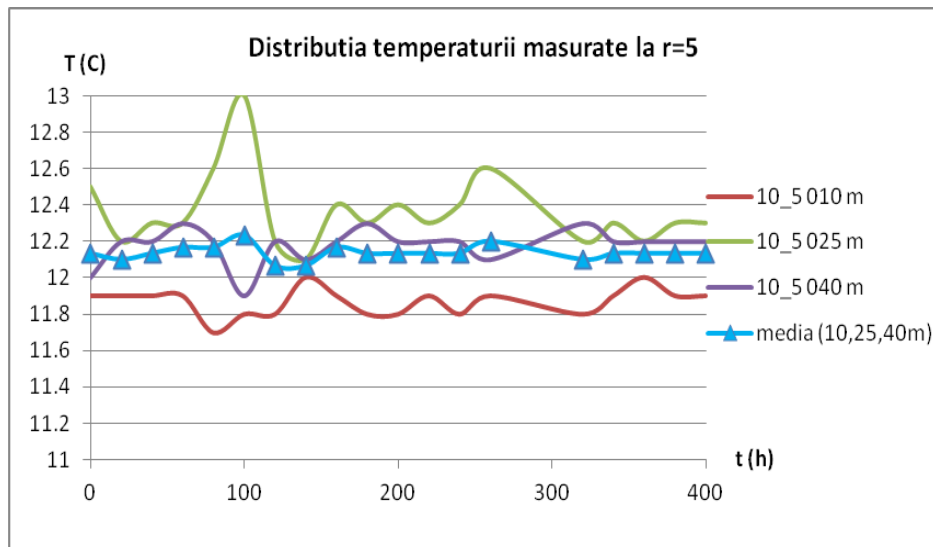


Fig. 6.16 Valorile temperaturilor măsurate pe diferite adâncimi

Tabelul 6.13 Comparație valori medii măsurători cu cele calculate analitic

timp f (h)	media (10,25,40m)	analitic
0	12,13	12.13
20	12,10	12.13
40	12,13	12.13
60	12,17	12.13
80	12,17	12.13
100	12,23	12.13
120	12,07	12.13
140	12,07	12.13
160	12,17	12.13
180	12,13	12.13
200	12,13	12.13
220	12,13	12.13
240	12,13	12.13
260	12,20	12.13
320	12,10	12.13
340	12,13	12.13
360	12,13	12.13
380	12,13	12.13
400	12,13	12.13

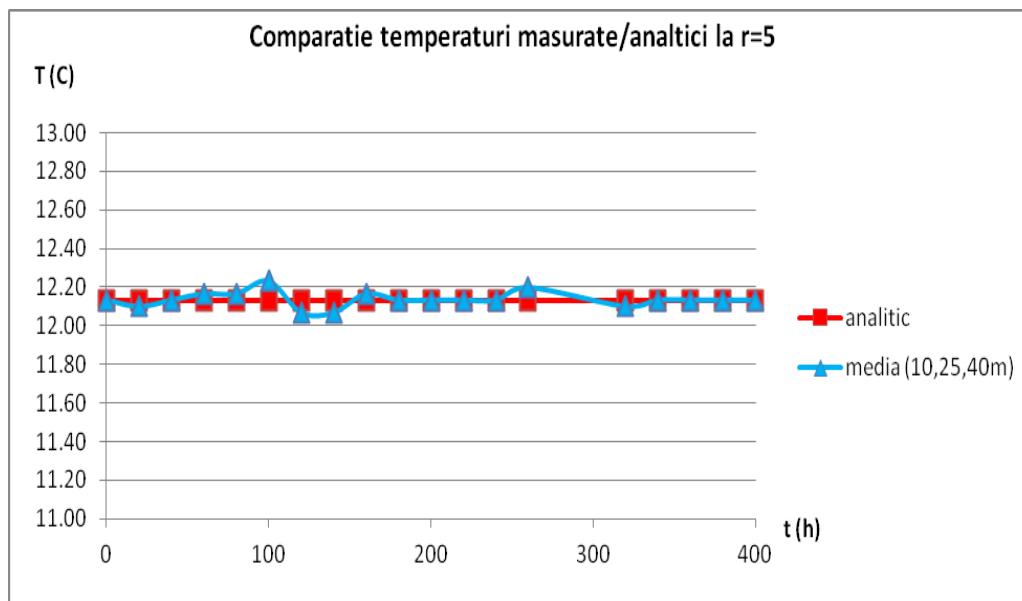


Fig. 6.17 Comparație valori medii măsurători cu cele calculate analitic

Concluzii referitoare la distribuția temperaturii pentru un ciclu de funcționare, cazul $r = 5m$

Măsurătorile arată faptul că variația temperaturii la 5m față de forajul 10 este practic 0 (zero). Acest lucru însemnând că influența funcționării sistemului este

relativ inexistentă. În figura 6.17 avem graficul distribuției temperaturilor medii măsurate la $r = 5\text{m}$ și valorile calculate analitic.

Sintetizând aceste rezultate putem concluziona faptul că soluția analitică propusă dă rezultate satisfăcătoare, în limita a 3 – 4%, necesitând un timp scurt de calcul.

6.3.2 Cazul pentru „n” cicluri de funcționare (prognoza scăderii temperaturii după „n” cicluri de funcționare)

Parametrii de intrare :

Timpul de funcționare	$t_F = 300\text{h}$
Timpul total	$T = 722\text{h}$
Ani de funcționare	1,5,10,15,20,25,30 ani
cicluri de funcționare (n)	12,60,120,180,240,300,360
distanța un punct oarecare M și foraj	$r = r_s$
Cantitatea (debitul) de căldură introdusă	$Q = 22 \text{ W/m}$
adâncimea care o atinge forajul	$m = 100 \text{ m}$
conductivitatea termică	$\lambda = 1,1 \text{ W/mK}$
capacitatea specifică de căldură volumetrică	$\rho C = 2,5 * 10^6 \text{ J/(m}^3\text{K)}$
difuzivitatea termică	$\alpha = 4,4*10^{-7} \text{ m}^2\text{/s}$

În aplicarea formulei (5.12) au fost luate următoarele date de intrare: pentru un an de funcționare $n = 12$ cicluri, pentru 5 ani $n = 60$ cicluri, pentru 30 de ani $n = 360$ de cicluri.

