

# عوامل مؤثر بر استفاده از منابع آب زیرزمینی به عنوان مخزن ذخیره انرژی

علی اکبر عالم رجبی<sup>۱\*</sup> و نرگس ترابی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی اصفهان

<sup>۲</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت ۸۸/۴/۲۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۹/۶/۱۷، تاریخ تصویب ۹۰/۸/۱۲)

## چکیده

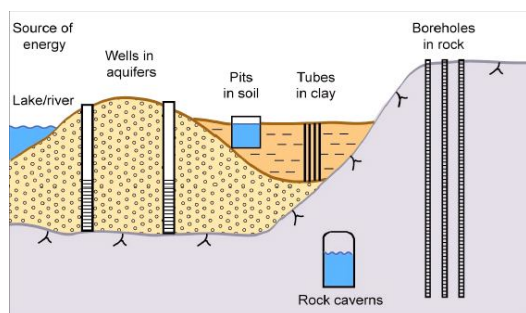
به منظور تحلیل عملکرد سیستم ذخیره زیرزمینی، حل عددی معادله حرارت در سفره آب زیرزمینی با استفاده از معادلات حاکم بر محیط متخلخل مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی یک سیستم ساده، سفره‌ای به ارتفاع  $h$  و دمای اولیه  $T_{ini}$  در نظر گرفته می‌شود. دو لایه نفوذناپذیر ولی دارای هدایت گرمایی (خاک رس) در بالا و پایین، سفره را محدود کرده‌اند. ضریب هدایت گرمایی سفره و ظرفیت گرمایی حجمی آن تابعی از میزان تخلخل و خواص آب و فاز جامد در نظر گرفته می‌شود. همچنین تاثیر دیسپرش گرمایی در جهت شعاعی و عمودی روی ضریب هدایت گرمایی لحاظ می‌شود. محیط متخلخل همگن و ایزوتروپیک و جریان آرام فرض می‌شود. هدف به دست آوردن توزیع دمایی سفره برای اهداف فصلی یعنی بعد از گذشت ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز از زمان شروع تزریق و یا برداشت است. با حل عددی معادله حرارت برای دبی‌ها و دماهای تزریق متفاوت و با به دست آوردن توزیع دما مشاهده می‌شود که دمای سیال تزریق شده تاثیر چندانی بر راندمان حرارتی سیستم ندارد ولی با افزایش دبی، راندمان حرارتی سیستم افزایش و با کاهش اثر پراکنش حرارتی، راندمان کاهش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** محیط متخلخل، اکیفر، سیستم‌های ATES، پراکنش حرارتی، راندمان حرارتی

## مقدمه

شکاف روز افزون بین عرضه و تقاضای انرژی و تخلیه سریع منابع انرژی برگشت ناپذیر سوخت‌های فسیلی و آثار مخرب زیست محیطی که از کاربرد آنها پدید می‌آید عاملی برای توسعه منابع انرژی مکمل و جدید مانند انرژی باد، زمین و خورشید شده است. همچنین بازیافت گرمای مازاد در بسیاری از فرایندها می‌تواند در نگهداشت منابع انرژی مؤثر باشد. با توجه به متناوب بودن انرژی خورشیدی و نیز بارهای برومندی و حرارتی ناشی از سرمایش یا گرمایش ساختمان‌ها در فصول گرم و سرد، به کارگیری سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی برای استفاده بهینه از این منابع ضروری است. یکی از بهترین راه‌های ذخیره انرژی حرارتی، ذخیره آن در زیر زمین است، جایی که قابلیت زیادی موجود ولی نامرئی است<sup>۱</sup> (UTES). چهار راه برای ذخیره انرژی حرارتی در زیر زمین وجود دارد (شکل ۱): ۱- ذخیره در اکیفرها<sup>۲</sup> (ATES) (سیستم باز)، ۲- ذخیره در مبدل‌های حرارتی زمینی<sup>۳</sup> (BTES) (سیستم بسته)، ۳- ذخیره در غارهای صخره‌ای<sup>۴</sup> (CTES) - ۴- ذخیره در حفره‌ها و گودال‌ها

(tank, pit)



شکل ۱: دسته‌بندی سیستم‌های UTES [۱].

در سیستم بسته سیال (معمولا آب) به کمک پمپ از طریق مبدل‌های حرارتی در مسیر معین و بسته‌ای گردش می‌کند. اما در سیستم باز، آب از سفره‌های آب زیرزمینی به بیرون از زمین پمپ می‌شود و دوباره با استفاده از چاه‌ها یا حفره‌های زیرزمینی به درون زمین تزریق می‌شود. مزیت سیستم‌های بسته ناوابستگی آنها به سفره‌های آب زیرزمینی و خواص شیمیایی آب است و

### معادله جریان

جریان آب در زیر زمین توسط قانون دارسی با فرض جریان آرام بیان می‌شود:

$$\vec{V}_D = \frac{k}{\mu} \cdot (\nabla P - \rho_w \vec{g}) \quad (2)$$

که  $k$  تانسور نفوذپذیری و  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی آب است.

