

Research Paper

**Numerical modeling of geothermal reservoir in unsaturated environment
(Case study: Geothermal field northwest of Sabalan)**

Mirmahdi Seyedrahimi-Niaraq

Faculty of engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ARTICLE INFO*Article History:*

Received 10 May 2022

Revised 10 June 2022

Accepted 10 July 2022

Keywords:

Numerical modeling

Unsaturated environment

The natural state of the reservoir

Geothermal system

Northwest of Sabalan

ABSTRACT

In this research, firstly, a conceptual model designed of ten deep exploration wells has been developed, and based on this, a three-dimensional numerical model of the North-West Sabalan geothermal system has been presented. For this purpose, the EOS3 module (water-air equation) of the Tough2 simulator code was used to simulate the model. The numerical model of the reservoir is expressed by a rectangular prism with a length of 11.5 km, a width of 8 km (92 km²) and a depth of 5.11 km, and it was expanded with 21 horizontal layers with a thickness range of 100 to 1000 meters from the maximum altitude of 4110 to -1000 masl. The number of 22 rock-types, whose distribution is based on the distribution of rock units and geological structures in 10 deep exploratory wells, was assigned to the model. The permeability of the rock types varies from 1*10E-17 to 9*10E-13 square meters. Modeling was done for the natural state of the reservoir and the validation results showed a good match between the data measured in the well and modeled for temperature and pressure. In the best fit, the simulation provided a zone of high temperature upward flow in the southeastern part of the range (sites D and E). This flow is transferred through permeable, faulted and fractured zones and is finally discharged through surface features (hot water springs) in the northwestern part of the area.

Introduction

The EOS3 module is adapted from the equation of state of the TOUGH simulator, which performs the task of modeling the thermophysical properties of the reservoir. The purpose of this study is to present an unsaturated numerical model of the geothermal field in northwest Sabalan. Among the 18 geothermal fields, this field is part of the four main zones targeted for high-temperature geothermal exploration. In this article, based on the updated conceptual model of the field, an unsaturated numerical model for the northwest Sabalan geothermal reservoir is presented by combining new exploration data and considering the unsaturated zone. The superiority of this model over the previous models is to provide a comprehensive and more realistic numerical model for a geothermal system and reservoir performance prediction for an electricity production scenario. To run the model, two phases of weather should be

calculated instead of a single phase. For this purpose, the EOS3 module (weather-weather equation) of the Tough2 simulator has been used to implement the model.

Model description

The geothermal system in the northwest of Sabalan was assumed for modeling with a rectangular prism with a length of 11.5 km, a width of 8 km (92 km²) and a depth of 5.11 km. For better modeling of the unsaturated part, layers with appropriate thickness have been used in this part of the region. The main structure of "rock types" was provided based on the distribution of rock units and geological structures discovered in 10 deep exploratory wells. 22 rock units were used to assign rock characteristics. To implement the initial conditions, a period of 1.5 million years was considered and the hydrostatic pressure profile was prepared with saturated water at 15 °C. To reproduce the natural drainage areas of the field, fluid production was used based on the deliverability model in the network blocks under the springs. The validation

* Corresponding Author, Email: M.seyedrahimi@uma.ac.ir

process usually includes comparing the calculated results against the temperature and pressure measured in 10 exploratory wells.

Results and discussions

Figure (1a) shows the temperature distribution and mass flow on the vertical section AB. This section is a combination of saturated and unsaturated environment, which extends from -1000 to 5110 meters above sea level. As can be concluded from the Figure, the upward flow rises from the deep zone under the wells of site D and site E and moves in the south-north direction. The blocks located on the high temperature feeding zone (reservoir area) at higher levels and in the unsaturated zone have a higher temperature than the areas outside the

upward fluid zone. This problem can be related to the broken and permeable fault points under this area, through which heat is transferred by convection. Also, in Figure (1b) the mass flow pattern is shown along with the heat distribution in the vertical section of CD in the direction of the NNW2 fault. Considering that this cross-section includes the mentioned fault, it shows the role of this fault in the flow transmission. The hot upward flow rises from under the site D and E wells and through this fault and permeable and broken zones, it is transferred to the northern part and most of the flow leaves the surface from this part. A part of the fluid flow in the southern part moves to the south at lower altitudes and creates a downward flow and returns to the reservoir in a circular manner.

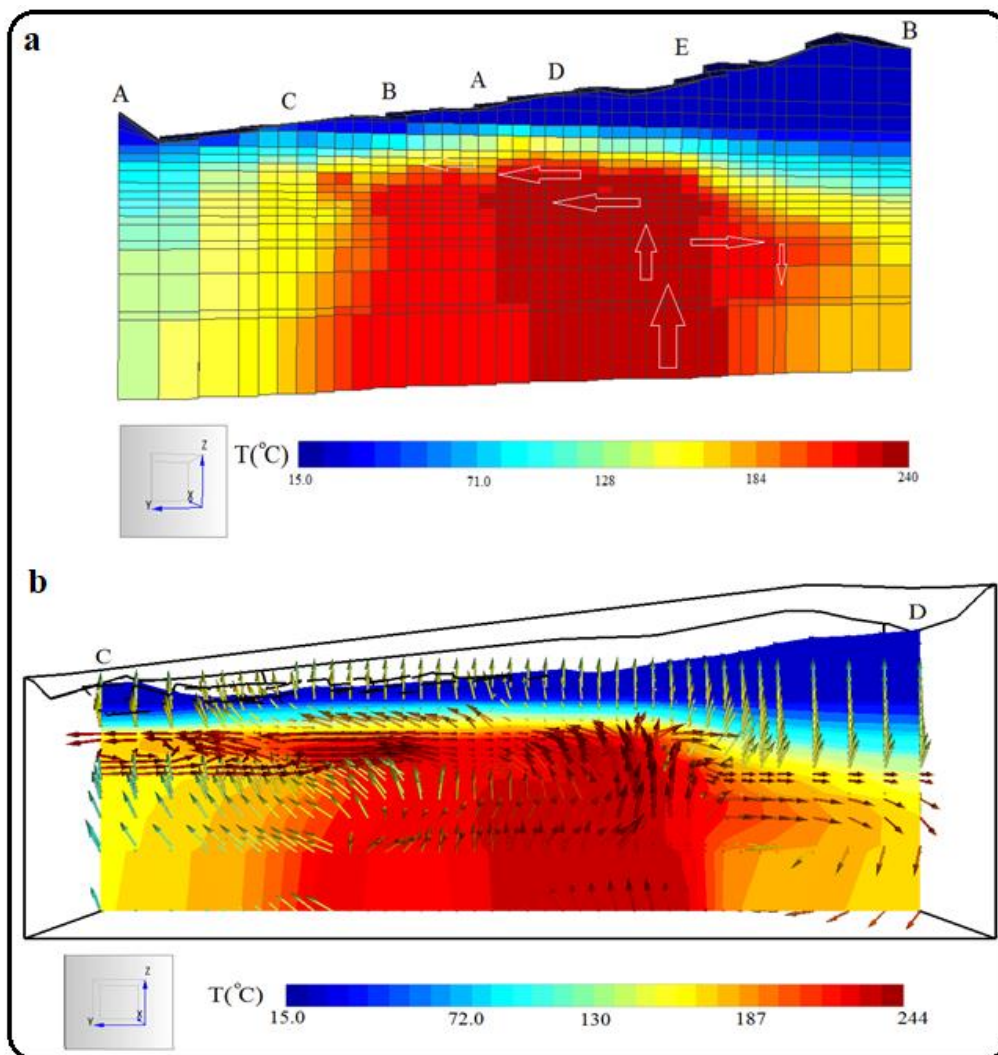


Figure 1. full CFD domain of the tidal Stream turbine.

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی عددی مخزن زمین‌گرمایی در محیط غیراشباع (مطالعه موردی: میدان زمین‌گرمایی شمال غرب سبلان)

میرمهدی سیدرحیمی نیارق

دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌های مقاله: تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۲/۲۰ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۳/۲۰ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۴/۲۰	در این پژوهش، ابتدا یک مدل مفهومی طراحی شده از ۱۰ چاه عمیق اکتشافی توسعه داده شده و بر این اساس، مدل عددی سه‌بعدی از سیستم زمین‌گرمایی شمال غرب سبلان ارائه شده است. به همین منظور، برای شبیه‌سازی مدل از مدول EOS3 (معادله حالت آب- هوا) کد شبیه‌ساز Tough2 استفاده شده است. مدل عددی مخزن با یک منشور مستطیلی با $11/5$ km طول و 8 km عرض (92 km ²) و $5/11$ km عمق بیان شده و با 21 لایه افقی با محدوده ضخامت 100 تا 1000 متر از ماکزیمم ارتفاع 4110 تا 1000 متر از سطح دریا گسترش داده شده است. تعداد ۲۲ تیپ‌سنگ که توزیع آن‌ها بر اساس توزیع واحدهای سنگی و ساختارهای زمین‌شناسی در ۱۰ چاه اکتشافی عمیق بنا نهاده شده است، به مدل اختصاص داده شد. نفوذپذیری این ساختارهای زمین از 1×10^{-17} تا 9×10^{-13} مترمربع متغیر است. مدل‌سازی برای حالت طبیعی مخزن انجام شد و نتایج اعتبارسنجی، تطبیق خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری شده درون‌چاهی و مدل‌سازی انجام شده برای دما و فشار را نشان می‌دهد. در بهترین حالت تطبیق، شبیه‌سازی یک زون جریان دما بالای رو به بالا در بخش جنوب شرقی محدوده (زیر سایت‌های D و E)، فراهم کرد. این جریان از طریق زون‌های نفوذپذیر، گسلی و شکسته انتقال می‌یابد و در نهایت، از طریق سیماهای سطحی (چشمه‌های آب‌گرم) در بخش شمال غربی ناحیه تخلیه می‌شود. نتایج مطالعه مدل مفهومی مناسبی از مخزن زمین‌گرمایی سبلان را ارائه می‌دهد که می‌تواند در توسعه‌های آتی مخزن استفاده شود.
کلیدواژه: مدل‌سازی عددی محیط غیراشباع حالت طبیعی مخزن سیستم زمین‌گرمایی شمال غرب سبلان	

۱. مقدمه

حالت شبیه‌ساز TOUGH اقتباس شده که کار مدل‌سازی خواص ترموفیزیکی مخزن را اجرا می‌کند [۳]. در این مدول هر دو مولفه هوا و آب در مدل عددی برای اهداف مختلف در سیستم‌های زمین‌گرمایی در نظر گرفته شده است. این مدول برای مدل‌سازی عددی سیستم‌های زمین‌گرمایی پیشرفته^۱ [۴]، سیستم‌های زمین‌گرمایی با دمای پایین [۵]، سیستم یکپارچه چاه - مخزن [۶]،