Tabel 6.14 Prognoza scăderii de temperatura la sfârșitul a n cicluri când $r = r_s$

ani	n (cicluri)	$\Delta\theta$ (°C)
1	12	2.33
5	60	3.38
10	120	3.84
15	180	4.11
20	240	4.3
25	300	4.45
30	360	4.56

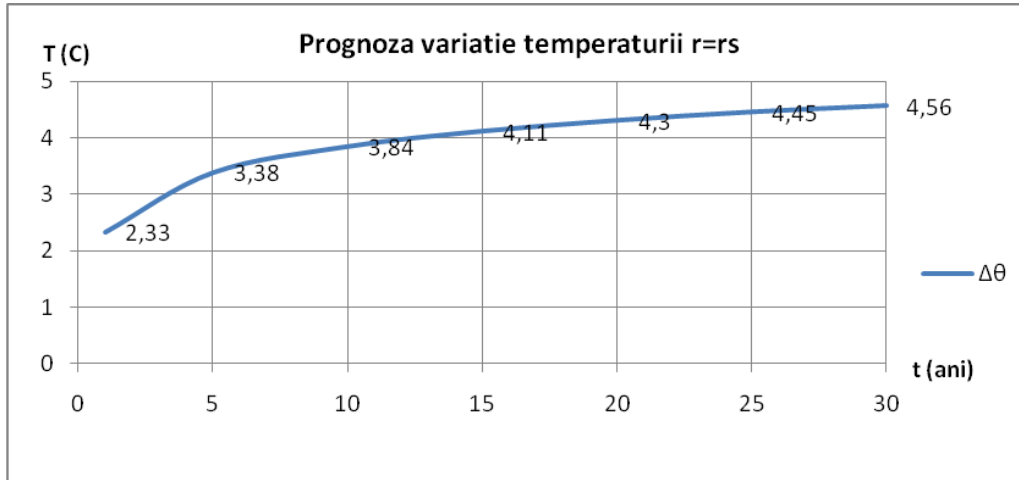


Fig. 6.18 Scăderea de temperatură în urma a n cicluri de funcționare când $r = r_s$

Concluzii referitoare la distribuția temperaturii pentru „n” cicluri de funcționare.

După cum se poate observa modelarea analitică arată faptul că după 30 de ani de utilizare conform parametrilor de intrare temperatura la mantaua forajului va scădea cu $\sim 4,5^\circ\text{C}$, afectând în acest mod performanța sistemului și implicând costuri mai mari de utilizare.

6.4 Modelarea numerică (ASMWIN) a temperaturii în funcție de spațiu și timp

Modelarea numerică a analizat variația temperaturii în funcție de spațiu și timp având ca date de intrare parametri echivalenți stabiliți în capitolul V.

Pentru început se introduce domeniul de discretizare.

$$\Delta x = 50; \Delta y = 30$$

După care se introduce tipul de acvifer, se alege acviferul sub presiune (confined)

Următorul pas este stabilirea condițiilor la limită ale modelului.

Continuăm cu grosimea stratului acvifer. Aquifer top se introduce 100, bottom 0.

Următorul parametru este pasul de timp. Acesta este stabilit la 20h. pentru înălțimea piezometrică inițială a acviferului (temperatura din sol inițială).

Se va lua în funcție de temperatura înregistrată la sonda 10 din campul geotermic Debrecen:

$$\theta_0 - 13,04; 12,82; 12,63; 12,13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Transmisivitatea echivalentă este introdusă pe tot modelul, în puț va fi considerată a fi 1, iar în apropierea forajului va fi calculată:

dacă

$$k_{fe} = \frac{n}{m} \frac{\lambda_M}{(\rho C)_M}$$

$$T_\theta = k_{fe} m$$

$$T_\theta = 8,8 \cdot 10^{-8}$$

și dacă

$$k^* = \frac{n}{4} \frac{1}{\ln\left(2 + \frac{\Delta x}{2r_s}\right)} k_{fe}$$

$$T^* = \frac{n}{4} \frac{1}{\ln\left(2 + \frac{\Delta x}{2r_s}\right)} T_\theta$$

$$T^* = 7.047 \cdot 10^{-8}$$

Introducere parametrului de transmisivitate se va realiza precum este descris în figura 6.17

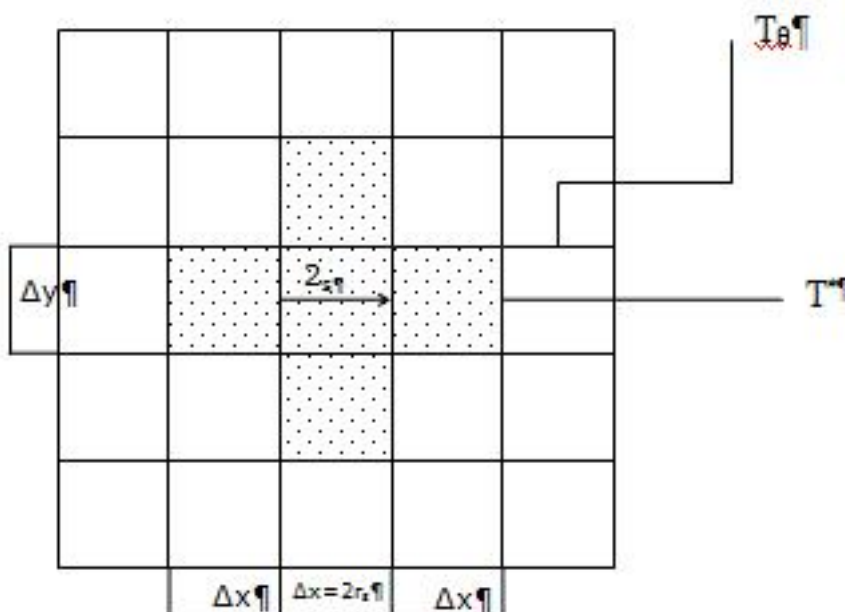


Fig. 6.19 introducerea parametrului de transmisivitate

În continuare se va introduce porozitatea și coeficientul de înmagazinare considerate 0,2.

În meniul packages avem opțiunea de puțuri. Aici trebuie introdus debitul extras sau introdus în puț. În cazul de față debitul introdus.

Pentru debitul echivalent avem:

$$Q_{\theta} = \beta_Q Q_W \Rightarrow Q_W = \frac{1}{\beta_Q} Q_{\theta}$$

$$\beta_Q = \frac{m(\rho C)_M}{n}$$

de unde rezultă rezultă :

$$Q_W = 1.76 \cdot 10^{-6}$$

După acest pas alegem din meniul rulare modul de rezolvare al modelului.

