

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI ÇÖZÜCÜSÜ ANSYS FLUENT PROGRAMININ KARŞILAŞTIRILMALI ÇÖZÜMÜ VE YERBİLİMLERİNDE UYGULAMASI

BENCHMARK STUDY OF THE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SOLVER, ANSYS FLUENT AND ITS APPLICATIONS IN GEOSCIENCES

Serkan Üner^{1*}, Doğa Düşünür Doğan¹

¹ Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Maden Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Ayazağa Kampüsü, Maslak, 34469
İstanbul

Email: uners@itu.edu.tr

Yayına Geliş (Recieved): , Yayına Kabul (Accepted):

*Corresponding author

Öz

Gözenekli ortamlarda sıcaklık ve yeraltı suyu akış modellemesi çalışmaları, hidrojeolojik modellemeler ve jeotermal alanların modellemesi gibi konuları da içerecek şekilde geniş kapsamlı uygulamalar barındırmaktadır. Söz konusu yerbilimleri problemleri için Modflow, Feflow, Comsol Multiphysics gibi programlar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışma dahilinde, literatürde uygulamaları bulunan bu programlara alternatif olarak ANSYS FLUENT isimli hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) çözücüsü karşılaştırmalı değerlendirme (Benchmarking) çalışmasına tabi tutulacaktır. ANSYS FLUENT programının, Batı Anadolu'ya tektonik açıdan çok benzer yapıya sahip olan Basin and Range bölgesinde gerçekleştirilmiş ve model parametreleri yayınlanmış McKenna ve Blackwell (2004) çalışması ile karşılaştırmalı değerlendirmesi yapılmış olup, programın yerbilimlerinde kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sayısal modelleme, Akışkan modellemesi, Sıcaklık modellemesi, ANSYS Fluent, Karşılaştırmalı çözüm

Abstract

Temperature and groundwater flow modeling studies in porous media contain a wide range of applications including modeling of hydrogeology and geothermal fields. Programs such as Modflow, Feflow, and Comsol Multiphysics frequently used for these geoscience problems. In this study, we performed a benchmarking study of the ANSYS FLUENT, computational fluid dynamics (CFD) solver as an alternative to the software used in the literature. For this reason, we selected the study of McKenna and Blackwell (2004), in which the model parameters are published for benchmarking. Since their study area of Basin and Range province is under similar tectonic forces as Western Anatolia, this benchmarking model is a suitable candidate to prove ANSYS FLUENT software's validity in geosciences.

Key words: Numerical modeling, Fluid flow modeling, Temperature modeling, ANSYS Fluent, Benchmarking

GİRİŞ

Bir çok yerbilimleri probleminin çözümünde sayısal yeraltı suyu akış ve sıcaklık modellemeleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bunlardan başlıcaları

jeotermal alanların modellemesi (örn: Oldenburg ve Pruess, 1998; Magri vd. 2010; Borgia vd. 2012; Magri vd. 2012; Taillefer vd. 2018), hidrokarbon çalışmaları (örn: Moridis 2002; Andersen vd. 2005; Bourdet vd. 2010), ve yeraltı kirliliği çalışmalarıdır

(örn: Christoph ve Dermietzel, 2000; Eyles ve Meriano, 2010). Yerbilimlerinde sıklıkla kullanılan ve gözenekli ortamda yeraltı suyu akışını modelleyen Modflow (Harbaugh 2005), Feflow (Diersch 2014), Comsol Multiphysics (COMSOL Multiphysics), TOUGH2 (Pruess vd., 1999), PetraSim gibi hesaplamalı akışkanlar çözücülerini sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sonlu hacimler ayrıklama tekniklerini kullanmaktadır. Bunlara alternatif olarak kullanılacak hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü ANSYS FLUENT gözenekli ortamlar için benzer hesaplamaları yapabilecek kapasitede bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımıdır.