آب یا سیال یکی از اجزای اصلی سیستم‌های زمین‌گرمایی آتشفشانی است که توسط بارش جوی ایجاد می‌شود [۱] و [۲]. به منظور گنجاندن بارش در سیستم یک مدل عددی، لازم است ناحیه غیراشباع در مدل نیز در نظر گرفته شود که در لایه‌های بالایی رخ می‌دهد. مدول EOS3 از معادله

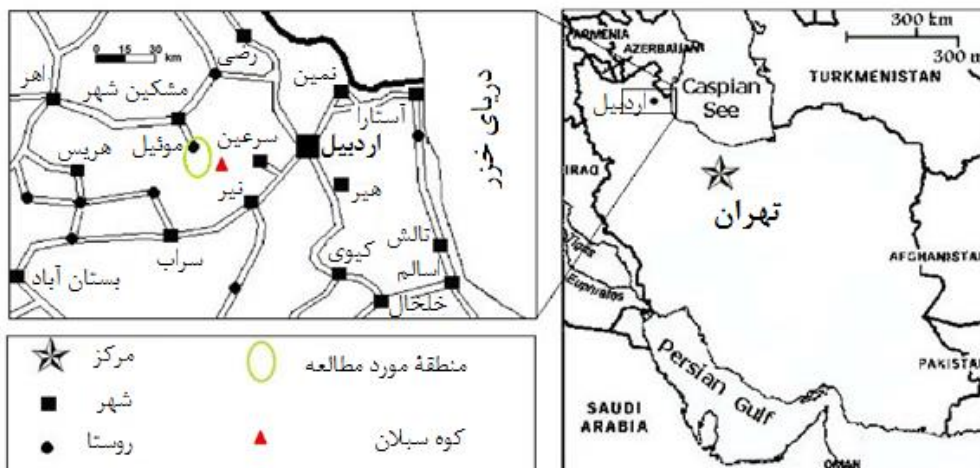
* نویسنده مسئول

Email: M.seydrahimi@uma.ac.ir

1. EGS

در بین ۱۸ میدان زمین‌گرمایی، جزء چهار زون اصلی مورد هدف اکتشاف زمین‌گرمایی دما بالا است. میدان زمین‌گرمایی شمال غرب سبلان در استان اردبیل و ۸۵۹ کیلومتری تهران واقع شده است (شکل ۱) [۱۱-۱۵].

فرایندهای زمین‌گرمایی عمیق [۷]، ذخیره انرژی حرارتی [۸]، مدل‌سازی معکوس مخازن زمین‌گرمایی [۹] و تجزیه و تحلیل توئمان حرارتی- هیدرولیک [۱۰] اجرا شده است. هدف از این مطالعه، ارائه یک مدل عددی غیراشباع از میدان زمین‌گرمایی شمال غرب سبلان است. این میدان



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده

[۲۵]. نوراللهی و ایتوی در سال ۲۰۱۱ یک مدل عددی اشباع با حذف قطعات غیراشباع از میدان زمین‌گرمایی شمال غرب سبلان ارائه کردند [۲۱]. نتایج با داده‌های اندازه‌گیری شده از سه حلقه چاه اکتشافی حفاری شده بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸ تأیید شده است. همچنین در سال ۲۰۱۹، سیدرحیمی نیارق و همکاران مدل اشباع شده از این میدان را با ترکیب داده‌های جدید به داده‌های قبلی، که از هفت چاه عمیق به دست آمده بود، توسعه دادند [۲۶].

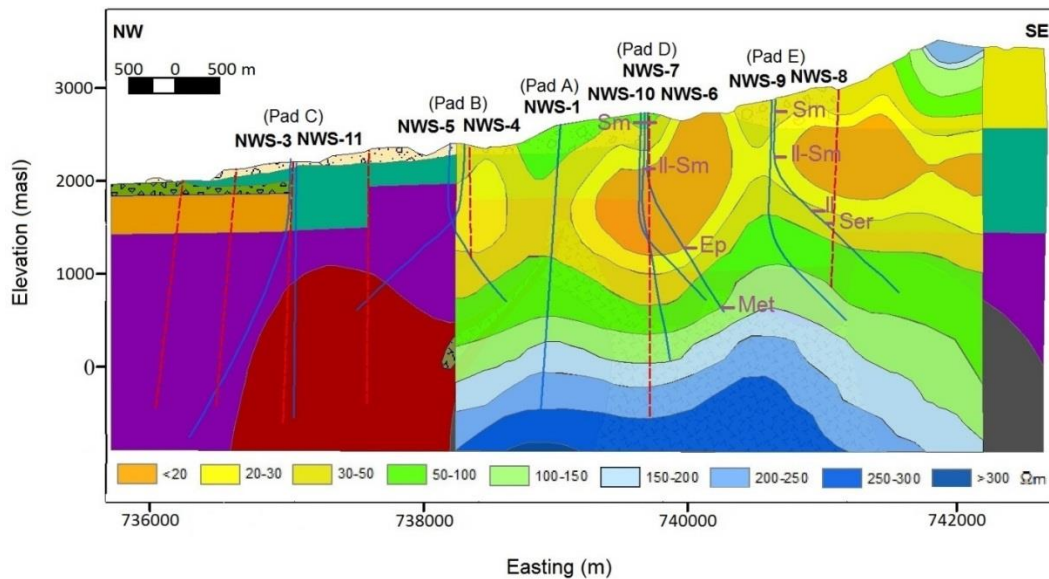
در پژوهش‌های اخیر تأثیر پدیده‌های طبیعی مانند بارش و توپوگرافی سطح در مدل مورد توجه قرار نگرفته است. برای این منظور، لازم است لایه‌های غیراشباع در مدل، تغذیه شده از آب اتمسفر، در نظر گرفته شود. در این مقاله، بر اساس مدل مفهومی به‌روزشده میدان، یک مدل عددی غیراشباع برای مخزن زمین‌گرمایی شمال غرب سبلان با ترکیب داده‌های اکتشافی جدید و در نظر گرفتن ناحیه غیراشباع ارائه شده است. برتری این مدل نسبت به مدل‌های قبلی ارائه یک مدل عددی جامع و واقعی‌تر برای یک سیستم زمین‌گرمایی و پیش‌بینی عملکرد مخزن برای یک سناریوی تولید برق است. برای اجرای مدل باید دو فاز آب و هوا را به جای تک‌فاز وارد محاسبه کرد. برای این

سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر ایران ۱۰ حلقه چاه عمیق اکتشافی عمیق در منطقه مطالعه شده حفر کرده است. سه حلقه چاه NWS-1، NWS-3 و NWS-4 از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۴ بر اساس یک مطالعه مغناطیس‌سنجی حفاری شدند و هفت حلقه چاه باقی‌مانده (NWS-5 تا NWS-11) نیز طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱ بر اساس بررسی‌های اخیر ژئوفیزیکی [۱۶-۱۹] در سایت‌های A، B، C، D و E حفر شدند (شکل ۲). چاه‌های NWS-3 و NWS-5 به ترتیب دارای حداقل و حداکثر عمق ۳۱۹۷ و ۱۹۰۱ متر هستند. همچنین، بیشترین دما در چاه NWS-1 با مقدار ۲۴۲ درجه سانتی‌گراد در عمق ۸۳۲ متری به ثبت رسید. برنامه تولید برق از میدان زمین‌گرمایی شمال غرب سبلان از سال ۱۹۹۴ تهیه شده است [۲۰ و ۲۱]. در حال حاضر، اولین نیروگاه زمین‌گرمایی ۵ مگاواتی در حال ساخت است. بر اساس طبقه‌بندی سیستم زمین‌گرمایی [۲۴-۲۲] و مطالعات ویژگی‌های سیال مخزن ژئوشیمیایی توسط استرل‌بیتکا^۱ و رادمهر^۲ در سال ۲۰۱۰، این میدان جزء سیستم‌های زمین‌گرمایی آتشفشانی مایع‌غالب با آنتالپی بالا (دمای ۲۲۰-۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) طبقه‌بندی شده است

1. Strelbitkaya
2. Radmehr

منظور، از مدل EOS3 (معادله حالت آب- هوا) شبیه‌ساز

Tough2 برای پیاده‌سازی مدل استفاده شده است.



شکل ۲. مقطع عمودی مقاومت ویژه اصلاح شده از [۲۱] همراه با چاه‌ها و شاخس‌های دگرسانی، Sm: اسمکتیت، Il: ایلیت، Ser: سریسیت، Ep: اپیدوت، Me: متامورفیک