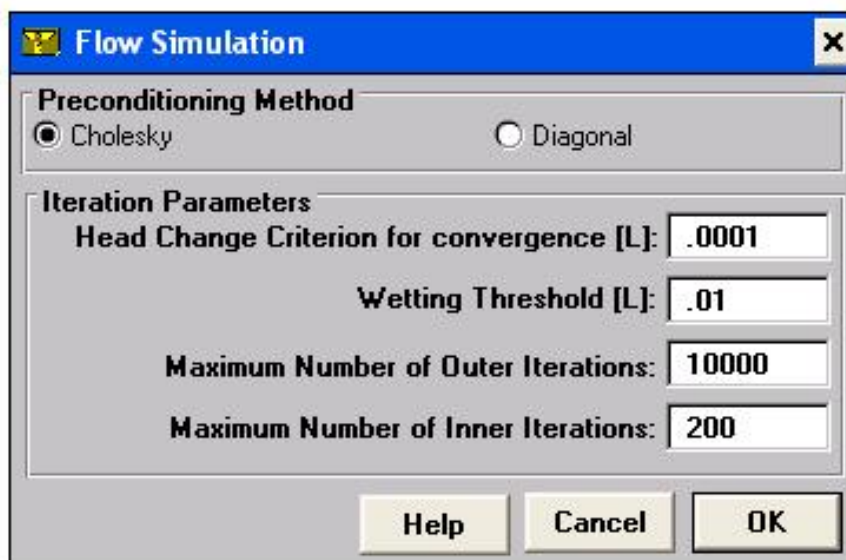


Figura 6.20 Metode rezolvare a modelului echivalent de transfer de căldură

Rezultatele modelării numerice:

Cazul în care $r = r_s$

Tabel 6.15 Comparatie valori măsurate cu valori calculate analitic și numeric

timp (h)	medie(10,15,40,70,80m)	analitic	numeric
0	13,04	13,04	13,04
20	17,48	18,02	19,39
40	18,18	19,12	21,13
60	19,04	19,77	22,04
80	21,1	20,23	22,67
100	21,7	20,58	23,17
120	21,96	20,87	23,59
140	22,14	21,12	23,94
160	22,16	21,33	24,24
180	22,46	21,52	24,50
200	16,2	16,70	18,38
220	15,2	15,75	16,84
240	14,78	15,24	16,11

260	14,52	14,91	15,64
320	14,3	14,35	14,77
340	13,96	14,24	14,58
360	13,96	14,14	14,42
380	13,84	14,06	14,28
400	13,9	13,99	14,17

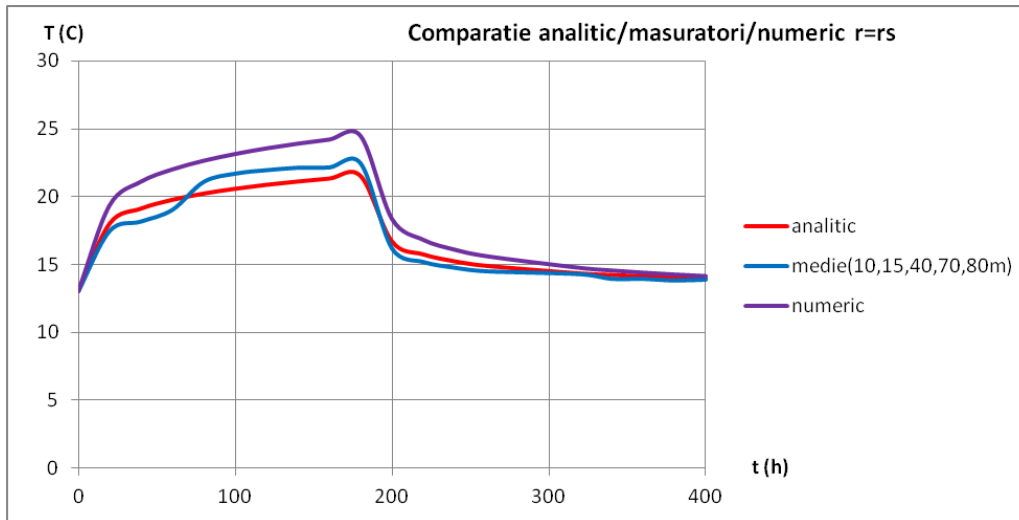


Fig. 6.21 Compararea valorilor obținute prin măsurări, numeric și analitic

Cazul în care $r = 2\text{m}$

Tabel 6.16 Comparație valori măsurate cu valori calculate analitic și numeric

timp f (h)	medie (10,25,40,50,75,90)	analitic	numeric
0,00	12,82	12.82	12,82
20,00	12,93	12.82	12,82
40,00	12,90	12.82	12,82
60,00	12,92	12.82	12,82
80,00	12,93	12.82	12,83
100,00	12,97	12.82	12,83
120,00	13,00	12.82	12,84
140,00	12,98	12.83	12,85
160,00	12,97	12.83	12,86
180,00	13,08	12.83	12,87
200,00	13,12	12.84	12,88
220,00	13,17	12.84	12,90
240,00	13,22	12.85	12,91
260,00	13,25	12.86	12,92
320,00	13,25	12.90	12,95
340,00	13,23	12.91	12,96
360,00	13,23	12.92	12,97
380,00	13,20	12.93	12,98
400,00	13,23	12.94	12,98

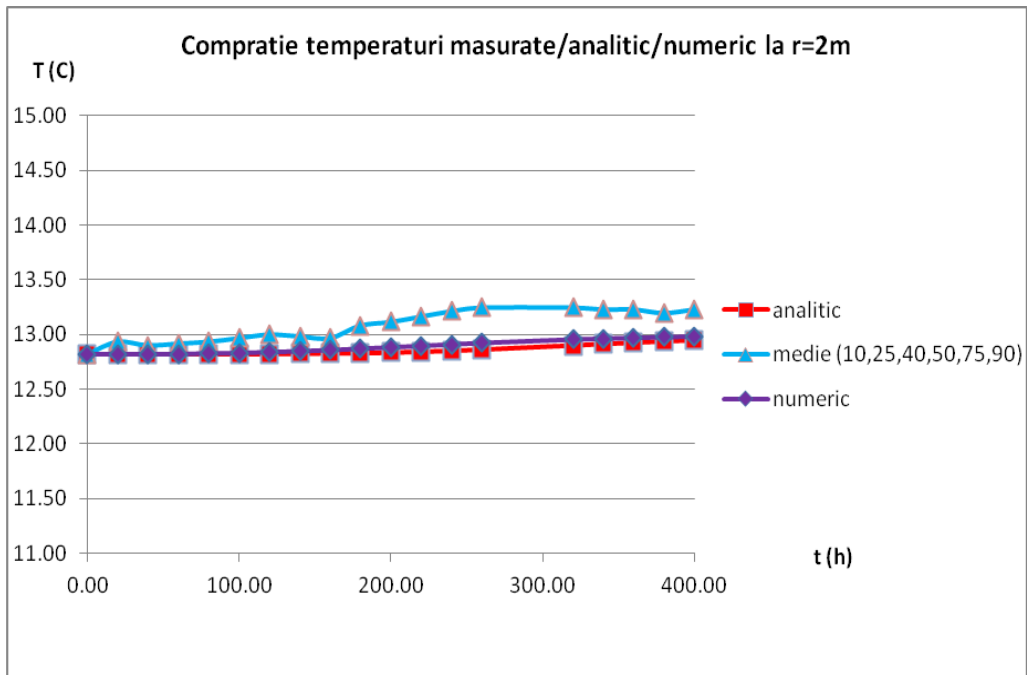


Fig. 6.22. Compararea valorilor obținute prin măsurări, numeric și analitic

Cazul în care $r = 3m$

Tabel 6.17 Comparatie valori măsurate cu valori calculate analitic și numeric

time f (h)	medie (10,25,40,50,75,90)	analitic	numeric
0	12,63	12.63	12,63
20	12,73	12.63	12,63
40	12,70	12.63	12,63
60	12,72	12.63	12,63
80	12,80	12.63	12,63
100	12,62	12.63	12,63
120	12,67	12.63	12,63
140	12,62	12.63	12,63
160	12,67	12.63	12,63
180	12,80	12.63	12,63
200	12,73	12.63	12,63
220	12,75	12.63	12,64
240	12,75	12.63	12,64
260	12,75	12.63	12,64
320	12,75	12.63	12,65
340	12,83	12.63	12,65
360	12,85	12.64	12,65
380	12,85	12.64	12,66
400	12,82	12.64	12,66