### معادله انرژی

با فرض اینکه آب و محیط متخلخل در سطح مشترک آنها در هر نقطه همدم باشند، انتقال حرارت در محیط متخلخل توسط هدایت حرارتی و انتقال انرژی با جریان سیال اتفاق می‌افتد.

$$(\rho c)_a \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_a^* \nabla T) - (\rho c)_w \nabla \cdot (V_D T) \quad (3)$$

که  $(\rho c)_w$  و  $(\rho c)_a$  به ترتیب ظرفیت حرارتی حجمی اکیفر و آب و  $\lambda_a^*$  تانسور هدایت حرارتی موثر محیط متخلخل است.  $(\rho c)_a$  و  $\lambda_a$  هر یک تابعی از تخلخل و ظرفیت حرارتی حجمی آب و مواد جامد محیط متخلخل در نظر گرفته می‌شود [۶ و ۷]:

$$(\rho c)_a = \varepsilon (\rho c)_w + (1 - \varepsilon) (\rho c)_s \quad (4)$$

$$\lambda_a = \varepsilon \lambda_w + (1 - \varepsilon) \lambda_s \quad (5)$$

### تانسور پراکنش

پدیده پراکنش علاوه بر اینکه در راستای جریان سیال اتفاق می‌افتد (پراکنش طولی) در راستای عمود بر جریان نیز رخ می‌دهد که به پراکنش عمودی موسوم است. تانسور پراکنش محیط متخلخل با احتساب نفوذ مولکولی و پراکنش هیدرودینامیکی عبارت است از

$$D_{ij} = (\alpha_T |q| + \varepsilon \tau D_m) \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{q_i q_j}{|q|} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (6)$$

که  $\alpha_T$  و  $\alpha_L$  به ترتیب ضرایب پراکنش در جهت جریان و در جهت عمود بر جریان،  $D_m$  نفوذ مولکولی،  $\tau$  ضریب انحنای مسیر حرکت آب (tortuosity محیط)،  $\delta_{ij}$  تابع دلتای کرانکر و  $\varepsilon$  ضریب تخلخل است.  $\alpha_L$  باعث جلو یا عقب بردن پراکنش در طول مسیر جریان و  $\alpha_T$  باعث پراکنش یکنواخت در مسیر عمود بر جریان می‌شود.  $\alpha_T$

ویژگی اصلی سیستم‌های باز ظرفیت بالای انتقال حرارت چاه در مقایسه با سیستم‌های بسته است که باعث ارزان تر شدن این سیستم‌ها شده است. موارد ۱ و ۲ از لحاظ اقتصادی و تجاری در بسیاری از کشورها مقرون به صرفه است. موارد ۳ و ۴ کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند و بسیار گران و پرخارج هستند [۱ و ۲].

به کارگیری سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی زیر زمینی در اروپا و آمریکای شمالی گسترش یافته و کاربرد آن در چین نیز رو به افزایش است [۳]. با توجه به اهمیت استفاده از سیستم‌های UTES و فواید اقتصادی، زیست محیطی و صرفه جویی در مصرف انرژی حاصل از آن، بررسی و تحقیق و انجام پژوهش‌های متعدد به منظور برآورد عملکرد و راندمان حرارتی این سیستم‌ها ضروری به نظر می‌رسد. تحلیل و بررسی عملکرد و انتخاب روش بررسی پاسخ گرمایی سیستم ذخیره انرژی گرمایی زیرزمینی دارای اهمیت ویژه‌ای است و تا کنون موضوع تحقیقات متعددی بوده است [۴ و ۵]. تحقیقات انجام شده در این زمینه عمدتاً در خارج از کشور و آن هم بیشتر در باره نحوه عملکرد پروژه‌های اجرا شده در این زمینه بوده و جزئیات نظری حاکم بر آن چندان گزارش نشده است. به علاوه در مورد تحلیل چنین سیستم‌هایی در ایران چه درباره حل عددی و چه درباره راه اندازی و اجرای این سیستم‌ها مطلب مکتوبی یافت نگردید. به منظور شناخت بهتر چنین سیستم‌هایی، در این مقاله ضمن تحلیل عوامل مؤثر بر عملکرد سیستم‌های ATES، ذخیره و برداشت انرژی گرمایی در آبخوان‌ها برای دوره‌های فصلی بررسی و راندمان آنها به کمک روش عددی محاسبه می‌گردد.

### معادلات حاکم بر محیط متخلخل

معادلات بقای حاکم بر جریان آب درون اکیفر را می‌توان چنین بیان کرد:

### معادله پیوستگی

$$\nabla \cdot (\rho_w V_D) = \frac{\partial (\varepsilon \rho_w)}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن  $V_D$  سرعت ظاهری دارسی،  $\rho_w$  چگالی آب و  $\varepsilon$  ضریب تخلخل اکیفر است.

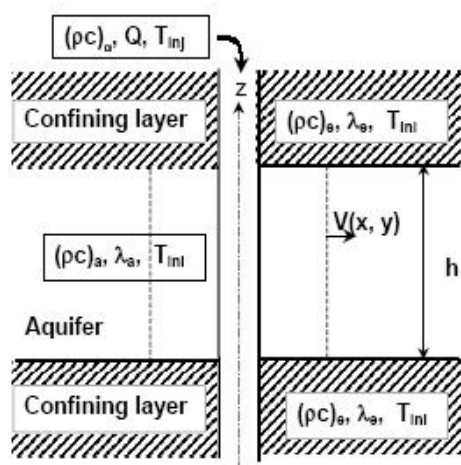
دارند و بنابراین برای لایه‌های محدود کننده بالا و پایین می‌توان نوشت:

$$\nabla \cdot (\lambda_e \cdot \nabla T) = (\rho c)_e \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

که  $\lambda_e$  و  $(\rho c)_e$  به ترتیب ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی حجمی لایه‌های نفوذناپذیرند [۶].

### مدل‌سازی و حل سیستم ATES

برای مدل‌کردن و ساده‌سازی سیستم ATES تنها یک چاه در نظر گرفته می‌شود که ذخیره و برداشت آب به یا از اکیفر توسط این چاه انجام می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲: نمایی از سیستم اکیفر ATES.