۲. زمین‌شناسی و مدل مفهومی میدان زمین‌گرمایی شمال غرب سبلان

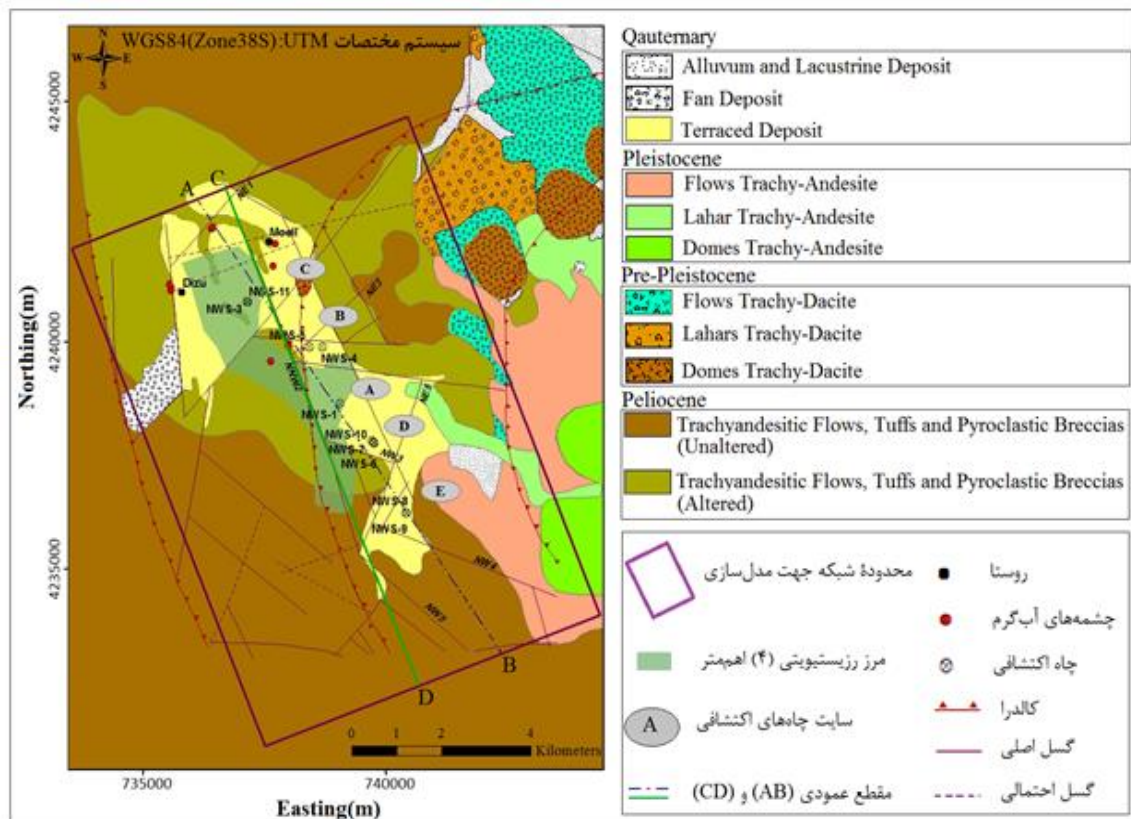
نقشه زمین‌شناسی ناحیه غرب و شمال غرب سبلان همراه با ساختارهای زمین‌شناسی و سیمای سطحی در شکل ۳ نشان داده شده است. مدل مفهومی میدان زمین‌گرمایی شمال غرب سبلان روی مقطع عمودی خط AB به طول تقریبی ۱۱/۵ کیلومتر که تمامی ۱۰ چاه اکتشافی عمیق در آن گنجانده شده، توسعه داده شده است. شاخس‌هایی که برای توسعه این مدل در نظر گرفته شده شامل نتایج بررسی‌های سطحی و زیرسطحی زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، هیدروژئوشیمی، هیدرولوژی و توزیع دما و فشار است. اطلاعات زیرسطحی از ۱۰ چاه اکتشافی و همچنین، نتایج مطالعات قبلی در این میدان به دست آمده است. همه اطلاعات در دسترس با استراتژی گرافی و نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه ترکیب شده و یک مقطع عمودی زمین‌شناسی دوبعدی تولید شد (شکل ۴-الف). تشکیلات دیزو در بالاترین توالی استراتژی گرافی میدان زمین‌گرمایی سبلان تشخیص داده شده است [۲۷ و ۲۸] و معادل واحدهای Q_{11} و Q_{12} است [۲۹]. سنگ بستر مونزونیتی در عمق ۱۰۲۱ متری چاه NWS-1 در قسمت جنوب شرقی ظاهر شده است. این واحد سنگی در عمق

۲۱۴۰ متری چاه NWS-6 نیز تأیید شده است. همچنین، به صورت دایک‌های مونزونیتی در زون عمیق ۱۹۷۸ تا ۲۷۰۰ متری چاه NWS-9 ظاهر شده است. رخنمون مونزونیتی به صورت یک باند با پهنای ۵ تا ۱۰ کیلومتر به ازای هر ۱۰۰ کیلومتر با یک روند عمومی شمال غربی گسترش می‌یابد. همچنین، چاه‌های NWS-4 و NWS-5 در عمق تقریبی ۱۸۴۰ متری به دیوریت رسیده است. این تیپ‌سنگ، به صورت نفوذی‌های دیوریت قدیم و جدید در چاه NWS-1 ظاهر شده است.

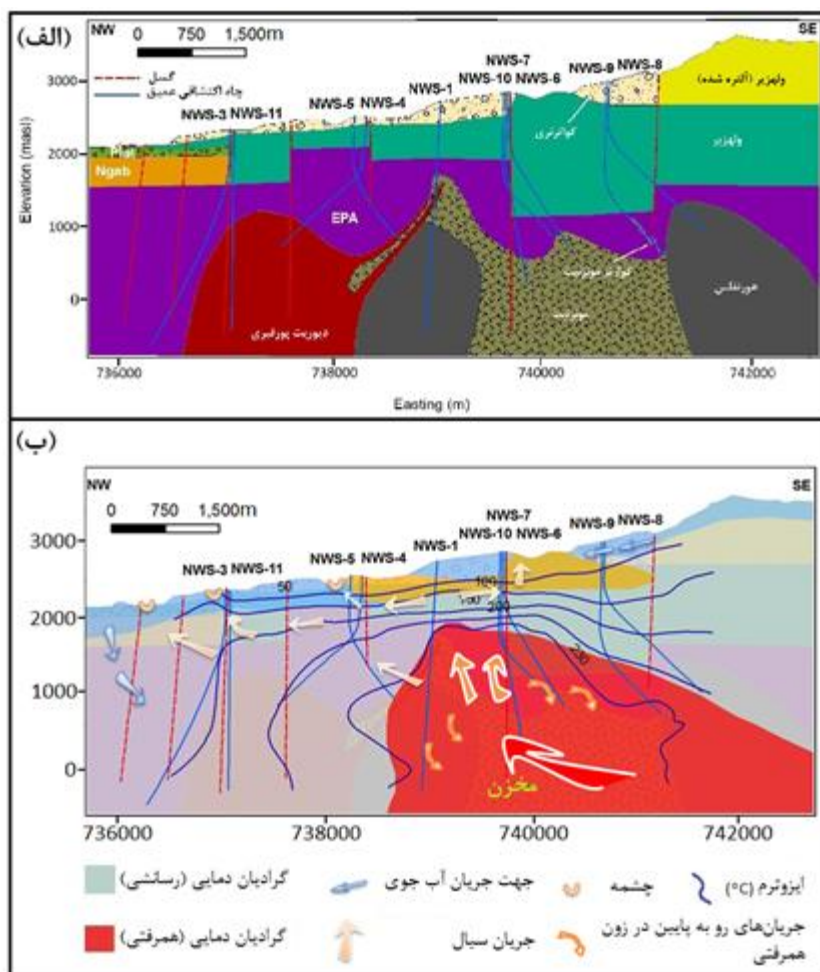
قبل از انجام مدل‌سازی عددی، یک مدل مفهومی از میدان مورد مطالعه ضروری است که توسعه داده شود. مدل مفهومی یادشده تصور ذهنی ما را از یک سیستم بیان می‌کند که به وسیله مدل ریاضی و عددی تشریح خواهد شد. مدل مفهومی در واقع ارائه تصویر مجازی از سیستم زمین‌شناسی، نقشه‌ها یا طراحی‌ها، مقاطع عمودی و اطلاعات موجود مانند ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی است که تشریح صحیحی از ویژگی‌های مهمی همچون جریان آب زیرزمینی، انتقال حرارت و جرم را ارائه می‌دهد. اگر مدل مفهومی دارای رابطه قابل اعتمادی از یک سیستم واقعی نباشد، مدل عددی نادرست و یا دارای پیش‌بینی‌های بی‌معنا خواهد بود. برای ارائه مدل مفهومی با توجه به هدف پروژه، گردآوری اطلاعات زمین‌شناسی

هیدرولیکی زیر سایت‌های D و E با رزیستویته کمتر از $20 \Omega m$ در زون‌های بالایی حدود ۱۲۰۰ تا ۲۸۰۰ masl تشخیص داده شد. نتایج پروفیل‌های دمایی نزدیک مخزن نشان داد مرز فوقانی مخزن در تراز حدود ۱۸۰۰ masl، جایی که تغییرات دمایی اندکی در انتقال همرفتی دما در مخزن اتفاق می‌افتد، قرار دارد. مخزن با یک سنگ پوششی به ضخامت تقریبی ۵۰۰ متر پوشیده شده است. شیمی سیال شامل کلرید بالا، pH خنثی و سیالات نابالغ است که به طور بخشی با سنگ میزبان به تعادل رسیده‌اند و در زمره آب‌های مخلوطی طبقه‌بندی می‌شوند. قابل توجه است که یک همبستگی خوب بین حضور چشمه‌های آب گرم و گسل‌ها در ناحیه مورد مطالعه وجود دارد. به نظر می‌رسد جریان رو به بالا از طریق گسل‌های NNW2، NE1 و NE5 اتفاق افتاده و سرانجام از طریق چشمه‌های آب گرم در سطح تخلیه می‌شود.

(هندسه لایه‌های زمین‌شناسی و ویژگی‌های ماتریکس)، هیدروژئولوژی (رژیم جریان، پارامترهای هیدرولیکی، عبارت‌های تولید و مصرف، ویژگی‌های سیال، شیمی آب، ژئوترمیک (مصارف و منابع گرما، ارائه فازهای آب) و مقادیر مرزی مربوطه، که همه ممکن هستند تابع زمان باشند، مورد نیاز است [۳۲]. مدل مفهومی میدان زمین‌گرمایی شمال غرب سبلان در شکل (۴-ب) آورده شده است. این میدان شامل یک مخزن زمین‌گرمایی عمیق با محدوده دمایی ۲۳۰ تا ۲۴۲ درجه سانتی‌گراد است. گسل‌های NW3 و NE5 ممکن است قابلیت هدایت مخزن را کنترل کنند. همچنین، آن‌ها نقش مهمی در به وجود آوردن زون جریان رو به بالا زیر چاه‌های NWS-6، 107 (سایت D) دارند. نتایج بررسی ژئوفیزیکی (شکل ۲) نشان داد مخزن زمین‌گرمایی با زون‌های هدایت هیدرولیکی زیر زون‌های E و D، در تراز ۱۰۰۰ متری زیر سطح دریا واقع شده است. به علاوه، زون‌های هدایت



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی غرب و شمال غرب کوه سبلان (بر اساس [۳۰]، جزئیات نقشه گسل‌ها بر اساس [۳۱]). چاه‌های زمین‌گرمایی و گسل‌ها به ترتیب با خط ضخیم و ضخیم ایتالیک نشان داده شده‌اند. حروف A, B, C, D و E روی نقشه زمین‌شناسی نشان‌دهنده سایت‌های اکتشافی هستند.