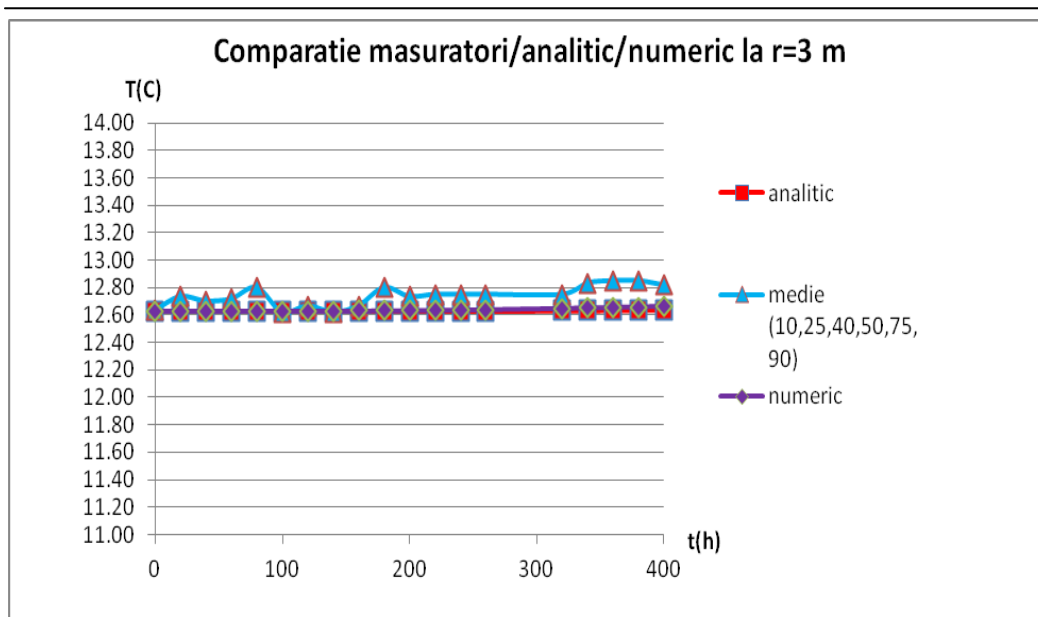


Fig. 6.23. Compararea valorilor obținute prin măsurări numeric și analitic

Cazul în care $r = 5m$

Tabel 6.18 Comparație valori măsurate cu valori calculate analitic și numeric

time f (h)	media (10,25,40m)	analitic	numeric
0	12,13	12.13	12,13
20	12,10	12.13	12,13
40	12,13	12.13	12,13
60	12,17	12.13	12,13
80	12,17	12.13	12,13
100	12,23	12.13	12,13
120	12,07	12.13	12,13
140	12,07	12.13	12,13
160	12,17	12.13	12,13
180	12,13	12.13	12,13
200	12,13	12.13	12,13
220	12,13	12.13	12,13
240	12,13	12.13	12,13
260	12,20	12.13	12,13
320	12,10	12.13	12,13
340	12,13	12.13	12,13
360	12,13	12.13	12,13
380	12,13	12.13	12,13
400	12,13	12.13	12,13

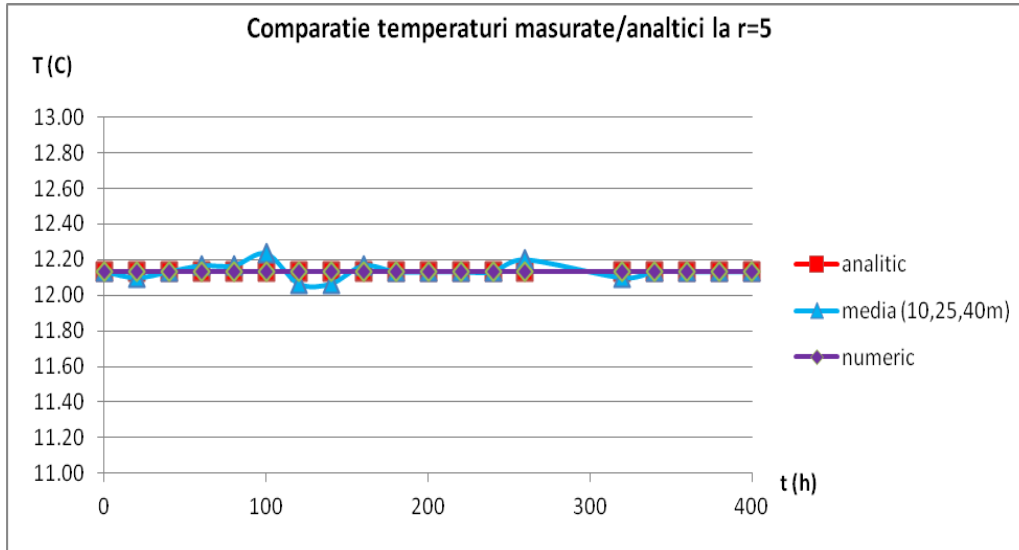


Fig. 6.24 Compararea valorilor obținute prin măsurări numeric și analitic

Concluzii.

Metoda numerică prin echivalența parametrilor, folosită pentru stabilirea distribuției temperaturii în spațiu și timp ne permite să stabilim temperatura într-un punct oarecare din spațiul la timpul folosind un software dedicat mișcării apelor subterane și transportului de poluanți. Graficele prezentate în figurile 6.21, 6.32, 6.23, 6.24 prezintă distribuția temperaturii în subteran funcție de spațiu și timp în comparație cu valorile măsurate și analitice. Se confirmă că modelul dă rezultate bune în comparație cu soluția analitică exactă și măsurătorile din teren.

CAPITOLUL VII CONCLUZII GENERALE

7.1 Conținutul tezei

Lucrarea este structurată pe șapte capitole și cuprinde 131 de pagini, 42 de tabele, 70 de figuri. 71 de relații de calcul. Lista bibliografică cuprinzând 107 titluri Teza conține următoarele capitole rezumate pe scurt:

În **capitolul I** intitulat *Introducere*, avem prezentată situația energetică mondială și națională, marcând rolul și respectiv perspectiva utilizării surselor de energie regenerabile și în cadrul acestora a energiei geotermale de mică adâncime. Se prezintă strategia energetică națională și europeană care urmărește atingerea unor obiective pentru reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră. În partea finală a capitolului este descrisă producția de energie electrică provenită din resurse geotermale la nivel mondial și național.