اکیفری به ارتفاع  $h$ ، ابعاد شعاعی محدود با نفوذپذیری  $k$ ، تخلخل  $\varepsilon$ ، ضریب هدایت حرارتی  $\lambda_a^*$  و دمای  $T_{ini}$  را در نظر می‌گیریم که از بالا و پایین توسط لایه‌های نفوذناپذیر ولی دارای هدایت گرمایی محدود شده است. درون سفره چاهی به شعاع  $R$  قرار دارد. آب با دبی ثابت  $Q_1$  و دمای  $T_{inj}$  که بزرگتر از دمای طبیعی اکیفر است درون چاه تزریق می‌شود. آب برای مدتی درون اکیفر ذخیره می‌شود و در نهایت با دبی  $Q_2$  برای مصارف گرمایی برداشت می‌شود. هدف به دست آوردن توزیع دمایی اکیفر با روش عددی برای اهداف فصلی یعنی بعد از گذشت ۹۰، ۶۰، ۳۰ روز از زمان ذخیره و در نهایت محاسبه راندمان حرارتی سیستم برای دبی‌های مختلف، درجه حرارت‌های متفاوت تزریق و .... است.

معمولاً بین ۰.۱ تا ۰.۳ مقدار  $\alpha_L$  در نظر گرفته می‌شود. در سیستم‌های با نفوذپذیری غیر همسان مقدار  $\alpha_L$  می‌تواند کمتر از ۰.۰۱ مقدار  $\alpha_T$  در جهت مسیری باشد که دارای بیشترین نفوذپذیری است [۸ و ۹].

انتقال انرژی در سیستم آب - ذرات جامد به وسیله جریان آب زیرزمینی و هدایت حرارتی از دماهای بالاتر به دماهای پایین‌تر در هر دو ماده سیال و جامد صورت می‌گیرد. سرعت‌های واقعی آب زیرزمینی از نقطه‌ای به نقطه دیگر در فضای سه بعدی از یک اکیفر، ممکن است به طور قابل ملاحظه‌ای با سرعت دارسی در یک محیط دو بعدی که به وسیله قانون دارسی محاسبه می‌شود، اختلاف داشته باشد. اندازه‌گیری سرعت (نه سرعت دارسی) در سیستم‌های واقعی معمولاً پیچیده است. در شرایط خاص که آبهای زیرزمینی با دماهای مختلف با هم مخلوط می‌شوند ممکن است حرکت آبها سریع‌تر یا کندتر از  $V_D$  صورت پذیرد. این شرایط به نام پراکنش انرژی نامیده می‌شود. در مدل به کار گرفته شده، پراکنش انرژی با مقدار ضریب هدایت حرارتی محیط سیال - جامد، در جهت جریان سیال جمع می‌گردد. این مدل در حقیقت بیانگر انتقال در یک محیط کاملاً همگن در جریان یک بعدی است در حالی که در جریان غیر یکنواخت و محیط غیر همگن (مثلاً وقتی که شکاف‌هایی در بستر وجود داشته باشد) نیاز به اعمال تقریب و برون‌یابی است [۱۰].

تانسور هدایت حرارتی مؤثر: تانسور هدایت حرارتی اکیفر شامل پراکنش در سیال و هدایت حرارتی در فاز جامد محیط متخلخل و مایع است و چنین تعریف می‌شود:

$$\lambda_{a_{i,j}}^* = (\rho c)_w \left[ \alpha_T |V_D| \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_i v_j}{|V_D|} \right] + \lambda_a \delta_{ij} \quad (7)$$

که  $\alpha_L$ ، پراکنش طولی در جهت جریان و  $\alpha_T$ ، پراکنش در جهت عمود بر جریان و  $\delta_{ij}$  تابع دلتای کرانکر است. در نهایت تانسور هدایت حرارتی مؤثر اکیفر برای مساله دو بعدی حاضر (شرط تقارن محوری) به صورت زیر در می‌آید [۹]:

$$\lambda_a^* = \begin{bmatrix} (\rho c)_w \alpha_L V_D + \lambda_a & 0 \\ 0 & (\rho c)_w \alpha_T V_D + \lambda_a \end{bmatrix} \quad (8)$$

لایه‌های نفوذناپذیر بالا و پایین تنها دیفیوژن حرارتی

## فرضیات

فرضیات در نظر گرفته شده برای حل مساله به شرح

زیر است:

- جریان تزریق شده پایاست .
- خواص ترموفیزیکی مستقل از دماست.
- ناحیه حل همگن و ایزوتروپیک است.
- مولفه‌های عمودی سرعت همه جا صفر هستند .
- جابه‌جایی طبیعی (جریان القا شده توسط) گرادیان دما در نظر گرفته نمی‌شود .
- اکیفر اشباع است.
- تعادل دمایی موضعی در سطح مشترک آب و فاز جامد محیط متخلخل وجود دارد.
- لایه‌های محدود کننده بالا و پایین نفوذ ناپذیرند و فقط دیفیوژن حرارتی دارند.
- جنس اکیفر شن و ماسه‌ای و جنس لایه‌های نفوذناپذیر بالا و پایین خاک رس است.
- میدان سرعت تنها ناشی از دبی آب تزریق شده است و اثر سرعت آبهای زیر زمینی (جریان محلی) بر میدان سرعت ناچیز است.
- از واکنش‌های شیمیایی و تلفات حرارتی چاه صرف نظر می‌شود.