Karşılaştırılmalı değerlendirme problemi (Benchmarking problem) temel olarak üç prensibe dayanmaktadır; geçerlilik (Validity), yeniden üretilebilirlik (Reproductivity) ve karşılaştırılabilirlik (Comparability) (Prechelt, 1994). Bu çalışma kapsamında kullanılacak olan ANSYS FLUENT isimli ticari yazılım, programın farklı versiyonları için çok sayıda karşılaştırmalı değerlendirme çözümleri gerçekleştirmiş olup sonuçlarını resmi internet sitelerinde kullanıcılara sunmaktadır (ANSYS, 2019). Bu kapsamda, kullanılacak olan yazılımın akışkanlar dinamiği için yönetici denklemleri (governing equation) doğru çözdüğü bilinmektedir. Dolayısıyla geçerlilik ve yeniden üretilebilirlik kriterleri sağlanmıştır.

Hesaplamalı akışkanlar çözücüsü olan ANSYS FLUENT programı makine mühendisliği, uçak mühendisliği, kimya mühendisliği gibi birçok alanda (ANSYS, 2019) sıklıkla kullanılıyor olmasına rağmen, literatürde yerbilimlerindeki örnekleri çok az sayıdadır. Ayrıca, az sayıdaki bu örneklerin hepsi çok küçük ölçekli çalışmalar olup (örn: Sarkar vd. 2002,2004) havza geneli çalışmaların örneği bulunmamaktadır. Bu sebepten dolayı program parametrelerinin

(örn: başlangıç ve sınır koşulları) denenmesi ve yerbilimlerine uygun parametrelerin seçimi amacıyla karşılaştırılabilirlik testine tabi tutulmuştur. Bu amaçla, yeraltı geometrisi, fiziksel ve hidrojeolojik parametreleri (geçirimsizlik, ısı iletim katsayısı, porozite vb.) literatürde yayınlanmış olan McKenna ve Blackwell (2004) çalışması kullanılmıştır. Karşılaştırma amacıyla seçilen çalışmanın Batı Anadoludaki horst-graben sistemine benzeyen Basin and Range bölgesinde olması programın Türkiye'deki yerbilimleri problemlerine uygulanabilirliği açısından da önemli bir kriter olmuştur.

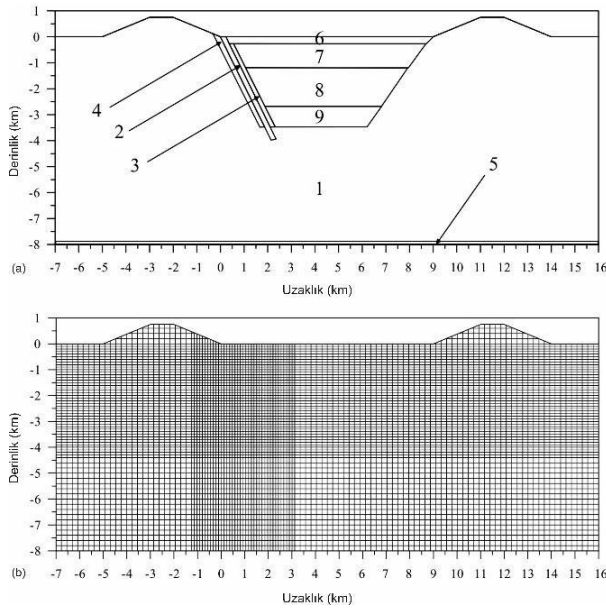
KARŞILAŞTIRMA MODELİ

Karşılaştırma modeli için McKenna ve Blackwell (2004) çalışması seçilmiştir. McKenna ve Blackwell (2004), çalışmasında Basin and Range bölgesindeki rezervuar sıcaklığı yaklaşık 280 olan bir jeotermal sahaya ait sıcaklık ve akışkan modellemesini TOUGH2 ve PetraSim programları ile gerçekleştirmiştir.