În **capitolul II**, intitulat *Sisteme de utilizare a energiei geotermale*, se prezintă sistemele de utilizare a geotermiei de mică adâncime. Este prezentată energia geotermală/geotermică, tipuri de resurse geotermale unde s-au descris tehnologiile dezvoltate pentru a utiliza energia geotermală/geotermică. După care au fost prezentate sistemele de utilizare a energiei geotermice cu diferite tipuri de resurse geotermice folosite Pe lângă acestea s-au prezentat costuri estimative ale implementării și funcționării sistemelor de utilizare a energiei geotermice. În final au fost prezentate aspecte de poluare a mediului și obiectivele cercetării doctorale.

Capitolul III, intitulat *Estimarea potențialului resurselor geotermale* cuprinde descrierea potențialului geotermal pe teritoriul României. Potențialului geotermal al României este prezentat prin prospecțiunea geotermică realizată prin măsurători ale temperaturii ce a permis elaborarea unor hărți geotermale pe acest teritoriu. Sunt prezentate de asemenea rezultatele estimării potențialului energiei geotermale de mare adâncime în județul Timiș în urma studiului efectuat în cadrul unui proiect al Consiliului Local Jimbolia.

Datele furnizate din profilele geotehnice ale unor foraje din zonă municipiului Timișoara permit evaluarea principalilor parametri geotermici cum sunt conductivitatea termică, căldura specifică, densitatea, parametri indispensabili pentru analiza interacțiunii termice a schimbătoarelor de căldură cu mediul subteran. și în final calcula potențialul energetic al energiei geotermice din Județul Timiș.

În **capitolul IV**, intitulat *Bazele modelării matematice, ecuații, generale, formularea matematică a problemelor pentru câmpul temperaturilor în modelarea sistemelor geotermale* sunt descriși parametrii caracteristici din cadrul proceselor de transfer de căldură în mediul subteran, considerat un mediu bifazic, apă și solid, care formează mediul poros saturat.

Se prezintă o sinteză a ecuațiilor fundamentale a transferului de căldură în medii poroase, luând în considerare principalele procese de transfer: conducția, convecția și dispersia, evidențiind fiecare proces prin reprezentări matematice adecvate. Se pornește de la ecuațiile conducției convecției și dispersiei și se ajunge la ecuația de bază a transferului de căldură în medii poroase o ecuație cu derivate parțiale neliniara.

Capitolul cuprinde și o evaluare numerică a parametrilor caracteristici, în mod deosebit a dispersiei, pentru probleme practice. Se, prezintă în detaliu analogia existența între ecuația transferului de căldură în medii poroase și ecuația transportului de poluanți în medii poroase, analogie deosebit de utilă în modelarea proceselor de transfer de căldură, cu ajutorul (prin intermediul) proceselor de transport a poluanților și a mișcării apelor subterane, existând posibilitatea de a valorifica programe de calcul (software) și soluții cunoscute din modelarea acestor procese (ex. ASMWIN, PMWIN).

În **capitolul V**, intitulat *Metode de rezolvare și soluții ale modelului matematic*, sunt descrise principalele metode de rezolvare, analitice și numerice pentru rezolvarea și soluționarea problemelor practice de transport specifice schimbătoarelor de căldură verticale. Soluțiile analitice și numerice sunt prezentate prin intermediul unor ecuații și formule de calcul direct aplicabile pentru determinarea câmpului de temperaturi din vecinătatea sondelor-schimbătoare de căldură.

La finalul capitolului sunt prezentate rezultate obținute prin aplicarea modelor matematice-numerice prin aplicarea software-ului ASMWIN, bazat pe analogia dintre ecuația transferului de căldură, respectiv ecuația curgerii apei subterane în regim nestaționar.

În **capitolul VI** intitulat *Studiu de caz modelarea matematică/numerică a câmpului geotermic pe stația pilot – Merkapt Debrecen*, este prezentată cercetarea efectuată în baza unei colaborări cu Universitatea din Debrecen.

Obiectivul urmărit în acest capitol este verificarea modelelor matematice elaborate constând din soluții analitice ale ecuațiilor de transfer de căldură în vecinătatea schimbătoarelor de căldură verticale, prin compararea rezultatelor calculelor cu cele ale maturatorilor experimentale efectuate pe un sistem geotermic realizat la Universitatea Debrecen. Experimentul a constatat în punerea în funcțiune controlată a sistemului cu schimbătoare de căldură verticale (sonde verticale de 100m adâncime) cu o durată a injecției de căldură de 180 h, urmata de o perioadă de revenire (injecție oprită) de 180h, iar ciclul complet fiind de 400h. Pe toată perioada ciclului au fost măsurate temperaturile la diferite adâncimi și distanțe explorând astfel în mod sistematic regimul termic în domeniul subteran limitrof schimbătoarelor de căldură.

Rezultatele obținute prin calcul, comparate cu cele măsurate sunt în foarte bună concordanță, confirmând corectitudinea modelelor și soluțiilor analitice propuse.

În **capitolul VII** intitulat *Concluzii generale*, sunt sintetizate principalele contribuții aduse în cadrul cercetărilor desfășurate de doctorand. În acest cadru se remarcă în mod deosebit soluțiile analitice propuse care constituie o metodă rapidă de evaluare a temperaturii pe mantaua schimbătorului de căldură, respectiv în vecinătatea acestuia, în condițiile de funcționare reală, în regim nestaționar real, ciclic, al sistemului geotermic. Formulele stabilite permit evaluarea rapidă și prognoza regimului temperaturilor, evoluția acestora pe o perioadă ciclică

îndelungata de decenii, permițând astfel aprecierea impactului sistemului asupra mediului și asupra sistemului de utilizare a energiei geotermice.

Se fac unele recomandări utile și interesante pentru continuarea studiilor unor probleme complexe, încă insuficient elucidate cum ar fi cele legate de problema evoluției interferenței între schimbătoarele de căldură pe o perioadă de funcționare îndelungată.