## معادلات و شرایط اولیه و مرزی

برای مرحله تزریق و برداشت معادله پیوستگی به صورت زیر ساده شده و در نهایت چون جریان شعاعی با نرخ جریان ثابت برقرار است سرعت دارسی تنها با فاصله از نقطه تزریق آب تغییر می‌یابد. بنابراین :

$$\nabla \cdot (\rho_w V_D) = 0 \Rightarrow V_D = Q_i / 2\pi hr \quad (10)$$

برای گسسته سازی معادله انرژی و حل آن از مختصات استوانه‌ای استفاده می‌شود. به علت شرط تقارن محوری،  $\partial/\partial\theta = 0$  شده که با جایگزین کردن مقدار  $V_D$  مساله به حالت دوبعدی زیر در می‌آید.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left( \frac{\lambda_{ar}^*}{(\rho c)_a r} - \frac{(\rho c)_w Q}{2\pi h (\rho c)_a r} \right) \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\lambda_{ar}^*}{(\rho c)_a} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + \frac{\lambda_{az}^*}{(\rho c)_a} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

که  $\lambda_{az}^* = (\rho c)_w \alpha_T V_D$  و  $\lambda_{ar}^* = (\rho c)_w \alpha_L V_D$  است.

در مرحله تزریق شرایط مرزی و اولیه به صورت

زیر می‌باشند:

$$T(t, r, z)_{r=0} = T_{ini} \quad \text{و}$$

$$T(t, r, z)_{r \rightarrow \infty} = T_{ini} \quad \text{و} \quad T(t, R, z)_{r=R} = T_{inj}$$

در مرحله ذخیره چون آبی درون اکیفر تزریق نمی‌شود، ( $Q_i=0$ ) معادله حرارت برای اکیفر به صورت زیر در می‌آید و به جای هدایت حرارتی موثر  $(\lambda_a^*)$ ، همان هدایت حرارتی اکیفر یعنی  $\lambda_a$  در نظر گرفته می‌شود.

$$(\rho c)_a \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_a \cdot \nabla T) \quad (12)$$

شرط اولیه برای مرحله ذخیره همان جوابهای به دست آمده از مرحله تزریق و شرط مرزی برای این مرحله به صورت زیر است:

$$\left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \quad \text{و}$$

$$T(t, r, z)_{r \rightarrow \infty} = T_{ini}$$

در مرحله برداشت، معادله حرارت و شرایط مرزی دقیقاً مانند مرحله تزریق است با این تفاوت که چون در اینجا آب با دبی  $Q_2$  از چاه بیرون کشیده می‌شود، علامت  $Q_2$  در معادلات باید منفی باشد و در حل عددی، دمای دیواره چاه برابر با دمای نقطه قبل از آن در زمان قبلی در نظر گرفته می‌شود.

**اعداد بی‌بعد:** برای سهولت در جمع بندی داده‌های ورودی و نتایج و رسم نمودارها اعداد بی‌بعد زیر تعریف می‌شود:

**دمای بی‌بعد:** اگر  $T$  دمای اکیفر در فاصله شعاعی  $R$  باشد:

$$\theta_R = \frac{T - T_{ini}}{T - T_{inj}} \quad (13)$$

**زمان بی‌بعد:** چنانچه  $t$  زمان از شروع تزریق یا برداشت باشد:

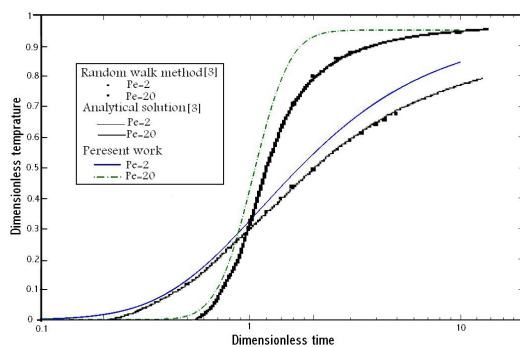
$$t_R = \frac{t}{t_{inj}} \quad (14)$$

**عدد پکله:** به صورت ضریب مربوط به انتشار محیطی به ضریب مربوط به هدایت هیدرولیکی تعریف می‌شود و برابر است با:

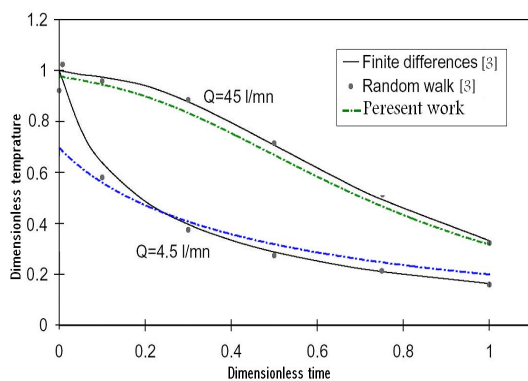
$$pe = \frac{(\rho c)_w Q}{\lambda_a 2\pi h} \quad (15)$$

زمان از شروع تزریق و  $T$  دمای اکیفر در نقطه  $R_{th}$  است. نتایج روش‌های آماری و تحلیلی که توسط دیگر محققین ارائه شده با نتایج روش عددی حاضر، در این نمودار مقایسه شده است.

شکل (۴) منحنی دمای بی‌بعد بر حسب زمان بی‌بعد برای دو دبی متفاوت 4.5 l/min و 45 l/min را نشان می‌دهد که  $t$  زمان از شروع مرحله برداشت و  $T$  دمای آب برداشت شده از اکیفر است. نتایج روش‌های آماری و اختلاف محدود که توسط دیگر محققین ارائه شده با نتایج روش عددی حاضر، در این نمودارها مقایسه شده است.



شکل ۳: مقایسه نتایج روش آماری و حل تحلیلی با نتایج روش عددی حاضر برای مرحله تزریق.



شکل ۴: مقایسه نتایج روش آماری و حل اختلاف محدود با نتایج روش عددی حاضر برای مرحله برداشت.