McKenna ve Blackwell (2004), oluşturdukları sayısal model, gerilmeli tektonik rejim altında açılan havza geometrisini temsil etmektedir. Çalışma sahası olan Basin and Range bölgesi, 8 km derinliğinde ve 23 km uzunluğunda bir model geometrisi ile temsil edilip, 7471 elemandan oluşan düzgün kare ağlar ile ayrıştırılmıştır (Şekil 1). Model geometrisi birbirlerinden yaklaşık 9 km uzaklıkta ve bir vadi ile ayrılmış iki adet dağ içermektedir. Dağlar, havza tabanından yaklaşık 1 km yükseklikte yer almaktadır. Vadi, kalın bir sediman tabakası (4 km) ile kaplıdır ve vadiyi sınırlayan yüksek dalım açılı (6°) ve yüksek geçirimsizliğe sahip bir fay modelde mevcuttur.

Şekil 1(a) model geometrisi üzerinde yer alan sayılar farklı jeolojik birimleri

göstermektedir. Tablo 1’de her bir bölge için model parametreleri (porozite, ıslak ısı iletim katsayısı, yatay ve düşey geçirimsizlik) yer almaktadır. Modellemede 2650 kg/m^3 sabit yoğunluk ve 1000 J/kg.K ısı kapasite (heat capacity) kullanılmıştır. Üst duvar sıcaklığı 10°C , mevsimsel ortalama sıcaklık olarak kabul edilmiştir. Modelin alt duvar sıcaklığı ise bölgede daha önce yapılmış olan ısı akışı çalışmalarından derlenerek 90 mW/m^2 olarak seçilmiştir. Yan duvarlar adyabetik olup, ısı geçişine izin verilmemiştir. Buna ek olarak üst duvar sınır koşuluna $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ (1 atm) yüzey basıncı uygulanmıştır. Ayrıca McKenna ve Blackwell (2004) üst duvar koşulunda tepe noktalarından akışkanın modele girmesine izin vermektedir.



Şekil 1. a) Model geometrisi, b) Model ağları (McKenna ve Blackwell, 2004)

Figure 1. a) Model geometry, b) Model mesh (McKenna and Blackwell, 2004)

Modelleme çalışmasında sadece anakayanın geçirimsizlik değerini değiştirerek çözülemeye gitmişlerdir. $1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ geçirimsizlik değeri ile yaptıkları sayısal çözümlerde yıllık akışkan boşalım miktarını 17000 L/yıl olarak hesaplarken, $5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$

geçirimsizlik değerinde akışkan boşalım miktarını 45000 L/yıl olarak hesaplamaktadırlar. Çalışma sahasında yapılan ölçümler ve tahminlere göre sahada ortalama akışkan boşalım miktarı 31600 L/yıl olarak belirlendiği bilindiğine göre karşılaştırmalı değerlendirme çalışması $1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ geçirimsizlikli model kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

McKenna ve Blackwell (2004), 32 My dan sonraki modellerin kararlı duruma geçtiğini belirtmişlerdir. Tablo 1’deki model parametreleri kullanılarak McKenna ve Blackwell (2004) tarafından hesaplanan sıcaklık ve akış dağılımı Şekil 2’de görülmektedir. Referans makaledeki çözümler modelin kararlı duruma geçtiği 32 My baz alınarak çizdirilmiştir.