7.2 Contribuții personale

Pe baza unei sinteze bibliografice privind stadiul actual al cercetării și fundamentarea teoretică a problemelor legate de distribuția temperaturi spațial și temporal la mantaua schimbătorului de căldură, asupra rezultatelor simulării se aduc o serie de contribuții dintre care se menționează în mod deosebit:

- sintetizarea unui material bibliografic la zi în vederea stabilirii stadiului actual al utilizărilor energiilor regenerabile și în special al celor geotermale în context național și european
- identificarea parametrilor fizici reprezentativi pentru sistemele tehnice de exploatare a energiei geotermice de mică adâncime din județul Timiș și estimarea pe aceasta baza a potențialului energiei geotermale de mică adâncime
- Dezvoltarea unor soluții analitice pentru evaluarea rapidă a evoluției câmpului de temperatură în spațiu și timp în zona schimbătoarelor de căldură verticale, în regim nepermanent, ciclic, pe mantaua sondelor verticale, respectiv la diferite distante
- Propunerea unor aproximări simplificate pentru soluția analitică, care permite evaluarea rapidă a modificării temperaturii în timp (prognoza), după un număr arbitrar de mare de cicluri alternative de funcționare, caracteristic sistemelor geotermice de mică adâncime,
- Modelarea numerică a variației temperaturii în spațiu și timp în zona sondelor, prin folosirea unor software-uri cunoscute din modelarea mișcării apei subterane (ASMWIN, respectiv PMWIN), folosind o metoda de bazata pe analogia (echivalenta) parametrilor caracteristici din domeniul hidraulicii subterane cu cele caracteristice transferului termic, din mediile subterane unde sunt amplasate schimbătoarele de căldură
- Efectuarea unor maturatori experimentale pe o stație de pilot cu schimbătoare de căldura verticale realizat la Universitatea Debrecen, prin punerea în funcțiune controlata a sistemului cu schimbătoare de căldura verticale (sonde verticale de 100m adâncime) cu o durată a injecției de căldura de 180 h, urmata de o perioada de revenire (injecție oprita) de 180h, iar ciclul complet fiind de 400h; pe toata perioada ciclului au fost măsurate temperaturile la diferite adâncimi și distante explorând astfel în mod sistematic regimul termic în domeniul subteran limitrof schimbătoarelor de căldură.
- Verificarea soluțiilor teoretice propuse prin compararea rezultatelor calculelor cu cele ale maturatorilor experimentale constatând o foarte buna concordanta, confirmându-se astfel corectitudinea modelelor și soluțiilor analitice propuse.
-

7.3 Concluzii și recomandări

Sistemele de utilizare a energiei geotermice de mică adâncime extrag căldura din subteran modificând regimul temperaturilor. Această modificare a regimului termic subteran poate duce la efecte nedorite în cazul utilizării necorespunzătoare a acestor sisteme, afectându-le totodată performanțele proprii.

În cadrul tezei s-a propus o soluție analitică aproximativă simplificată, care permite calculul distribuției temperaturilor în spațiu și timp și a prognozei temperaturilor la mantaua schimbătoarelor de căldură vertical așezate în sol, în condițiile de funcționare reală a acestor sisteme, în regim nestaționar ciclic.

Metoda eficientă și ușor de utilizat a fost testată prin compararea rezultatelor calculate cu temperaturile măsurate la stația pilot, de la firma Merkapt – Debrecen, Ungaria. Rezultatele arată faptul că soluția este bună și poate fi utilizată pentru determinarea efectului asupra regimului termic subteran al unui sistem de utilizare a energiei geotermale de mică adâncime.

Ca și probleme de perspectivă se recomandă:

- Studiul sistematic a problemei interferenței schimbătoarelor de căldură verticale așezate în grupuri (4, 6, 9), pe o perioadă de funcționare îndelungată, urmărindu-se stabilirea distanțelor optime pe baza științifică, la ora actuală existând doar recomandări empirice
- Studiul influenței curentului subteran asupra regimului temperaturilor, mai ales în ceea ce privește evoluția spațială și temporală în zonele limitrofe, sau chiar mai îndepărtate
- Elaborarea unui ghid de calcul pentru proiectarea, implementare și exploatarea sistemelor de utilizare a energiei geotermice pentru încălzire/răcire la gospodării mici și mijlocii, respectiv mari sau chiar la scară industrială

BIBLIOGRAFIE

- [1] Constantin A.T., David I., Chebuțiu A., Nicoara S.V., Vișescu M., The possibility of fitting a pumped storage plant within the complex water development on upper Barzava, Romania, Proc. of the 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Timisoara, Romania, ISBN: 978-606-554-136-8, vol. 2, septembrie 2010, pp 863-870. <http://iopscience.iop.org/1755-1315/12/1/012109>
- [2] Omer A.M., Ground-source heat pumps systems and applications Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008) 344–371]
- [3] Anderson A., Tannehill J., Pletcher R.H., Computational fluid mechanics and heat transfer, Series în Computational methods în mechanics, Taylor&Francis (1984),
- [4] Chiasson A.D., Advances în modeling of ground-source heat pump systems Faculty of the Graduate College of the Oklahoma State University în partial fulfillment of the requirements for the degree of MASTER of SCIENCE December 1999.
- [5] Sanner B., Mands E., Sauer M. K., Grundmann E., Thermal response test, a routine method to determine thermal ground properties for gshp design, International IEA Heat Pump Conference Zurich, Elveția, 2008
- [6] Baliga D., Vișescu M., Ștefanescu C „Natural attenuation – a method for aquifers rehabilitation” Buletinul științific al Universității „Politehnica” din Timișoara, seria Hidrotehnica, ISSN: 1224-6042, Ed. Politehnica, Timișoara, Romania, vol 55, nr. 69, septembrie, 2010, pp 303-306
- [7] Baumann M., Laue H.J., Muller P., Informationspaket, Wärmepumpen, heizen mit Umweltenergie, Solarpraxis AG, Berlin, 2008
- [8] Bear, J.,(1972), Dynamics of fluids în porous media, American Elsevier. New York, London, Amsterdam
- [9] Bear J., Bachmat Ye., Indroduction to Modelling of Transport Phenomena în Porous Media. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1992
- [10] Beims, U., (1983) Planung, Durchführung und Auswertung von Gütepumpversuchen: Angew. Geologie 29 (10), , S. 484 – 492
- [11] Brebbia C.A., Telles J.C.F., Wrobel L.C., Boundary Element Techniques, Springer 1984
- [12] Brebbia C.A., Dominiquez, I.: Boundary Elements. New York: Introductory Course Mc GRAW-Hill Book Company,
- [13] Busch K.H., Luckner L., Tiemer K., Geohydraulik. Berlin, Stuttgart: Gebrüder Borntraeger
- [14] Chiang W.H, Kinzelbach W., Rausch R., ASMWIN, Groundwater flow and transport modeling, an integrated program” Berlin / Stuttgart, 1998
- [15] Chiang W.H., Kinzelbach, W., 3D Groundwater modeling with PMWIN, Springer, Berlin, 2001