شکل ۴. الف) مقطع عمودی زمین شناسی در راستای شمال غربی- جنوب شرقی سایت شمال غرب سبلان همراه با تصویر چاه های اکتشافی، (ب) مدل مفهومی میدان زمین گرمایی شمال غرب سبلان

شده است. فرم عمومی معادلات حاکم به صورت رابطه ۱ است [۳۳]:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^{\kappa} dV_n = \int_{\Gamma_n} \mathbf{F}^{\kappa} \cdot \mathbf{n} d\Gamma_n + \int_{V_n} q^{\kappa} dV_n \quad (1)$$

مجموع یاد شده به کل المان های V_n سیستم جریان تحت مطالعه، که به وسیله سطح بسته Γ_n محدود شده است، مربوط می شود. کمیت M به صورت عبارت تجمعی نشان دهنده جرم (انتقال جرم) یا انرژی (انتقال حرارت) است، و با $\kappa=1, \dots, NK$ مؤلفه های جرم (آب، هوا، H_2 ، مواد حل شونده و...) و $\kappa=NK+1$ مؤلفه حرارت ظاهر می شود. F فلاکس جرمی یا فلاکس حرارتی و q عبارت مصرف و تولید را مشخص می کنند. n هم یک بردار نرمال در سطح

۳. مدل سازی عددی مخزن زمین گرمایی شمال غرب سبلان

۳.۱. شبیه ساز عددی Tough2

Tough2 یک کد شبیه ساز عددی چندبعدی از خانواده MULCOM است که توسط آزمایشگاه ملی برکلی لارنس آمریکا برای شبیه سازی جریان سیال و انتقال حرارت سیالات چندفازی و چندجزئی در محیط متخلخل و شکسته توسعه داده شده است [۳۳-۳۵].

روابط حاکم شبیه ساز Tough2 معادلات تعادل جرم و انرژی هستند که انتقال جرم و انرژی در آن مدل سازی شده است. هدف مدل سازی (محیط متخلخل - شکسته) به عنوان یک دسته المان های مرتبط به هم در نظر گرفته

1. Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)

مدل‌سازی بهتر قسمت غیراشباع نیز از لایه‌های با ضخامت مناسب در این قسمت از ناحیه استفاده شده است، بنابراین مدل یادشده دارای ۲۱ لایه افقی TP1 تا TP4 و AA تا QQ (TP1 لایه بالایی تا QQ لایه تحتانی) با محدوده ضخامت ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متر از ماکزیمم ارتفاع ۴۱۱۰ تا ۱۰۰۰- متر بالاتر از سطح دریا گسترش داده شد. لایه‌های بالای ۲۲۰۰ متر بالاتر از سطح دریا دارای ضخامت متغیری هستند که در صورت برخورد با لایه هوا، به طرف جنوب تابع تراز توپوگرافی سطحی هستند. هر لایه افقی که دارای تعداد شبکه کامل است، ۹۳۶ بلوک شبکه را در اندازه‌های مختلف به خود اختصاص می‌دهد. برای لایه‌های بالایی که با توپوگرافی سطحی برخورد دارند، به همان اندازه از تعداد بلوک‌ها کاسته شده است. بنابراین، تعداد کل بلوک‌ها ۱۹۸۵۳ به دست آمد که محاسبات عددی هم روی این بلوک‌ها انجام پذیرفت. برای پیاده‌سازی شبکه روی منطقه، بلوک‌های با اندازه‌های چگال‌تر و انعطاف‌پذیری بیشتر در نظر گرفته شد. به این ترتیب که قسمت‌هایی که چاه‌های اکتشافی را دربرمی‌گیرند، دارای بیشترین چگالی در مرکز ناحیه با اندازه ۲۵۰*۲۵۰ متر و با گسترش این زون به جهت غرب و شرق و شمال و جنوب این اندازه شبکه ۵۰۰*۲۵۰ مترمربع تبدیل می‌شود. روی بقی نواحی یعنی حاشیه منطقه، اندازه ۵۰۰*۵۰۰ متر مدل شده است (شکل ۵).

ساختار اصلی «تیپ‌سنگ» ها بر اساس توزیع واحدهای سنگی و ساختارهای زمین‌شناسی کشف‌شده در ۱۰ چاه اکتشافی عمیق فراهم شد. ۲۲ واحد سنگی برای اختصاص دادن ویژگی‌های سنگ استفاده شد. هر یک از این تیپ‌سنگی‌ها و ویژگی‌های آن‌ها محل واحدهای سنگی و ویژگی‌های کشف‌شده در چاه‌ها را ارائه می‌دهد. نام هر تیپ‌سنگ بر اساس اختصار نام واحدهای سنگی یا ترکیبشان ساخته شد. جدول ۱ ویژگی‌های تیپ‌سنگ‌ها و واحدهای سنگی مربوطه را نشان می‌دهد. نفوذپذیری تیپ‌سنگ‌ها نیز بعد از عمل واسنجی در این جدول گنجانده شده است. شکل ۶ نیز توزیع سه‌بعدی تیپ‌سنگ‌های شاخص به همراه موقعیت چاه‌های اکتشافی در داخل شبکه مدل را نشان می‌دهد.

$d\Gamma_n$ درون V_n است. شکل عمومی عبارت تجمعی جرم به صورت رابطه ۲ است:

$$M^k = \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^k \quad (2)$$

جرم کل جزء k از جمع کل فازهای سیال β (مایع، گاز و...) به دست می‌آید. ϕ تخلخل، S_{β} درصد اشباع فاز β (یعنی شکاف‌ها و خلل و فرج‌های اشغال‌شده به وسیله فاز β)، ρ_{β} چگالی فاز β و X_{β}^k کسر جرمی جزء k در فاز β است. به طور مشابه عبارت تجمعی حرارت در یک سیستم چندفازی به شکل رابطه ۳ است:

$$M^{NK+1} = (1 - \phi) \rho_R C_R T + \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} u_{\beta} \quad (3)$$

که در آن C_R و ρ_R به ترتیب چگالی و گرمای ویژه سنگ است. T دما و u_{β} انرژی داخلی ویژه در فاز β است. فلاکس تک‌فازی با توجه به قانون داریسی به شکل رابطه ۴ است:

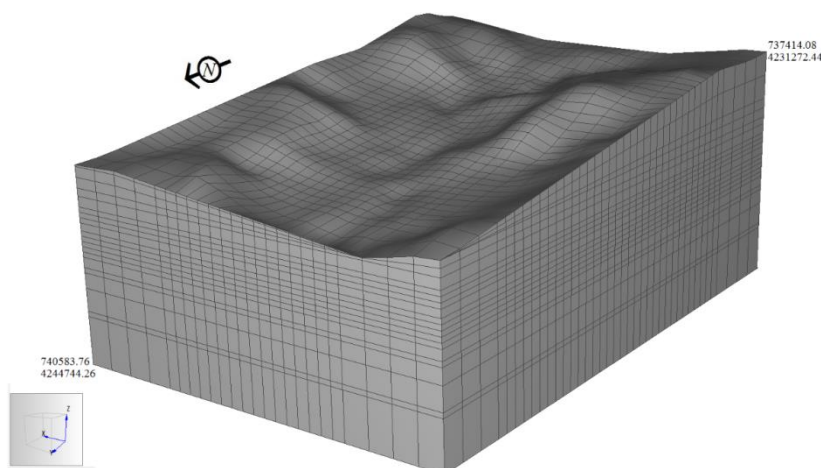
$$\mathbf{F}_{\beta} = \rho_{\beta} \mathbf{u}_{\beta} = -k \frac{k_{r\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} (\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} \mathbf{g}) \quad (4)$$

همه روابط غیرخطی بوده بنابراین با استفاده از روش‌های عددی می‌توانند حل شوند. در مدل‌سازی مخزن زمین‌گرمایی، معمولاً فرض می‌شود که سیال تک جزئی (آب) است. در این مورد، دو معادله و دو مجهول برای هر المان وجود دارد. مجهولات دما و فشار (در شرایط تک‌فازی) یا فشار و درصد اشباع (در شرایط دو فازی) است. برای سیستمی که N المان داشته باشد، $2N$ معادله با $2N$ مجهول وجود دارد. این معادلات به وسیله برنامه تکرارشونده نیوتن رافسون حل شده است [۳۳]. در این پژوهش برای اجرای مدل عددی از کد شبیه‌ساز Tough2 با مدل EOS3 استفاده شده است. مدل EOS3 نوعی از معادله حالت توأم جریان-حرارت است که در آن دو فاز آب و هوا در نظر گرفته شده است.

۲.۳. سیستم شبکه و تیپ‌سنگ‌های مدل

سیستم زمین‌گرمایی شمال‌غرب سبلان با یک منشور مستطیلی با $11/5$ km طول و 8 km عرض (92 km²) و $5/11$ km عمق برای مدل‌سازی فرض شد. برای

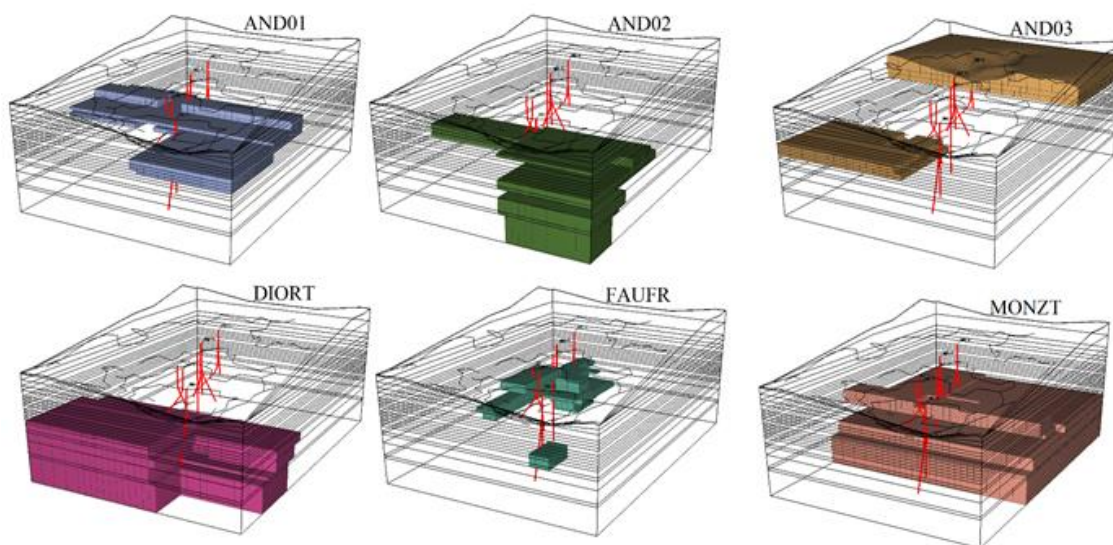
سید رحیمی نیارق: مدل سازی عددی مخزن زمین گرمایی در محیط غیراشباع ...