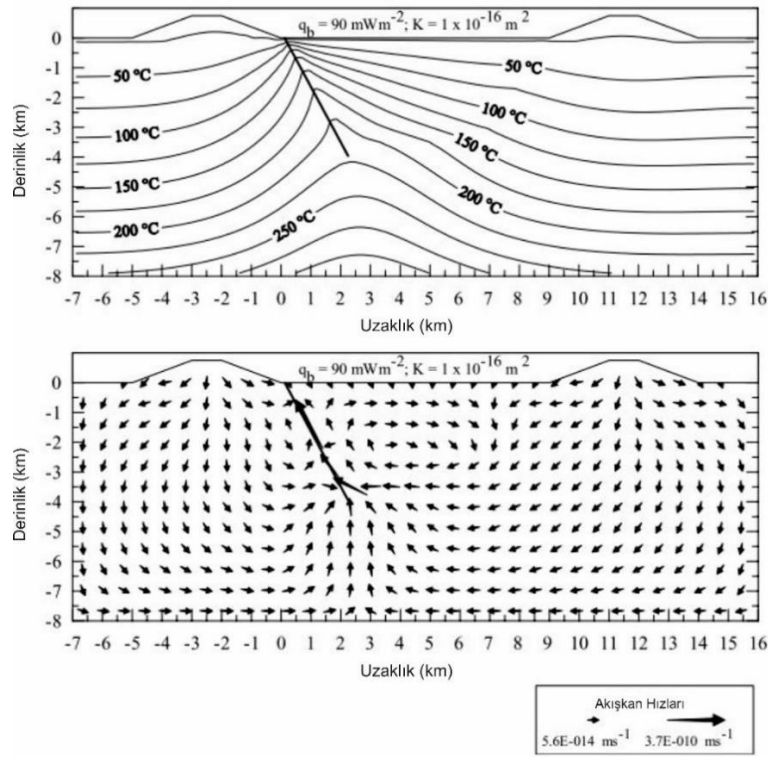
Sıcaklık dağılımına bakıldığında, yüksek geçirimsizlikli bölgede, yani fayın olduğu alanda, yüzeye doğru sıcaklık konturlarının sıklaştığı görülmektedir. Faydan uzaklaştıkça eşsıcaklık eğrileri yumuşak geçişli bir şekilde sıralanmaktadır (Şekil 2). Akışkan hızları incelendiğinde ise, hızların $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ ile $1 \times 10^{-14} \text{ m/s}$ arasında olduğu görülmektedir. Fay boyunca yüzeye doğru hareket eden akışkan, hesaplanan sıcaklık eğrileri ile uyumludur ve bölgedeki ısı transferimin taşınım hücreleri (convection cells) ile gerçekleştirildiğini göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında Şekil 1(a)’daki yer altı modeli ANSYS Design Modeler kullanılarak tekrar oluşturulmuştur (Şekil 3). Yeniden oluşturulan model 110072 adet düğüm noktası (node) ve 218798 adet sonlu hacim elemanından oluşmakta olup düzgün üçgen ağlar kullanılarak ayrıştırılmıştır. Çözümleme yapılan hücreler sedimanlar içinde 25 metre, anakaya ve dip bölgesinde 50 metre çözünürlüğe sahiptirler.

Tablo 1: Model parametreleri (McKenna ve Blackwell (2004)'den değiştirilmiştir.)

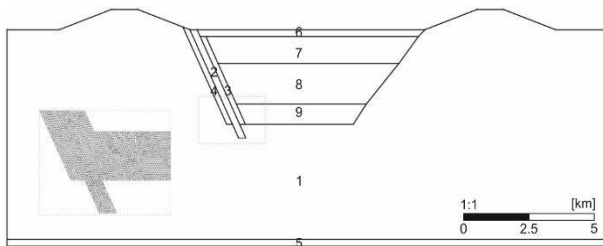
Table 1: Model parameters (Modified from McKenna and Blackwell (2004))

Ortam	Malzeme	Porozite(1)	Islak Isıl İletim Katsayısı (W/m.K)	Yatay Geçirimsizlik (m ²)	Düşey Geçirimsizlik (m ²)
1	Anakaya	1.0E-01	2.5	1.0E-16	1.0E-16
2	Fay	1.0E-01	2.5	1.0E-14	1.0E-14
3	Fay (Vadi tarafı)	1.0E-01	1.25	1.0E-18	1.0E-18
4	Fay (Tepe tarafı)	1.0E-01	2.5	1.0E-18	1.0E-18
5	Dip	1.0E-05	2.5	1.0E-20	1.0E-20
6	Vadi dolgusu 1	1.0E-01	1.25	1.0E-15	1.0E-16
7	Vadi dolgusu 2	1.0E-01	1.25	1.0E-15	1.0E-16
8	Vadi dolgusu 3	1.0E-01	1.25	1.0E-15	1.0E-16
9	Vadi dolgusu 4	1.0E-01	1.25	1.0E-15	1.0E-16