از مقایسه نمودارها مشاهده می‌شود که اختلافات جزئی بین نتایج وجود دارد که احتمالاً به خاطر اختلاف در فرضیات مساله است. در روش آماری و تحلیلی ابعاد شعاعی اکیفر نامحدود و ابعاد عمودی لایه‌های نفوذناپذیر نیز نامحدود فرض شده بودند در حالی که در بررسی حاضر ابعاد شعاعی و عمودی اکیفر و لایه‌های نفوذناپذیر

### پارامتر انتقال حرارت در لایه‌های نفوذناپذیر

$$\Lambda = \frac{(\rho c)_a h^r}{\lambda_e (\rho c)_e t_{inj}} \quad (16)$$

شعاع حرارتی: این فاصله نشان دهنده شعاع حرارتی نظری است که تنها توسط جابه‌جایی اجباری در اثر تزریق در طی زمان  $t_{inj}$  تولید می‌شود [۶].

$$R_{th} = \sqrt{\frac{(\rho c)_w Q t_{inj}}{(\rho c)_a \pi h}} \quad (17)$$

راندمان حرارتی سیستم: راندمان حرارتی سیستم به صورت نسبت انرژی خروجی در مرحله برداشت به انرژی ورودی در مرحله تزریق تعریف می‌شود. انرژی ورودی برابر است با:  $E_{in} = (\rho c)_w Q_1 t_{inj} (T_{inj} - T_{ini})$  که  $t_{inj}$  مدت زمان دوره تزریق است و انرژی خروجی به صورت  $E_{out} = (\rho c)_w Q_2 t_2 (T_o - T_{ini})$  بیان می‌شود، که  $t_2$  مدت زمان مرحله برداشت و  $T_o$  متوسط دمای آب خارج شده از اکیفر است و با نوشتن قانون بقای انرژی بین نقاط خروج از چاه و نقاط روی دیواره چاه به دست می‌آید:

$$\Sigma (dm_i c_p \Delta T_i) = mc_p \Delta T_o \quad (18)$$

در این رابطه  $dm_i$  و  $\Delta T_i$  به ترتیب جرم و اختلاف دمای نقاط شبکه در دیواره چاه است و داریم:

$$\Delta T_i = T_{r,i} - T_{ini}, \quad \Delta T_o = T_o - T_{ini} \quad (19)$$

### ارزیابی روش حل عددی

نتایج به دست آمده از حل عددی معادله حرارت در این قسمت آورده شده و با نتایج حاصل از سه روش حل تحلیلی، حل آماری و روش اختلاف محدود که قبلاً در این زمینه انجام شده، مقایسه شده است. در سال ۱۹۷۷ یک حل تحلیلی برای ذخیره گرما با استفاده از یک چاه تزریق، مطابق معادله (۲۰) ارائه شد. اکیفر همگن و ایزوتروپیک و نامحدود فرض شده و از پراکنش حرارتی صرف‌نظر شده بود. لایه‌های نفوذناپذیر بالا و پایین هدایت حرارتی مشابه و ابعاد نامحدود داشتند. همچنین با استفاده از روش آماری، توزیع دمایی برای مرحله تزریق و برای مرحله برداشت ارائه شده است [۶]. شکل (۳) منحنی‌های دمای بی‌بعد بر حسب زمان بی‌بعد را برای اعداد پکله 2 و 20 در مرحله تزریق نشان می‌دهد که

جدول ۱: پارامترهای محاسباتی به کار رفته برای مقایسه نتایج روش‌های عددی گوناگون.

شعاع گرمایی $R_{th} (m)$	عدد $\Lambda$ (بی‌بعد)	دوره تزریق $T_{inj} (106 s)$	آهنگ تزریق $Q (10^{-5} m^3/s)$	عدد پکله $Pe$ (بی‌بعد)
3.16	100	5	7.663	1
4.47	100	5	15.33	2
9.98	100	5	76.63	10
12.25	100	5	114.9	15
14.14	100	5	153.3	20

جدول ۲: راندمان حرارتی در دبی‌های مختلف برای حالت‌های مختلف سیکل.

$\eta_3$ (%)	$\eta_2$ (%)	$\eta_1$ (%)	$\eta$ (%)	$\Lambda$	$R_{th}$ (m)	$t_2$ (day)	$t_{inj}=t_{stor}$ (day)	$Q$ ( $10^{-5} m^3/s$ )	$Pe$
30.63	20.47	28.62	22.95	160	2.588	60	60	7.946	1
31.15	22.71	29.25	25.01	160	3.66	60	60	15.89	2
31.12	32.40	30.27	28.78	160	8.185	60	60	79.47	10
31.03	34.30	30.43	29.3	160	10.024	60	60	119.2	15
30.97	35.30	30.52	29.58	160	11.575	60	60	158.94	20

کتر می‌شود. همچنین حذف دیسپرش حرارتی در دبی‌های بالاتر، راندمان را افزایش می‌دهد زیرا با توجه به رابطه دبی با پراکنش حرارتی (رابطه ۶)، با افزایش دبی، آبهای زیرزمینی با دماهای مختلف بیشتر با هم مخلوط می‌شوند، حرکت آنها سریع‌تر یا کندتر از  $V_D$  صورت می‌پذیرد، پراکنش بیشتر و راندمان کمتر می‌شود. در حالت تزریق متناوب به جای ۲ ماه تزریق و ۲ ماه ذخیره، به مدت ۴ ماه در هر شبانه روز ۱۲ ساعت تزریق و ۱۲ ساعت ذخیره و بلافاصله برداشت به صورت پیوسته صورت می‌گیرد که در این حالت نیز راندمان نسبت به سیکل کامل افزایش می‌یابد زیرا بعد از هر ۱۲ ساعت ذخیره دوباره تزریق انجام می‌شود و انتقال گرما به لایه‌های نفوذناپذیر و گسترش شعاعی دما در فواصل دور اکیفر کمتر می‌شود.