شکل ۵. شبکه سه بعدی استفاده شده در مدل غیراشباع میدان زمین گرمایی شمال غرب سبلان (طول: ۱۱/۵، عرض: ۸ و عمق ۵/۱۱ کیلومتر)

جدول ۱. ویژگی های تیپ سنگ ها و واحدهای سنگی مربوطه

K_x	K_y	K_z	ضریب گرمایی ویژه (J/kg °C)	ضریب هدایت گرمایی (W/m °C)	تخلخل (%)	چگالی (kg/m ³)	تشریح	تیپ سنگ
$۲,۵ \times ۱۰^{-۱۴}$	$۲,۵ \times ۱۰^{-۱۴}$	$۲,۵ \times ۱۰^{-۱۴}$	۱۰۰۵	۰,۰۲۵	۹۹	۰,۹۴	اتمسفر	ATMOS
$۵,۵ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۵,۵ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۱,۱ \times ۱۰^{-۱۷}$	۲۳۹۰	۳,۵	۸	۲۵۰۰	آندزیت	AND01
$۵,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۵,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	۸۴۰	۲	۸	۲۰۰۰	لاهار	LAHAR
$۵,۰ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۵,۰ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۲,۰ \times ۱۰^{-۱۷}$	۸۴۰	۳,۵	۸	۲۵۰۰	ولکانیک های آلتره شده	AND02
$۵,۵ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۵,۵ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۱,۱ \times ۱۰^{-۱۶}$	۲۰۰	۲	۲۵	۱۸۰۰	توف آندزیتی	TUFF2
$۵,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۵,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۲,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	۸۴۰	۲	۸	۳۰۰۰	تراکی آندزیت آلتره شده	TRAN2
$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۷}$	۸۴۰	۲	۸	۳۰۰۰	تراکی آندزیت لاوی آلتره شده	TRAN3
$۵,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۵,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	۸۴۰	۳,۵	۸	۳۰۰۰	تراکی آندزیت	TRAN1
$۷,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۷,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	۲۰۰	۲	۸	۱۸۰۰	پیروکلاستیک	PRCLS
$۵,۵ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۵,۵ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۱,۱ \times ۱۰^{-۱۷}$	۲۰۰	۲	۲۵	۱۸۰۰	توف آلتره شده	TUFF3
$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۷}$	۸۰۰	۲	۸	۱۸۰۰	برش و برش توفی	BRTBR
$۹,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۹,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۹,۵ \times ۱۰^{-۱۶}$	۲۰۰	۲	۲۵	۱۸۰۰	توف	TUFF1
$۴,۰ \times ۱۰^{-۱۳}$	$۴,۰ \times ۱۰^{-۱۳}$	$۷,۰ \times ۱۰^{-۱۴}$	۲۰۰	۲	۲۵	۱۸۰۰	توف های تراکی آندزیتی و برش توفی	TUFF4
$۵,۰ \times ۱۰^{-۱۴}$	$۵,۰ \times ۱۰^{-۱۴}$	$۹,۰ \times ۱۰^{-۱۵}$	۹۲۰	۲	۸	۲۹۰۰	مونزونیت	MONZT
$۵,۰ \times ۱۰^{-۱۵}$	$۵,۰ \times ۱۰^{-۱۵}$	$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۵}$	۵۰۰	۲	۱۴	۱۸۰۰	توف و برش توفی	TTFBR
$۴,۰ \times ۱۰^{-۱۳}$	$۴,۰ \times ۱۰^{-۱۳}$	$۷,۰ \times ۱۰^{-۱۴}$	۸۰۰	۲	۱۴	۱۸۰۰	برش توفی	TUFBR
$۹,۰ \times ۱۰^{-۱۳}$	$۹,۰ \times ۱۰^{-۱۳}$	$۹,۰ \times ۱۰^{-۱۳}$	۸۰۰	۲	۱۴	۲۵۰۰	برش توفی آندزیتی	AND03
$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۷}$	۲۳۹۰	۲	۸	۲۵۰۰	آندزیت پروکلاستیک	AND04
$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	۸۰۰	۲	۰,۵	۲۸۰۰	دیوریت پورفیری	DIORT
$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۵}$	$۱,۰ \times ۱۰^{-۱۵}$	$۵,۰ \times ۱۰^{-۱۶}$	۸۴۰	۲	۲۰	۳۰۰	هورنفلس	HRNFS
$۵,۰ \times ۱۰^{-۱۴}$	$۵,۰ \times ۱۰^{-۱۴}$	$۵,۰ \times ۱۰^{-۱۴}$	۹۲۰	۰,۲	۲۵	۲۳۰۰	کنگومرا	CNGLM
$۶,۰ \times ۱۰^{-۱۴}$	$۶,۰ \times ۱۰^{-۱۴}$	$۷,۰ \times ۱۰^{-۱۴}$	۸۰۰	۲	۲۵	۲۵۰۰	زون های شکسته و گسلی	FAUFR

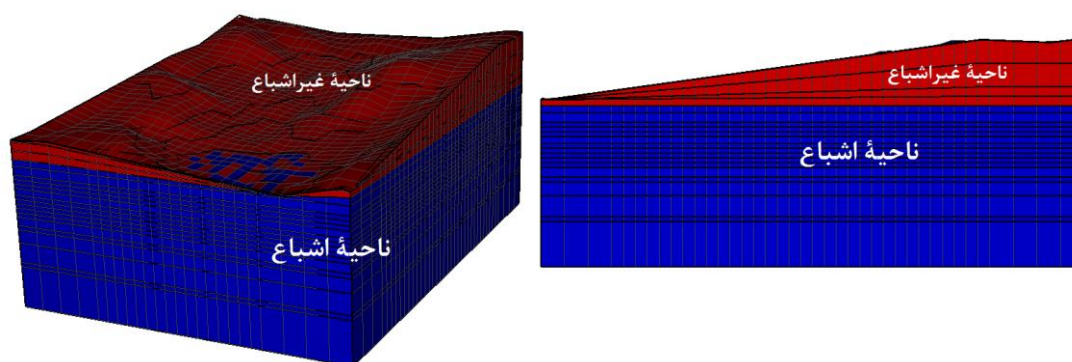


شکل ۶. توزیع سه‌بعدی تیپ‌سنگ‌های شاخص

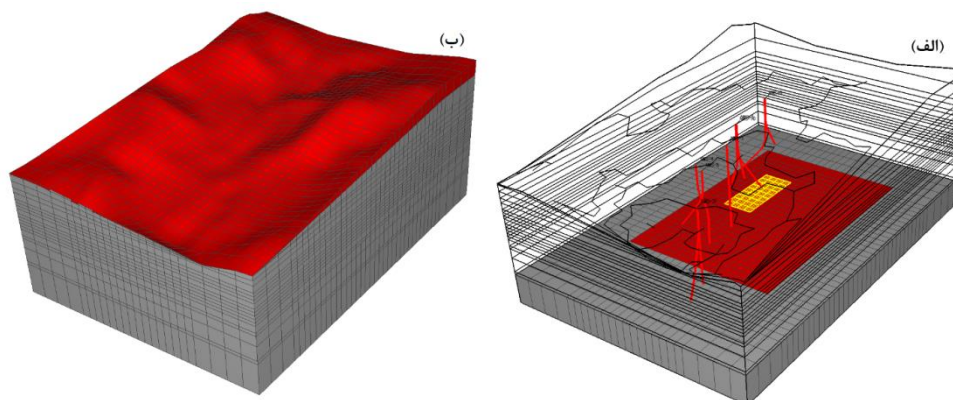
۱۰۸ kg/s (۳ kg/s برای هر بلوک) با دمای 244°C (آنتالپی ویژه $1056/43 \text{ kJ/kg}$) مطابق نتایج ژئوترموترهای چشمه‌های آب‌گرم زمین‌گرمایی [۵]، تعیین شد. محل، مساحت و میزان نرخ جریان با روش سعی و خطا از طریق فرایندهای تکراری مدل حالت طبیعی بهینه شد. علاوه بر زون تغذیه سیال دما بالا از لایه تحتانی، سیستم از طریق بارش جوی از لایه‌های فوقانی شبکه (بلوک‌های سطحی لایه‌های AA, TP1, TP2, TP3 و TP4)، با دمای 15°C (آنتالپی 62980 J/kg) و متوسط بارش سالیانه $32/57$ میلی‌متر در سال نیز تغذیه می‌شود. با توجه به جنس ولکانیکی واحدهای سنگی منطقه، نرخ نفوذ بارش ۱۰ درصد در نظر گرفته شد.

۳.۳. شرایط مرزی و اولیه

برای اجرای شرایط اولیه، مدت زمان $1/5$ میلیون سال در نظر گرفته شد و پروفیل فشار هیدرواستاتیکی با آب اشباع در 15°C تهیه شد. شکل ۷ نواحی اشباع و غیراشباع در حالت دوبعدی و سه‌بعدی برای مدل را نشان می‌دهد. برای مجزا کردن این دو ناحیه از درصد اشباع هوا ۹۹ درصد در ناحیه غیراشباع و ۰ درصد برای محیط اشباع استفاده شد. قسمت‌های فوقانی مدل، از فشار ثابت 0.75 bar و دمای 15°C پیروی کرده و با در نظر گرفتن سطح آب‌های زیرزمینی در چاه‌های اکتشافی، ارتفاع تقریبی 2400 متر بالاتر از سطح دریا به عنوان مرز نواحی اشباع و غیراشباع در نظر گرفته شد. محدوده تغذیه سیال دما بالا در بخش جنوب غربی ناحیه روی لایه تحتانی (QQ) در شکل (۸-الف) نشان داده شده است، این ناحیه با نرخ جریان ورودی



شکل ۷. ناحیه اشباع و غیراشباع مدل عددی شمال غرب سبلان در حالت دوبعدی (ضلع جنوب غربی) و سه‌بعدی



شکل ۸. (الف) شرایط مرزی فلاکس حرارتی و ناحیه تغذیه کننده سیستم با سیال دما بالا از لایه تحتانی QQ (به ترتیب رنگ محدوده قرمز و زرد رنگ)، (ب) مرزهای کناری و سطحی مدل