Şekil 2. McKenna ve Blackwell (2004), sıcaklık ve akışkan hızları dağılımı (32 My)

Figure 2. McKenna and Blackwell (2004), temperature and fluid flow pattern (32 My)



Şekil 3. Karşılaştırmalı değerlendirme için ANSYS Design Modeler kullanılarak oluşturulan yeni model geometrisi. Şekli içindeki kare alan içerisinde yakınlaştırılmış örnek ağ geometrisi görülmektedir.

Figure 3. New model geometry produced using ANSYS Design Modeler for benchmarking. Inset figure shows focused mesh geometry.

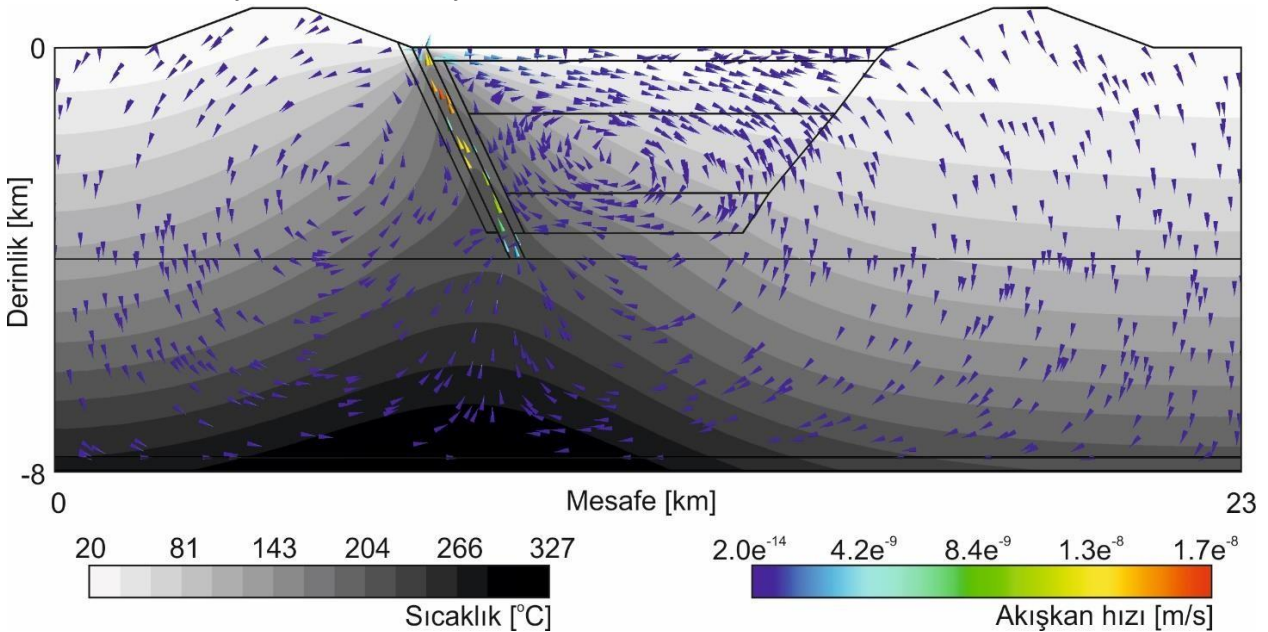
SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında Batı Anadolu'ya tektonik açıdan çok benzeyen Basin and Range bölgesinde daha önce yapılmış olan sıcaklık ve akış modellemesi, programın karşılaştırmalı çözümünün yapılması amacıyla ilk kez ANSYS FLUENT hesaplamalı akışkanlar çözücüsü kullanılarak hesaplatılmıştır.