تاثیر ارتفاع لایه‌های نفوذناپذیر، دمای سیال تزریق شده و ضریب تخلخل اکیفر بررسی شده و نتایج در شکل‌های (۵) تا (۷) برای  $pe = 10$  پس از ۶۰ روز برداشت آورده شده است.

در این شکل‌ها مجموع ارتفاع اکیفر و لایه‌های نفوذناپذیر برای هر سه حالت ۴۰ متر در نظر گرفته شده است، به طوری که در حالت اول ارتفاع اکیفر ۴۰ متر و بدون لایه‌های نفوذناپذیر است.

عملاً محدود در نظر گرفته شده‌اند. همچنین ممکن است شرایط اولیه و مرزی با هم تفاوت داشته باشند که منجر به اختلاف در حل می‌گردد (برای سه حل گفته شده در بالا شرایط مرزی و اولیه بیان نشده بود). پارامترهای محاسباتی به کار رفته برای مقایسه نتایج روش‌های عددی در جدول (۱) آمده است.

## نتایج

معمولاً یک سیکل کامل را به صورت سیکلی که شامل سه مرحله تزریق، برداشت و ذخیره با پراکنش حرارتی در جهات عمودی و شعاعی و گرادیان عمودی دماست، در نظر می‌گیرند. در اینجا برای حل عددی معادله حرارت، گام زمانی ۱۰۰۰ ثانیه و گام‌های مکانی ۰.۵ متر در نظر گرفته شده است. با حل معادله برای اعداد پکله و زمان‌های برداشت و تزریق متفاوت، راندمان حرارتی برای حالت‌های سیکل کامل ( $\eta$ )، سیکل بدون مرحله ذخیره (تزریق و بلافاصله برداشت  $\eta_1$ )، سیکل بدون تاثیر پراکنش حرارتی ( $\eta_2$ )، تزریق به صورت متناوب (مانند بهره‌گیری از انرژی خورشیدی در ساعاتی از هر شبانه روز  $\eta_3$ ) محاسبه و در جدول (۲) درج شده‌اند. چنانکه دیده می‌شود وقتی مرحله ذخیره حذف می‌شود، راندمان نسبت به سیکل کامل بیشتر می‌شود زیرا فرصت انتقال گرما به لایه‌های نفوذناپذیر و در نتیجه اتلاف گرما

ماده جامد کمتر و در نتیجه انباشت انرژی گرمایی در آن که بخشی از آن قابل بازیافت نیست کمتر می شود (شکل ۷). همچنین به عنوان نمونه تاثیر دیسپرش حرارتی روی دمای آب خارج شده از چاه در شکل (۸) برای چهار عدد پکله متفاوت آورده شده است. مشخصات فیزیکی اکیفر که برای حل معادله حرارت به کار گرفته شده اند به شرح جدول (۳) است.

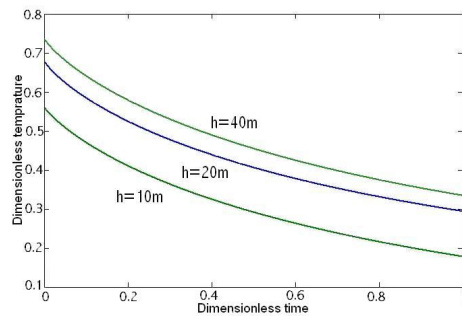
### توزیع دمایی در فواصل مختلف از چاه تزریق

توزیع دمایی در شعاع های متفاوت اکیفر برای سه مرحله تزریق، ذخیره و برداشت برای  $Pe=10$  طی مدت 60 روز از شروع هر یک از مراحل بر حسب زمان در شکل های (۹) تا (۱۱) نشان داده شده است. چنانکه دیده می شود با افزایش فاصله شعاعی از محل تزریق، دمای سیال در مرحله تزریق کاهش می یابد که دلیل آن ذخیره انرژی گرمایی سیال در ماده متخلخل ضمن عبور آن در درون آبخوان است (شکل ۹). با گذر زمان در مرحله ذخیره، دمای آبخوان در فاصله های کم از محل تزریق به دلیل پراکنش و رسانش گرما به مناطق دورتر و لایه های نفوذناپذیر، به تدریج کاهش می یابد.

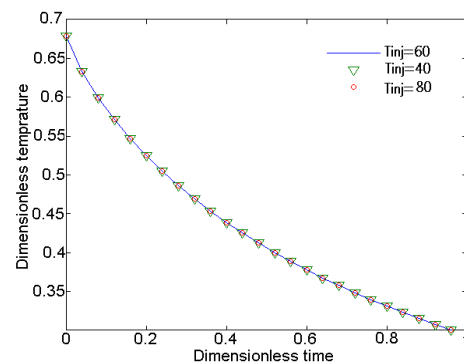
همان طور که در شکل (۹) دیده می شود، دما در نقاط با فاصله شعاعی زیاد با گذر زمان بیشتر می شود که ناشی از دریافت گرما از مناطق نزدیکتر به محل تزریق است.

دما در دوره برداشت نیز با گذر زمان در شعاع های کمتر از 10 متر به تدریج کاهش می یابد ولی در شعاع های بیشتر یا ثابت می ماند و یا اندکی افزایش می یابد. دلیل احتمالی افزایش دما در شعاع های بزرگ، غلبه رسانش گرما از مناطق نزدیکتر به محل تزریق بر انتقال گرما در اثر حرکت سیال است.