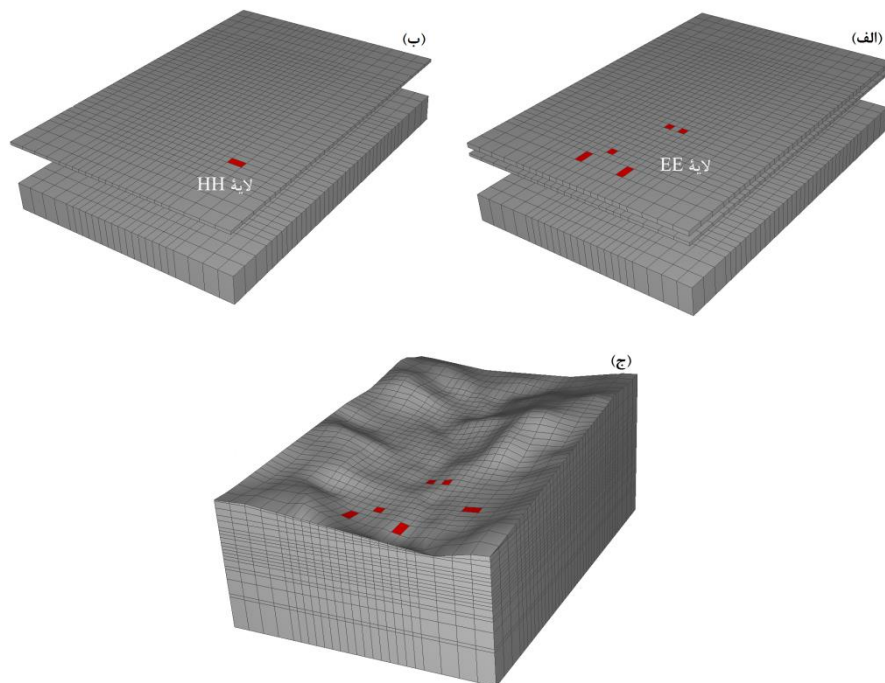
مدل عددی استفاده شد. فلاکس حرارتی از لایه تحتانی (QQ) به میزان 0.2 W/m^2 به عنوان اساس محاسبه جریان ورودی حرارت در بلوک های بخش جنوبی و مرکزی محاسبه شد (شکل ۸-الف). به منظور پیاده سازی هدرروی حرارت، از بلوک هایی که لایه توپوگرافی سطحی را تشکیل می دهند و متعلق به لایه های فوقانی زیر لایه هوا هستند، استفاده شد.

۴.۳. تطبیق اطلاعات چاهی و اعتبارسنجی مدل

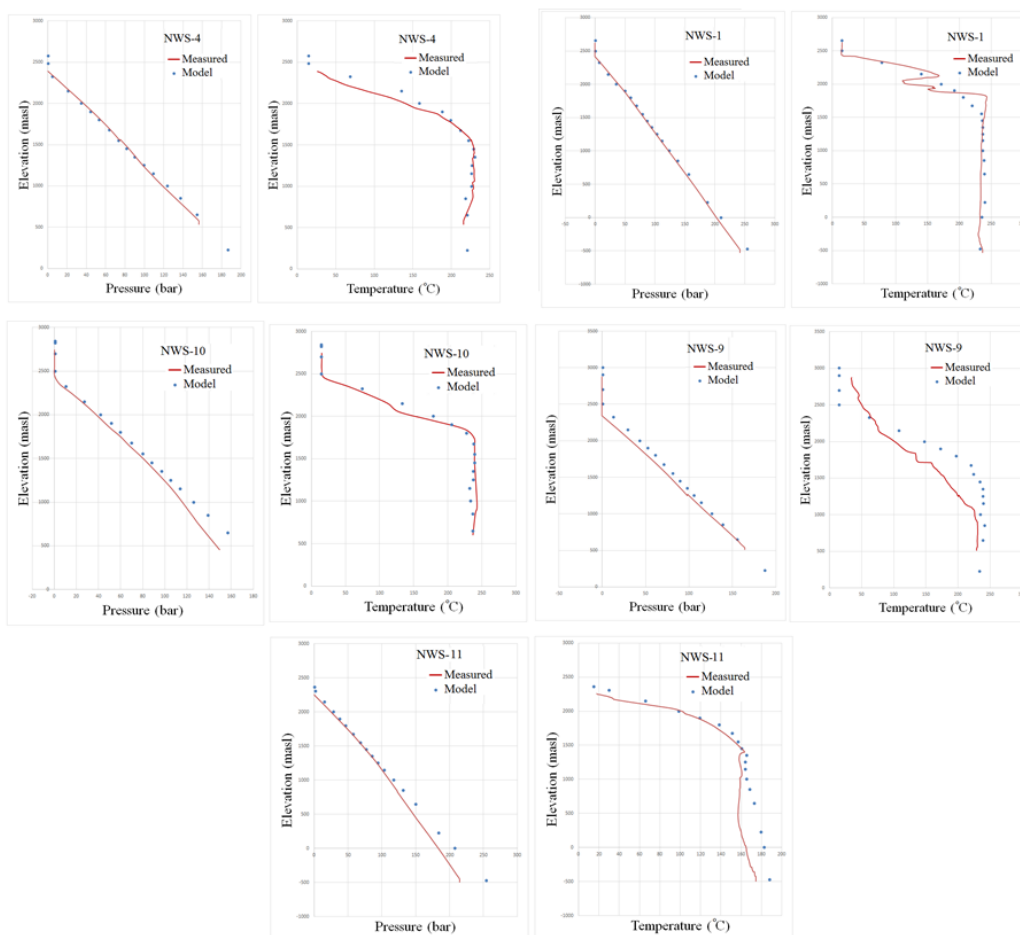
فرایند اعتبارسنجی به طور معمول شامل مقایسه نتایج محاسبه شده در مقابل دما و فشار اندازه گیری شده در ۱۰ چاه اکتشافی است. این فشار همان مقدار فشار پایدار زون تغذیه اصلی است که در مدت تست درون چاهی به دست آمده است. تطبیق بین مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده با انجام واسنجی به روش سعی و خطا با تنظیم پارامترهای نفوذپذیری تیپ سنگ ها، دبی جریان سیال و آنتالیپی ویژه سیال دما بالای ورودی اختصاص داده شده به بلوک های لایه زیرین و فشارهای ته چاهی محل های تخلیه بهبود داده شد. شکل ۱۰ نتایج اعتبارسنجی مدل برای چاه های NWS-10، NWS-1، NWS-4، NWS-9 و NWS-11 را نشان می دهد که بهترین تطبیق پروفیل های فشار و دمای محاسبه شده و اندازه گیری شده برای این چاه ها است. با توجه به اینکه زون غیراشباع نیز در این مدل گنجانده شده است، ترازهایی که در این زون قرار گرفته اند، دارای فشار اندازه گیری شده یکسان و بدون تغییر هستند که این حالت به خوبی در پروفیل های حاصل از مدل سازی عددی نیز به دست آمده اند و نشان از عملکرد صحیح این مدل سازی در محیط غیراشباع است.

در شکل (۸-ب) بلوک های در نظر گرفته شده برای بارش در مدل سازی نشان داده شده است. برای بازتولید کردن محل های تخلیه طبیعی میدان، از تولید سیال بر اساس قابلیت تحویل در بلوک های شبکه زیر چشمه ها استفاده شد [۱۰]. در مدل قابلیت تحویل^۱، تولید روی قابلیت تحویل در مقابل فشار ته چاهی (P_{wb})، با یک شاخص تولید (PI) عمل می کند. نرخ جریان جرم (دبی جرم) روی قابلیت تحویل با تفاوت فشار بین بلوک شبکه و فشار تعیین شده ای (فشار ته چاهی) که کمتر از فشار بلوک است، متناسب است. بنابراین، فشار بلوک شبکه به علت تولید سیال کاهش می یابد، نرخ جریان در سطح کاهش می یابد و سرانجام به خاطر اینکه تفاوت فشار به صفر می رسد، این نرخ متوقف می شود. شاخص تولید (PI) برای همه بلوک های زیر چشمه های آب گرم با مدل قابلیت تحویل یکسان محاسبه شد و فشار ته چاهی (P_{wb}) با استفاده از رفتار سعی و خطا به دست آمد. چندین محل تخلیه طبیعی سیال زمین گرمایی از طریق چشمه های آب گرم و در بستر رودخانه بیشتر در بخش شمالی ناحیه وجود دارد. تعداد ۸ چشمه آب گرم در سیستم شبکه واقع شد. دمای سیالات در حال تخلیه ۳۵ تا ۸۵ درجه سانتی گراد و نرخ جریان چشمه ها حدود $25 - 30 \text{ kg/s}$ در کل است، اما چندین محل تخلیه در بستر رودخانه و باندها نیز وجود دارند که دبی آن ها غیرقابل اندازه گیری است. بنابراین، فرض شد که جریان خروجی از سیستم حدود $40 - 45 \text{ kg/s}$ است. به منظور رسیدن به این هدف ۶ بلوک (شکل ۹) از لایه های EE و HH برای بازتولید فعالیت چشمه آب گرم در

1. Deliverability model



شکل ۹. بلوک‌های تخلیه در لایه‌های EE و HH و موقعیت آن‌ها در سطح

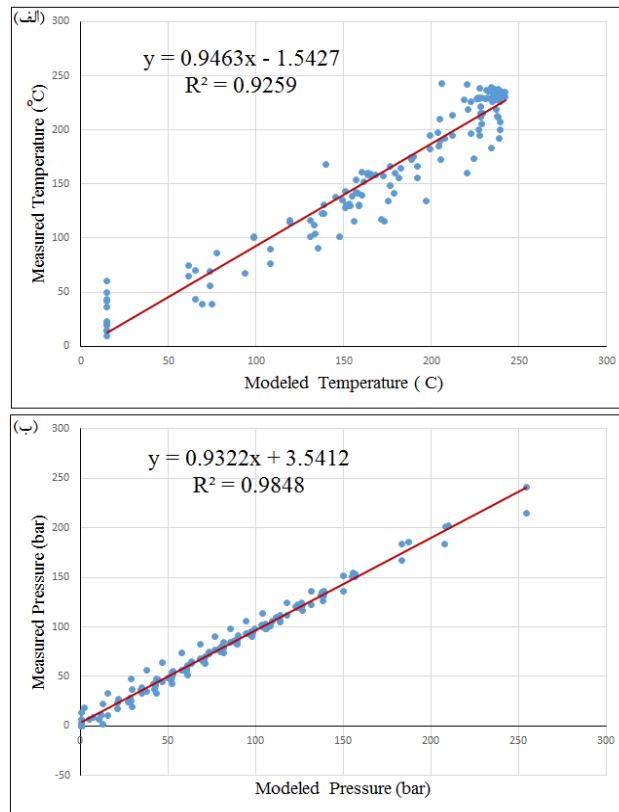


شکل ۱۰. دما و فشار اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده چاه‌های NWS-1، NWS-4 و NWS-9

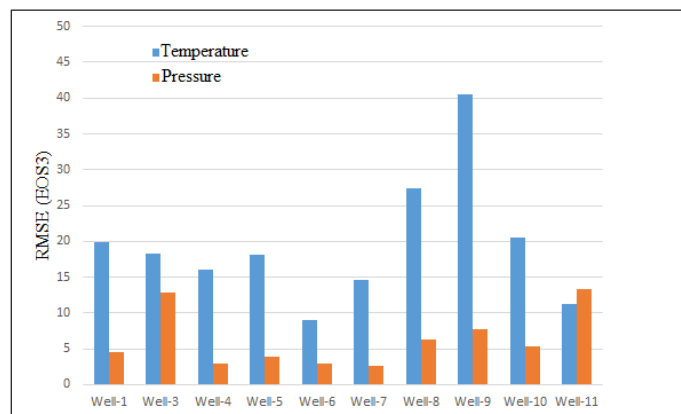
سید رحیمی نیارق: مدل سازی عددی مخزن زمین گرمایی در محیط غیراشباع ...