Şekil 4, ANSYS FLUENT ile elde edilen karşılaştırmalı değerlendirme sonuçlarını göstermektedir. Fay çevresinde hesaplanan sıcaklık eğrileri, referans makalesinde olduğu gibi akışkan hareketi ile birlikte yukarı yönlü olarak faya yaslanmaktadır. Faydan uzaklaştıkça ise eşsıcaklık eğrileri düzgün bir şekilde aralanmaktadır. Yüze yakın alandaki en yüksek sıcaklıklar, taşınım mekanizmasının etkisiyle fayın içinde izlenmektedir. Hesaplatılan akışkan hareketinin genel dağılımı referans çalışma ile uyumludur. Sedimenter havza içerisinde bulunan tek bir taşınım hücresi akışkanın saat

yönünde döndüğünü göstermektedir. Referans modelden gözlemlenen tek fark maksimum akışkan hızlarında izlenmiştir. McKenna ve Blackwell (2004), modelleme çalışmasında, en düşük akışkan hızı değerini $1e-10$ m/s hesaplarken, karşılaştırmalı doğrulama çalışmamızda en düşük akışkan hızı $1.7e-8$ m/s olarak hesaplanmıştır. Genel olarak modelleme çalışmalarında $1e-10$ m/s, sıcaklık dağılımını etkilemeyecek kadar küçük bir hızdır.

Bu çalışma ile ANSYS FLUENT, hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsünün gözenekli ortamlarda sıklıkla kullanılan Feflow, Modflow, Comsol Multiphysics vb programlara iyi bir alternatif olabileceği karşılaştırmalı doğrulama çalışması ile gösterilmiştir. Ayrıca, sıcaklık ve yeraltı suyu modellemesi gerektiren yerbilimleri problemlerinde uygulanabilir olduğu ispatlanmıştır.



Şekil 4. Karşılaştırmalı doğrulama için ANSYS Fluent ile hesaplatılan sıcaklık ve akışkan hızları
Figure 4. Temperature and fluid flow pattern calculated with ANSYS Fluent for benchmarking

KATKI BELİRTME

Bu makale, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı doktora tezlerini destekleme programı olan MDK-2018-41365 No'lu BAP Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Çalışma, İTÜ ve TÜBİTAK 118Y143 No'lu Araştırma Projesi tarafından desteklenmiştir. Yazarlar, bu projenin gerçekleşmesinden dolayı İTÜ ve TÜBİTAK kurum koordinatörlerine ve araştırmacılarına teşekkür ederler.

SUMMARY

Numerical groundwater flow and temperature modeling are frequently used in the solution of many geosciences problems such as geothermal field modeling (i.e. Oldenburg and Pruess, 1998; Magri et al. 2010; Borgia et al. 2012; Magri et al. 2012; Taillefer et al. 2018), hydrocarbon studies (i.e. Moridis 2002; Andersen et al. 2005; Bourdet et al. 2010), and groundwater contamination (i.e. Christoph and Dermietzel, 2000; Eyles and Meriano, 2010). There are numerous examples in the literature which uses computational fluid dynamics solvers such as, Modflow (Harbaugh 2005), Feflow (Diersch 2014), Comsol Multiphysics (COMSOL Multiphysics), TOUGH2 (Pruess et al., 1999), PetraSim. In this study, we performed a benchmarking study of the ANSYS FLUENT, computational fluid dynamics (CFD) solver as an alternative to the softwares used in the geoscience problems.

We selected the study of McKenna and Blackwell (2004), in which the model parameters are published. Moreover, their study area of Basin and Range shows an extensional tectonism as in Western Anatolia. Thus, benchmarking this model not only proves the validity of the ANSYS FLUENT, also shows that the software is also applicable to the geoscience problems in Western Anatolia.