-
- [16] Chiang W.H., Kinzelbach W., Groundwater Modelling with PMWIN, Springer, Berlin-Heidelberg
- [17] Chung T.J., Finite Element Analysis în fluid Dynamics. New York: Mc Graw-Hill, Inc, 1978
- [18] Cohen M., Mercer W.J., Greenwald M.R., Beljin S.M., Design Guidelines for Conventional Pump-and- Treat Systems, EPA Ground Water Issue, 540/S-97/504, September
- [19] Commission of the European Communities - Communication From The Commission to the European Council and the European Parliament - An Energy Policy For Europe {Sec(2007) 12}Brussels, 10.1.2007
- [20] David I., Mathematical- numerical modelling of flow and heat transfer în geothermal reservoir, Geotermikus rendszerek fenntarthatóságának integrált modellezése, Tamop 4.2.2-08/1-2008-0017.
- [21] David I, A short overview of some results relating the modeling of flow- and transport processes în porous media. Scientific Buletin of th "POLITEHNICA" University of Timisoara, Romania, Transaction on HYDROTECHNICS, Tom 55(69), Fasc.1,2, ISSN 124-6042, pg.9-17
- [22] David I. „Grundwasserhydraulik- Strömung und Transportvorgänge“, pag 157-173, Ed. Vieweg, Braunschweig / Wiesbaden, 1998
- [23] David I., Analytical and Boundary Elements based Integral Representation for Numerical Solution of 3-D Potential Problems în Heterogeneous Media Containing Singularities. Proceedings of the 12th WSEAS International Conference on MATHEMATICAL and COMPUTATIONAL METHODS în SCIENCE and ENGINEERING (MACMESE '10), University of Algarve, Faro, Portugal, November 3-5, 2010
- [24] David I., Gerdes H., Coupling Analytical, Boundary, and Finite Element Methods to Develop a Model for Groundwater Flow with singularities, Computational Mechanics Publication, computational Methods în Water Resources, Vol.1, 362-370, 1998
- [25] David I., Analytical Methods to Model the Vacuum Induced Air and Groundwater Flow Using Horizontal Drains for Aquifer Remediation, Computational Mechanics Publication, Advances în Ecological Sciences (ECOSUD-1997), Vol.1., pp.561-570, 1998
- [26] David I., Gerdes H., Incorporation of the local three-dimensional flow în the plane BEM to model complex groundwater supply-systems. Madison, Wisconsin, USA: Proceeding of the 17th International Conference BEM, 1995
- [27] David I., Vişescu M., Ştefănescu C., Baliga D., "An approximate method for rapid estimation of the interference of vertical heat exchangers în a near surface geothermal installation", Proc. of the 34th Annual Congress of the American Romania Academy of Arts and Science, pp 495-499, Bucureşti, Mai, 2010
- [28] David I., Pisleaga M., Visescu M., Stefanescu C., Numerical experiment to determine the influence of the particle number of the random walk simulation method for heat and pollutant transport în the aquifer.

- International workshop "Global and regional în environmental protection", Balkan Environmental Association (B.EN.A.) , 26-28 November, Timisoara – ROMANIA 2010
- [29] David I., Vişescu M., Analytical solution for estimating the influence of a pre-existing uniform ground water flow on a geothermal heat production-injection well system, International Review of Applied Sciences and Engineering, Budapesta, Ungaria, Vol. 2, nr 1 ian. 2011, pp 13-17
- [30] David I., A mathematical method to calculate stratified immiscible fluid flows for aquifer remediation, Computational Mechanics Publication, Vol.1, 2002 pp. 305-312
- [31] David I., Grundwasserhydraulik. Strömungs- und Transportvorgänge. Vieweg Verlag, Wiesbaden 1998
- [32] David I., Grundwasserfassungsanlagen mit Filterrohren. Technische Berichte. Institut für Hydraulik und Hydrologie der TH Darmstadt, 1977, Nr. 19
- [33] David I., Numerische Verfahren und ihre Anwendungen în der GW Hydraulik. Manuskript zur Vorlesung SS 1992. Institut für Wasserbau TH Darmstadt, 1982
- [34] David, I. Numerische Modelle zur Simulation der Grundwasserströmung (Die Randelemente-Methode für 1-D Grundwasserströmungen). Academia Romana: Studii și ceretari de mecanica aplicata, 1989, tom 48
- [35] David I., Analytical Element Method for Modeling Coupled Internal and External Ground Water Flow în horizontal drains and Partially Penetrating Recharge Wells. În: Proceedings of the International Conference on the Analytical Element Method for the modelling of groundwater flow and applications în environmental sciences, Saint Etienne, France, 2003
- [36] David I., Mathematical- numerical modelling of flow and heat transfer în geothermal reservoir, Tamop – 4.4.4-08/1-2008-0017, Geotermikus rendszerek fenntarthatóságának integrált modellezése.
- [37] De Marsily G., Quantitative hydrology-Groundwater hydrology for engineers. Orlando, San Diego, New York: Academic Press, 1986
- [38] Ene H.I., Gogonea, S., Probleme în teoria filtratiei. Bucuresti: Editura Academiei, 1973
- [39] European Council and the European Parliament - An Energy Policy For Europe {Sec(2007) 12}
- [40] Fisher H. et al, Mixing în Inland and Coastal Waters. New York: Academic Press, 1979
- [41] Fried J.: (1975) Groundwater pollution. Development în Water Science, Vol. 4, Elsevier Scientific Publishing Co., New York (3305), 1975
- [42] Gaba A., Transferul de căldură în instalații industriale, Editura Bibliotheca, Târgoviște, 2003
- [43] Gheorghita St.I., Metode matematice în hidrogazodinamica subterana. Bucuresti editura Academiei, 1966

-
- [44] Gupta H., Roy S., Geothermal energy, an alternative resource for the 21th century, Ed. Elsevier, 2007,
- [45] Häfner F.; Sames D., Voigt H-D., Wärme- und Stofftransport. Mathematische Methoden. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1992
- [46] Hennicke P., Fishedick M., Erneuerbare Energien, mit Energieeffizienz zur Energiewende, C.H.Beck oHG, Munchen, 2007
- [47] Hirsch C., Numerical Computation of internal and external Flows, Vol. 1 si Vol. 2, 2000, John Wiley&Sons, New York
- [48] Hölting B., Hydrogeologie: Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 1992
- [49] Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart Dipl.-Geol. Marcus Schneider PSP Beratende Ingenieure, München, Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart
- [50] Kaltschmitt M., Huenges E., Wolff H., Energie aus Erdwärme, Geologie, Technik und Energiewirtschaft, Spektrum Akademischer, Germania, 2009
- [51] Kaltschmitt M., Streicher W., Wiese A., *Renewable Energy, Technology, Economics and Environment 2007*, Ed Springer
- [52] Kinzelbach W., Numerische Methoden zur Modellierung des Transportes von Schadstoffen im Grundwasser. München, 1987, R. Oldenburg Verlag
- [53] Kinzelbach W.; Rausch R., Grundwassermodellierung. Berlin-Stuttgart: Gebrüder Borntraeger 1995
- [54] Kobus H., Schadstoff im Grundwasser. DFG. Deutsche Forschungsgemeinschaft. Band 1. Wärme und Schadstofftransport im Grundwasser. VCH. Weinheim, Basel, Cambridge, New York, 1992
- [55] Kobus H., Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung VEGAS- Konzeption und Programmrahmen. Heft 82. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau. Universität Stuttgart, 1993
- [56] Kobus H., Grundwasserhydraulik. Arbeitsunterlagen zur Vertiefervorlesung. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart 1995
- [57] Kohlsch O. Oberflächennache geothermie, Erdwarmedonden - systeme unde wirtschaftlichkeit anhand von Praxisbeispielen, 2007
- [58] Konikow L., Bredehoeff J.D., Computer model of two-dimensional solute transport and dispersion in ground water. Technique of Water-Resources Investigation of the United States Geological Survey. Book 7. United States Government Printing Office, Washington
- [59] Ligett I., Liu Ph., The Boundary Integral Equation Method for Porous Media Flow. London: George Allen & UNWIN 1983
- [60] Loose P., Erdwärme-nutzung, Versorgungstechnische Planung und Berechnung, C.F. Muller, Germania 2007
- [61] Lund J.W., 100 years of geothermal power production, GHC Bulletin, 2004
- [62] Marinov, Anca Marina, Dispersia poluantilor în apele subterane, Ed. Printech, 2005, ISBN 973-718-366-5
- [63] Dickson H.M., Fanelli M., What is Geothermal Energy Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR , Pisa, Italy Prepared on February 2004