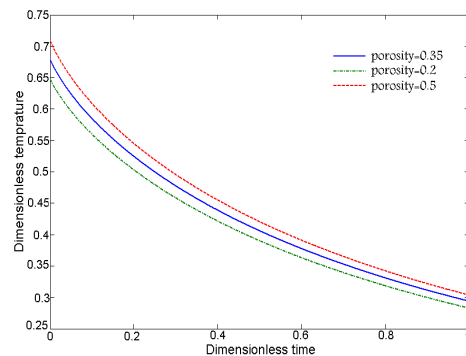
چنانکه در جدول (۲) دیده شد، شعاع گرمایی پس از 60 روز تزریق با عدد پکله 10 حدود 8 متر است و دما در انتهای مراحل تزریق و ذخیره در این شعاع به ترتیب به حدود 28 و ۲۹ درجه رسیده است در حالی که دمای اولیه آبخوان 20 درجه بوده است. به عبارت دیگر رسانش گرما در جهت شعاعی به طور نسبی دارای شدت قابل توجهی است به طوری که در انتهای مرحله ذخیره، دمای نقاط دورتر از شعاع گرمایی نیز تحت تأثیر قرار می گیرد.



شکل ۵: دمای بی بعد بر حسب زمان بی بعد برای ارتفاع متفاوت لایه های نفوذناپذیر.



شکل ۶: دمای بی بعد بر حسب زمان بی بعد برای دمای تزریق متفاوت.

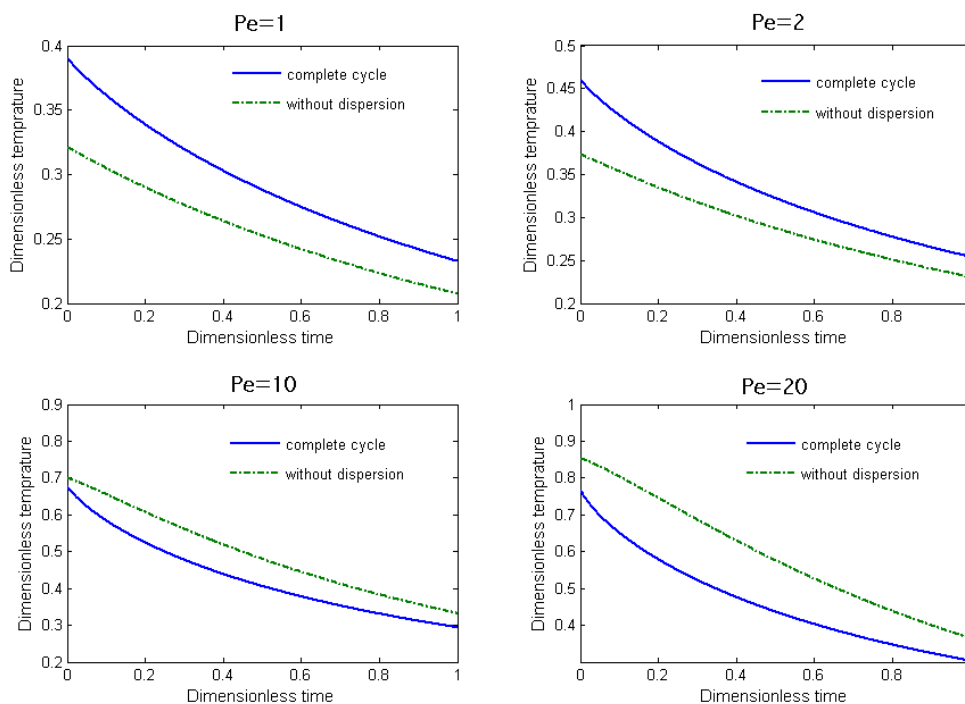


شکل ۷: اثر ضریب تخلخل و زمان بی بعد بر دمای بی بعد.

در حالت دوم ارتفاع اکیفر 20 متر و ضخامت هر یک از لایه های نفوذناپذیر 10 متر و در حالت سوم ارتفاع اکیفر 10 متر و ضخامت هر یک از لایه ها 15 متر است. چنانکه در شکل (۵) دیده می شود تغییر دمای سیال تزریق شده اثری بر عملکرد و راندمان سیستم ندارد. با افزایش ضریب تخلخل، راندمان سیستم بیشتر می شود زیرا هرچه تخلخل سیستم بیشتر می شود، حجم و جرم

جدول ۳: مشخصات فیزیکی اکیفر که برای حل معادله حرارت به کار گرفته شده‌اند.

$(\rho c)_w = 3.89 * 10^6 J / m^3 \text{ } ^\circ C$	ظرفیت حرارتی حجمی آب:
$(\rho c)_s = 1.81 * 10^6 J / m^3 \text{ } ^\circ C$	ظرفیت حرارتی حجمی سنگ‌های شنی:
$(\rho c)_a = 2.54 * 10^6 J / m^3 \text{ } ^\circ C$	ظرفیت حرارتی حجمی اکیفر:
$(\rho c)_e = 1.2 * 10^6 J / m^3 \text{ } ^\circ C$	ظرفیت حرارت حجمی ناحیه نفوذناپذیر:
$\lambda_e = 1.6 w / m \text{ } ^\circ C$	ضریب هدایت حرارتی ناحیه نفوذناپذیر:
$\lambda_s = 2.2 w / m \text{ } ^\circ C$	ضریب هدایت حرارتی سنگ‌های شنی:
$\lambda_w = 0.6 w / m \text{ } ^\circ C$	ضریب هدایت حرارتی آب:
$\alpha_L = 3.33 m$	دیسپرش حرارتی در جهت جریان:
$\alpha_T = 0.33 m$	دیسپرش حرارتی در جهت عمود بر جریان:
$\lambda_a = 1.64 w / m \text{ } ^\circ C$	ضریب هدایت حرارتی اکیفر:
$T_{inj} = 60 \text{ } ^\circ C$	دمای آب تزریق شده:
$T_{ini} = 20 \text{ } ^\circ C$	دمای اولیه اکیفر:
$r = 40 m$	شعاع اکیفر:
$h = 20 m$	ارتفاع اکیفر:
$d = 10 m$	ارتفاع لایه‌های نفوذناپذیر:
$R = 0.5 m$	شعاع چاه



شکل ۸: دمای بی‌بعد بر حسب زمان بی‌بعد برای دمای متفاوت تزریق.