کرد. بر اساس مقادیر فشار اندازه گیری شده از چاه ها، متوسط گرادیان فشار در ناحیه اشباع، مقدار ۰/۰۸۳۳ bar/m برای میدان قبل از تولید محاسبه شد. در مدل حالت طبیعی نیز متوسط گرادیان فشار ناحیه مقدار ۰/۰۸۵۷ bar/m محاسبه شد.

برای ارزیابی عملکرد کلی مدل اقدام به رسم نمودار پراکندگی داده های اندازه گیری شده در مقابل داده های محاسبه شده شد (شکل ۱۱) و اختلاف بین این مقادیر با استفاده از روش RMSE محاسبه شد. محدوده خطا برای دما و فشار به ترتیب ۹/۰۶ - ۴۰/۵۴ و ۲/۹۲ - ۱۳/۲۹ تعیین شد (شکل ۱۲). این مقادیر یک تطبیق مناسب را مشخص



شکل ۱۱. مقایسه دما (الف) و فشار (ب) اندازه گیری شده و محاسبه شده برای مدل حالت طبیعی



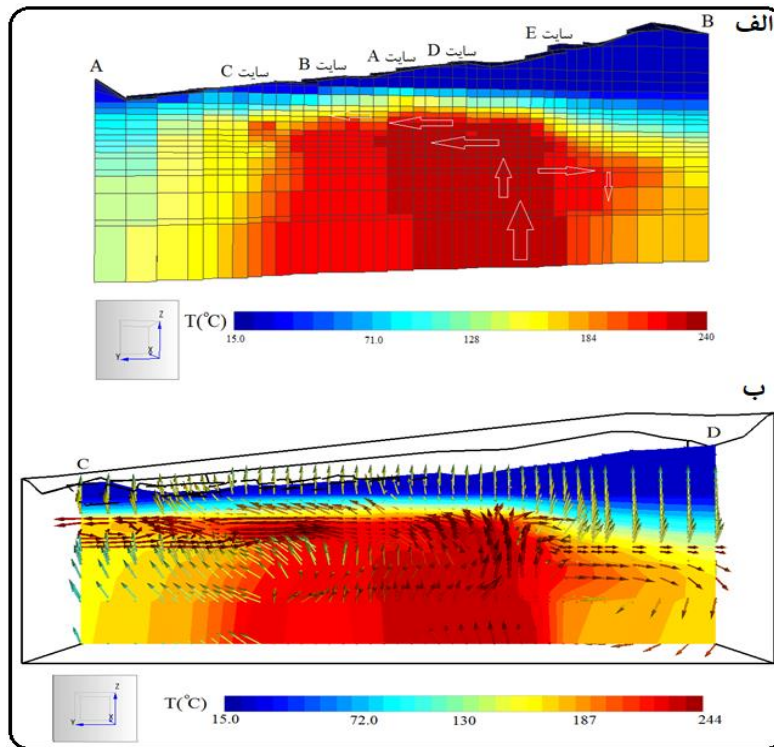
شکل ۱۲. مقدار RMSE دما و فشار مدل سازی شده در حالت طبیعی

۵.۳. تشریح نتایج مدل‌سازی

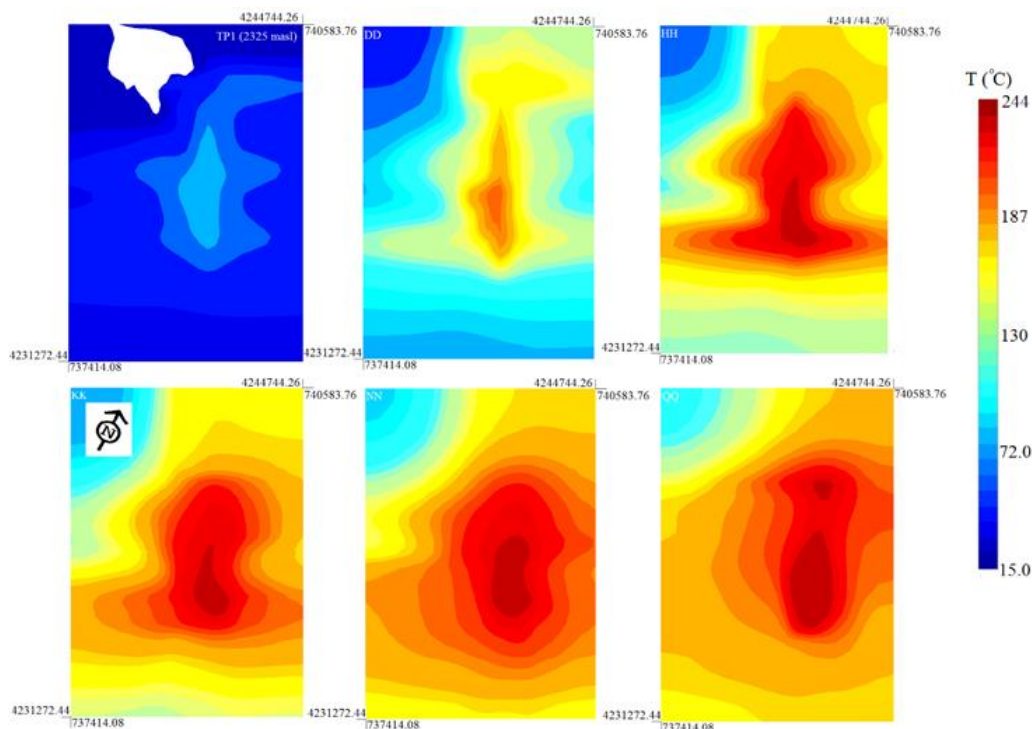
شکل (۱۳-الف) توزیع دمایی و جریان جرم را روی مقطع عمودی AB (شکل ۳) نشان می‌دهد. این مقطع تلفیقی از محیط اشباع و غیراشباع است که از ارتفاع ۱۰۰۰- تا ۵۱۱۰ متر بالاتر از سطح دریا گسترش دارد. همان‌طور که از شکل نتیجه گرفته می‌شود، جریان رو به بالا از زون عمیق زیر چاه‌های سایت D و سایت E بالا آمده و در جهت جنوبی- شمالی حرکت می‌کند. بلوک‌هایی که روی زون تغذیه (محدوده مخزن) دما بالا در ترازهای بالاتر و در زون غیراشباع قرار دارند، دارای دمای بیشتری نسبت به نواحی خارج از زون سیال رو به بالا هستند. این مسئله می‌تواند به نقاط گسلی و شکسته و نفوذپذیر زیر این ناحیه که حرارت توسط آن‌ها به صورت همرفتی انتقال می‌یابد، مربوط باشد. همچنین، در شکل (۱۳-ب) الگوی جریان جرم، همراه با توزیع حرارت در مقطع عمودی CD در راستای گسل NNW2 (شکل ۲) نشان داده شده است. با توجه به اینکه این مقطع گسل یادشده را در برمی‌گیرد، نقش این گسل را در انتقال جریان به‌خوبی نشان می‌دهد. جریان رو به بالای داغ از زیر چاه‌های سایت D و E

بالا آمده و از طریق این گسل و زون‌های نفوذپذیر و شکسته، به بخش شمالی انتقال یافته و قسمت اعظم جریان از این بخش از سطح خارج می‌شود. بخشی از جریان سیال در بخش جنوبی در ارتفاعات پایین‌تر به طرف جنوب حرکت می‌کند و یک جریان رو به پایین ایجاد می‌کند و به صورت چرخشی به مخزن برمی‌گردد.

شکل ۱۴ توزیع دمای شبیه‌سازی‌شده در حالت طبیعی برای افق‌های هم‌تراز مرکز لایه‌های HH، KK، NN، QQ، DD و TP1 را نشان می‌دهد. در ترازهای پایین‌تر، گسل‌های NE5، NW3 و NW4 و در ادامه گسل NNW2 به عنوان انتقال‌دهنده اصلی جریان داغ به ترازهای بالاتر است. در لایه‌های AA، BB، CC، DD و AA (۱۸۵۰ تا ۲۴۰۰)، گروه‌های سنگی آندزیت، تراکی‌آندزیت، پیروکلاستیک و لاهار به عنوان سنگ پوششی عمل می‌کنند. در این بخش سیال از طریق زون‌های نفوذپذیر و شکسته که داخل سنگ پوششی قرار دارند، انتقال می‌یابد. دمای سیال در ترازهای بالاتر از ۳ هزار تقریباً به دمای متوسط اولیه منطقه 15°C نزدیک می‌شود.