- [64] Michopoulos A., Kyriakis N., Predicting the fluid temperature at the exit of the vertical ground heat exchangers. *Applied Energy* 86, 2009, pg 2065 – 2070
- [65] Muffler P., Cataldi R., Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics* 7 (2-4) 1978, pp (53-89)
- [66] Mugur B., *Energii regenerabile*, Universitatea Tehnica din Cluj Napoca 2007
- [67] Muskat M., *The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media*. McGraw-Hill, Ann Arbor, Michigan, 1937
- [68] Nichici A., *Lucrări științifice, concepere, redactare, comunicare*, Editura Politehnica, Timișoara, 2008
- [69] Pinder F.G., Gray W., *Finite Element Simulation în Surface and Subsurface Hydrology*. New York, London: Academic Press
- [70] Polubarinova-Kochina P.Ya., *Theory of groundwater movement*: Princeton University Press 1962
- [71] Pozrikidis C., *Boundary integral and singularity methods for linearized viscous flow*, Cambridge University Press, 1992
- [72] Rogobete Gh., Țărău D., *Solurile și ameliorarea lor: Harta solurilor Banatului*, Editura Marineasa, Timișoara, 1997
- [73] Roman O.C., *Cercetari privind unele particularitati ale proiectarii geotehnice în condițiile seismice din zona banat-timisoara*. Timisoara Politehnica, 2009.
- [74] Rosca M., *Geotermalism și centrale geotermale, curs*
- [75] Rosca M., Antics M., *Curent status of geothermal energy utilization în romania International Geothermal days, Polonia 2004*
- [76] Rosca M., Antics M., Sferle M., *Geothermal Energy în Romania: Country Update 2000-2004 Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005*
- [77] Sârbu I., Kalmár F., Cinca M., *Instalații termice interioare, optimizare și modernizare energetică*, Editura Politehnica, Timișoara, 2007
- [78] Schwarz R. H., *Methoden der finiten Elemente*: B. G. Teubner Stuttgart, 1991
- [79] Spitz K.H., *Einfluss von Inhomogenität und Dichteunterschieden*, *Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart* 1985
- [80] Strack O., *Groundwater Mechanics*, New Jersey: Prentice Hall 1989
- [81] Șumălan I., David I., *A Simplified Method to Represent Singularity Conditions for Groundwater Flow by Finite Volume Method (Case Study MODFLOW)*, *Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Transactions on Hydrotechnics*, Tom 52(66), Fascicola 1 2007
- [82] Unger J., *Alternative Energietechnik*, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009
- [83] Vermeer P., Schneider M., *Einführung în die oberflächennahe Geothermie*, Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart, München, Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart
- [84] Verruijt A., *Theory of Groundwater Flow*. London: McMillan Press 1970
- [85] Viczai J., *Geothermal energy mining*, *Peridica Politehnica, Mechanical Engineering*, 52/2 (2008) 103-106

- [86] Warmeklau durch Geothermie - technische unde rechtliche Aspekte Wasser und Abfall 9/2009
- [87] Witte L.J.H., Van Gelder G.J., Spitler D.J., In-situ measurement of ground thermal conductivity: A Dutch perspective. Ashrae Transactions 2002, Vol.108 part (1)
- [88] Zang M., David I., A Multi-Object Singularity Method for Potential Problems in heterogeneous Continuum Media, Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 03200, 2005, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-03200
- [89] Zang M., Numerische Integralobjekte. Eine Methode zur Modellierung von Strömungsvorgängen in porösen Medien. Dissertation, Shaker Verlag 2005
- [90] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., The Finite Element Method Vol I and II. London, New York: McGraw Hill Book Company 1989
- [91] **** <http://ro.wikipedia.org/wiki/Litosfer%C4%83>
- [92] ****2007 Survey of Energy Resources World Energy Council 2007, World Energy Council,
http://www.worldenergy.org/publications/survey_of_energ_resources_2007/default.asp „Used by permission of the World Energy Council, London, www.worldenergy.org”
- [93] ****2010 Survey of Energy Resources World Energy Council 2010,
<http://www.worldenergy.org/publications/3040.asp> „Used by permission of the World Energy Council, London, www.worldenergy.org”
- [94] ****EAS-ERIA Biodiesel Fuel Trade Handbook: 2010
http://www.eria.org/pdf/Publication/Others/EAS-ERIA%20BFTH2010/ENERGY_SITUATION_IN_THE_WORLD.pdf
- [95] ****Energy Information Agency, International Energy Statistics,
<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=44&pid=44&aid=1&cid=ww,&syid=2004&eyid=2008&unit=QBTU>
- [96] ****http://en.wikipedia.org/wiki/geothermal_energy
- [97] ****<http://iga.igg.cnr.it/geo/geoenergy.php> 2011
- [98] ****<http://www.energetica-oradea.ro/cursuri/geotermalism-și-centrale-geotermale/index.php>
- [99] ****http://www.gov.ns.ca/nse/water/docs/droponwaterFAQ_SurfaceWater-HeatPumps.pdf
- [100] ****http://www.hvac.okstate.edu/research/Documents/chiasson_thesis.pdf
- [101] ****Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, World Population Prospects: The 2010 Revision, <http://esa.un.org/unpd/wpp/index.htm>, Monday, June 2011
- [102] ****www.geothermal-energy.org/files-31.html
- [103] Commission of the European Communities - Communication From The Commission to the European Council and the European Parliament - An Energy Policy For Europe {Sec(2007) 12} Brussels, 10.1.2007 Com(2007) 1 Final

-
- [104] Fraunhofer, Suport la dezvoltarea unui concept durabil pentru valorificarea energiilor regenerabile din județul Timiș,
http://www.jimbolia.ro/documents/publicatii/2009/20091218_Studiu_EnergiiRegenerabile_EficientaEnergetica.pdf
- [105] Strategia energetică a româniei și programe de realizare pentru perioada 2007 – 2020
- [106] Studiu privind evaluarea potențialului energetic actual al surselor regenerabile de energie în romania (solar, vânt, biomasă, microhidro, geotermie), identificarea celor mai bune locații pentru dezvoltarea investițiilor în producerea de energie electrică neconvențională
http://www.minind.ro/domenii_sectoare/energie/studii/potential_energetic.pdf
- [107] World Energy Outlook 2010 © OECD/IEA,