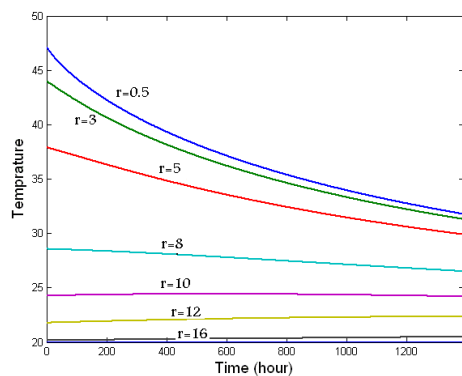
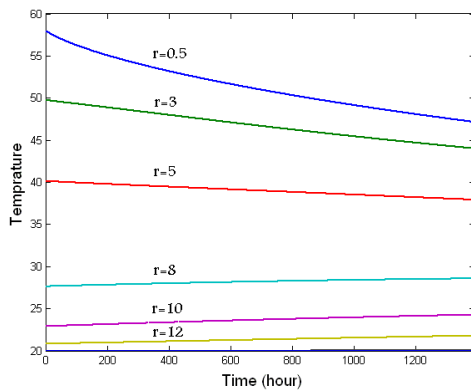


## نتیجه گیری

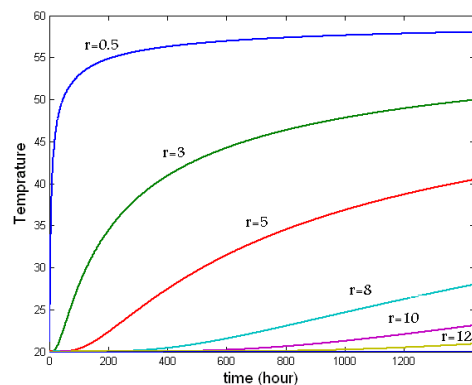
نتایج این پژوهش را می توان چنین جمع بندی

کرد:

- هنگامی که دبی برداشت و تزریق برابر باشند، با افزایش دبی، بازده حرارتی سیستم بیشتر می شود.
- چنانچه برداشت بلافاصله پس از تزریق صورت گیرد و مرحله نگهداری حذف شود راندمان حرارتی بالا می رود.
- پراکنش حرارتی، راندمان را در دبی های بالاتر کاهش می دهد.
- دمای سیال تزریق شده تاثیری بر راندمان حرارتی سیستم ندارد .
- هر چه ارتفاع لایه های نفوذناپذیر بالا و پایین، بیشتر باشد راندمان کمتر خواهد شد.
- برای مقدار گرما و مدت نگهداری معین، تزریق انرژی به صورت متناوب و نگهداری در بقیه اوقات راندمان را نسبت به تزریق به صورت پیوسته در ابتدا و سپس نگهداری، افزایش می دهد.



شکل ۱۱: تغییر دما در شعاع های مختلف در دوره برداشت.



شکل ۹: تغییر دما در شعاع های مختلف در دوره تزریق.

## مراجع

- 1 - Paksoy, H. O. (1998). "Underground thermal energy storage-a choice for sustainable future." 17<sup>th</sup> Congress of the World Energy Council, Houston Texas, September 13-18, PP. 103-112.
- 2 - Energy conservation through energy storage (ECES agency). (2003). *Under round thermal energy storage*, February 18.

- 3 - Gaoa, Q., Lia, M., Yua, M., Spitler, J. D. and Yan, Y.Y. (2009). "Review of development from GSHP to UTES in China and other countries." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, No. 6-7, PP. 1383-1394.
- 4 - Saljnikov, A., Goricanec, D., Kozic, D., Krope, J. and Stipic, R. (2006). "Borehole and Aquifer Thermal Energy Storage and Choice of Thermal Response Test Method." *Proceedings of the 4th WSEAS Int. Conf. on HEAT TRANSFER, THERMAL ENGINEERING and ENVIRONMENT*, (pp11-15), Elounda, Greece, August 21-23.
- 5 - Ming, L., Qin, G., Qing, G. and Yan, J. (2009). "Thermal Analysis of Underground Thermal Energy Storage under Different Load Modes." *Proceedings of the 2009 International Conference on Energy and Environment Technology - ICEET '09- Volume 01*.
- 6 - Chevalier, S. and Banton, O. (1999). "Modeling of heat transfer with the random walk method. Part 1. Application to thermal energy storage in porous aquifers." *Journal of Hydrology*, Vol. 222, PP. 129-139.
- 7 - Miller, R. T. and Delin, G. N. *Cyclic Injection, Storage, and Withdrawal of Heated Water in a Sandstone Aquifer at St. Paul, Minnesota, USGS*, PP. 1530.
- ۸ - بهاری مقدم، م و جامی‌الاحمدی، م و نادری فرد، ع، "بررسی و مطالعه پدیده پراکنش در محیط متخلخل"، ششمین کنگره ملی مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اردیبهشت ۱۳۸۰
- 9 - Younes, A. (2003). "On modelling the multidimensional coupled fluid flow and heat or mass transport in porous media." *Journal of heat and mass transfer*, Vol. 46, PP. 367-379, January.
- ۱۰ - شمسایی، ا، هیدرولیک جریان آب در محیط متخلخل، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، جلد اول و سوم، ۱۳۷۷.

### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- Underground Thermal Energy Storage
- 2- Aquifer Thermal Energy Storage
- 3- Bore hole Thermal Energy Storage
- 4- Cavern Thermal Energy Storage