شکل ۱۳. الف) توزیع دما ($^{\circ}\text{C}$) و جهت جریان جرم (بیکان‌های سفید) در مدل برای مقطع AB (شمال غربی- جنوب شرقی)، ب) توزیع دما ($^{\circ}\text{C}$) و الگوی جریان جرم در مدل برای مقطع CD (در جهت گسل NNW2)



شکل ۱۴. دید افقی دمای مدل سازی شده برای حالت طبیعی غیراشباع میدان زمین گرمایی شمال غرب سبلان

۴. نتیجه گیری

یک مدل عددی سه بعدی در محیط متخلخل مخزن زمین گرمایی شمال غرب سبلان با استفاده از کد Tough2 (EOS3) توسعه داده شد. مدول EOS3 نوعی از معادله حالت توأم جریان-حرارت است که در آن دو فاز آب و هوا در نظر گرفته شده است. در این مدل ناحیه غیراشباع در مدل سازی در نظر گرفته شد و با توجه به مدل مفهومی به روز شده از سیستم، پارامتر بارش نیز از طریق نفوذ در محیط غیراشباع وارد مدل سازی شد تا مدل کامل تری ارائه شود. مدل با تکیه بر داده های دما و فشار مدل شده و اندازه گیری شده با تغییر پارامترهای آنتالپی سیال ورودی دما بالا، نفوذپذیری تیپ سنگ ها، فشار ته چاهی بلوک های تخلیه، محل و میزان کل سیال در حال تخلیه از چشمه های آب گرم واسنجی و سپس اعتبارسنجی شد. تطابق قابل قبولی بین نتایج مدل شده و داده های اندازه گیری شده به دست آمد. نتایج نشان داد یک جریان ورودی آب زمین گرمایی در تراز یک هزار متری جنوب شرقی ناحیه زیر سایت های D و E وجود دارد. جریان سیال توسط زون های شکسته و گسل خورده در راستای جنوبی شمالی حرکت می کند. گسل های NW3، NW5 و

NNW2 نقش اصلی را در این سیستم بازی می کند. در نهایت، سیال زمین گرمایی به صورت چشمه های آب گرم از سطح تخلیه می شود. مطابق این نتایج، این شبیه سازی که بر اساس مقادیر دما و فشار پایا اعتبارسنجی شد، با مدل مفهومی سازگاری دارد. بنابراین، این مدل می تواند برای مدل سازی سناریوهای پیش بینی تولید آبی در ارزیابی قابلیت تولید مخزن استفاده شود.

۵. قدردانی

به این وسیله از سازمان انرژی های تجدیدپذیر و بهره وری انرژی ایران (ساتبا) به خاطر در اختیار قرار دادن داده های درون چاهی و همچنین، از آزمایشگاه مهندسی منابع زمین دانشگاه کیوشو ژاپن به دلیل در اختیار قرار دادن امکانات نرم افزاری برای مدل سازی عددی تشکر و قدردانی می شود.

منابع

- [1]. G. Gunnarsson, and E.S.P. Aradottir, "The deep roots of geothermal systems in volcanic areas: boundary conditions and heat sources in reservoir modeling," J. Transp. Porous Media, vol. 108, pp. 43-59, 2015, <https://doi.org/10.1007/s11242-014-0328-1>.

- [2]. H. Puppala, S. K. Jha, A. P. Singh, R. M. Elavarasan, and P. E. Campana, "Identification and analysis of barriers for harnessing geothermal energy in India. *Renewable Energy*", vol. 186, pp. 327-340, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.002>.
- [3]. K. Pruess, "TOUGH2- a general- purpose numerical simulation for multiphase fluid and heat flow", Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBL-29400. Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, Earth Sciences Division, California, 1991, <https://escholarship.org/uc/item/0wx8q119>.
- [4]. L. Hu, P.H. Winterfeld, P. Fakcharoenphol, and Y.Sh. Wu, "A novel fully-coupled flow and geomechanics model in enhanced geothermal reservoirs", *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 107, pp. 1–11, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.04.005>.
- [5]. S.C.P. Pearson, S.A. Alcaraz, and J. Barber, "Numerical simulations to assess thermal potential at Tauranga low-temperature geothermal system", *New Zealand. Hydrogeol. J.*, vol. 22, pp. 163–174, 2014, doi:10.1007/s10040-013-1076-y
- [6]. L. Pan, and C.M. Oldenburg, "T2Well—an integrated wellbore–reservoir simulator", *Comput. Geosci.*, vol. 65, pp. 46–55, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.06.005>
- [7]. G. Lu, X. Wang, F. Li, F. Xu, Y. Wang, Sh. Qi, and D. Yuen, "Deep geothermal processes acting on faults and solid tides in coastal Xinzhou geothermal field, Guangdong", *China. Phys. Earth Planet. Inter.*, vol. 264, pp.76–88, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2016.12.004>.
- [8]. Ch. Guo, K. Zhang, L. Pan, Z. Cai, C. Li, and Y. Li, "Numerical investigation of a joint approach to thermal energy storage and compressed air energy storage in aquifers", *Appl. Energy*, vol. 203, pp. 948–958, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.030>.
- [9]. E.K. Bjarkason, J.P. O’Sullivan, A. Yeh, and M.J. O’Sullivan, "Inverse modeling of the natural state of geothermal reservoirs using adjoint and direct methods" *Geothermics*, vol. 78, pp. 85–100, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.10.001>.
- [10]. S. Kwon, and Ch. Lee, "Thermal-Hydraulic-Mechanical coupling analysis using FLAC3D-TOUGH2 for an in situ heater test at Horonobe underground research laboratory", *Geosystem Eng.*, vol. 22, pp. 289-298, 2019, DOI: 10.1080/12269328.2019.1638315 1–10.
- [11]. Y. Noorollahi, H. Yousefi, R. Itoi, and S. Ehara, "Geothermal energy resources and development in Iran", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, pp. 1127–1132, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.05.004>.
- [12]. S. Porkhial, F. Abdollahzadeh Bina, B. Radmehr., and P. Johari Sefid, "Interpretation of the Injection and Heat Up tests at Sabalan geothermal field, Iran", *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne*, pp. 19-25, 2015.
- [13]. A. Kosari Torbehbar, and SM. Sattari, "Geochemistry and Isotope Study of Discharged Geothermal Fluids, NW Sabalan Geothermal Field, NW Iran", *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne*, pp. 19-25, 2015.
- [14]. M. Seyedrahimi-Niaaraq, F. Doulati Ardejani, Y. Noorollahi, and S. Porkhial, "Development of an updated geothermal reservoir conceptual model for NW Sabalan geothermal field, Iran", *Geothermal Energy*, vol. 22, 2017, doi: 10.1186/s40517-017-0073-0.
- [15]. M. Seyedrahimi-Niaaraq, and T. Nouri, "Investigating the Economic Effects and the Roadmap of Developing Geothermal Systems to Generate Electricity", *Journal of Renewable Energy and Environment* vol. 9, pp. 52-64, 2022, <https://doi.org/10.30501/jree.2022.317375.1290>.
- [16]. SKM (Sinclair Knight Merz), "Geochemical Evaluation of Well NWS-1. Sinclair Knight Merz, Report for SUNA (Renewable Energy Organization of Iran)", pp. 19, 2005, In Persian.
- [17]. Gh. Najafi, and B. Ghobadian, "Geothermal resources in Iran: the sustainable future", *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 15, pp. 3946–3951, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.032>.
- [18]. S. Porkhial, F. Abdollahzadeh Bina, B. Radmehr, and P. Johari Sefid, "Interpretation of the injection and heat Up tests at Sabalan geothermal field, Iran", In: *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne*, pp. 19–25, 2015.
- [19]. A. Kosari Torbehbar, and S.M. Sattari, "Geochemistry and isotope study of discharged geothermal fluids, NW Sabalan geothermal Field, NW Iran", In: *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne*, pp. 19–25, 2015.

- [20]. M. Fotouhi, "Geothermal development in Sabalan, Iran" In: Proceedings World Geothermal Congress 1995. Florence, Italy, pp. 191–196, 1995.
- [21]. Y. Noorollahi, and R. Itoi, "Production capacity estimation by reservoir numerical simulation of northwest (NW) Sabalan geothermal field, Iran", *Energy*, vol. 36, pp. 4552–4569, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.046>.
- [22]. E. Kaya, S.J. Zarrouk, and M.J. O'Sullivan, "Reinjection in geothermal fields: a review of worldwide experience", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, pp. 47–68, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.032>.
- [23]. K. Nicholson, "Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques", Springer Science & Business Media, p. 263, 2012.
- [24]. A.R. Diaz, E. Kaya, and S.J. Zarrouk, "Reinjection in geothermal fields: A worldwide review update", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 105–162, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.151>.
- [25]. S. Strelbitskaya, and B. Radmehr, "Geochemical characteristics of Reservoir fluid from NW-Sabalan geothermal Field, Iran", *Proceeding World Geothermal Congress 2010*, Bali, Andonesia, pp. 25–29, 2010.
- [26]. M. Seyedrahimi-Niaraq, F. Doulati Ardejani, Y. Noorollahi, S. Porkhial, R. Itoi, and S. Jalili Nasrabadi, "A three-dimensional numerical model to simulate Iranian NW Sabalan geothermal system", *Geothermics*, vol. 77, pp. 42–61, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.08.009>.
- [27]. I. Bogie, A.J. Cartwright, Kh. Khosrawi, B. Talebi, and F. Sahabi, "The Meshkin Shahr geothermal prospect, Iran", *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Japan, pp. 997-1002, 2000.
- [28]. R. Saber, A. Caglayan, and I. S. I. K. Veysel, "Landscape response to deformation in the Sabalan area, NW Iran: Inferred from quantitative morphological and structural analysis", *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, pp. 1-26, 2022, [doi:10.1017/S1755691022000135](https://doi.org/10.1017/S1755691022000135).
- [29]. A. Amini, "Geological report of Meshginshahr area", Ministry of Mines and Metals, Geological Survey of Iran, Tehran, 1988, In Persian.
- [30]. KML (Kingston Morrison), "Sabalan geothermal project, Stage 1—Surface exploration, final exploration report", Kingston Morrison Limited Co., report 2505-RPT-GE-003 for the Renewable Energy Organization of Iran, Tehran, p. 83, 1999.
- [31]. EDC (Energy Development Corporation), "2009MT survey of NW Sabalan geothermal project, NW Iran", Report submitted to SUNA, p. 13, 2010.
- [32]. J. Bundschuh, and M. Suarez Arriaga, "Introduction to the Numerical Modeling of Groundwater and Geothermal Systems: Fundamentals of Mass, Energy and Solute Transport in Poroelastic Rocks", vol. 2, pp. 522. 2010, <https://doi.org/10.1201/b10499>.
- [33]. K. Pruess, C. Oldenburg, G. Moridis, "TOUGH2 user's guide, version 2.0.", Report LBNL 43134. Berkeley, CA, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory, pp. 197, http://esd.lbl.gov/TOUGH2/LBNL_43134.pdf; 1999.
- [34]. W. Beckman, S. Klein, "Engineering equation solver professional versions user manual, F-Chart software", p. 312, 2007.
- [35]. E. Y. Turali, and S. Simsek, "A three-dimensional numerical model of Yerköy (Yozgat) hydrogeothermal system, Central Anatolia, Türkiye", *Journal of African Earth Sciences*, vol. 198, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104815>.