Model geometry of the Basin and Range province consist of two mountain ranges which are approximately 1 km high, separated with a 9 km wide, 4km deep sedimentary basin. There is also a high permeability fault with high dipping angle (6°) present at the side of the sedimentary fill. This 23 km x 8 km cross-section discretized by 7471 uniform square elements (Fig. 1).

Table 1 shows the physical parameters such as, porosity, thermal conductivity, horizontal and vertical permeability for the modeling. McKenna and Blackwell (2004) also implemented density and heat capacity as 2650 kg/m^3 , and 1000 J/kg.K , respectively. Vertical walls of the model box is impermeable to fluid flow and heat transfer, thus making the boundary adiabatic. 10°C constant temperature which is the region's annual mean temperature is used for the upper wall boundary condition. McKenna and Blackwell (2004) also mentioned that they let the fluid enter the system from the range tops, which corresponds to rainfall. Moreover the model box is under the $1.01\text{e}+5 \text{ Pa}$ (1 atm) surface pressure which implemented at the upper wall as boundary condition. For the bottom wall, 90 mW/m^2 heat flux is implemented to the model deduced from previous studies.

McKenna and Blackwell (2004) indicated that the numerical solutions reach steady state after 32 Ma. Furthermore, the measured and predicted yearly discharge rate at the faults corresponds with the basement permeability value of $1\text{e}-16 \text{ m}^2$. Therefore, we show their numerical solution of $1\text{e}-16 \text{ m}^2$ basement permeability after 32 Ma.

Figure 2 shows temperature distribution and fluid flow vectors. Model predicts smooth isotherms away from the fault zones where the fluid circulation does not significantly affect temperature gradient. On the other hand, there is a non-linear vertical geothermal gradient observed near the relatively high permeable zone (fault). Isotherms leaning towards the relatively high

permeability zone (fault) indicate that the heat in the area transferred by convection cells.

Due to the measured and predicted yearly discharge rates, we reproduced the model geometry and compare the results with such permeability value of $1e-16 \text{ m}^2$. Reproduced model geometry discretized with 110072 nodes and 218798 triangular elements. Mesh resolution at the sediments, faults, and basement are 25m, 25m and 50m, respectively (Fig. 3).

Figure 4 shows the benchmarking results calculated from the ANSYS FLUENT CFD solver. Same high vertical thermal gradient, which shaped by the fluid circulation is observed at the fault zone just as the reference model. Fluid flow pattern is also in agreement with the model of McKenna and Blackwell (2004). However, there is a slight difference in velocity magnitudes. Calculated velocity magnitudes in the model of McKenna and Blackwell (2004) are between $1e-10 \text{ m/s}$ and $1e-14 \text{ m/s}$, whereas the calculated maximum velocity in benchmark model is $1.7e-8 \text{ m/s}$.

In this study, we present the ANSYS FLUENT, computational fluid dynamics solver as an alternative software used in geosciences such as Feflow, Modflow, Comsol Multiphysics, by doing benchmark tests. Furthermore, it is also shown that the ANSYS FLUENT is a suitable tool to solve geophysical and geological problems associated with groundwater flow in Western Anatolia.

DEĞENİLEN BELGELER

- Andersen C., Mathiese A., Nielsen L.H., Tiem P.V., Petersen H.I., Dien P.T. 2005. Distribution of source rocks and maturity modelling in the Northern Cenozoic Song Hong Basin (Gulf of Tonkin), Vietnam. *Journal of Petroleum Geology*, 28(2), 167-184.
- ANSYS. 2018. ANSYS Fluent Benchmark. Retrieved 21-06-2018, from <https://www.ansys.com/solutions/by-role/it-professionals/platform-support/benchmarks-overview/ansys-fluent-benchmarks>
- Borgia A., Pruess K., Kneafsey T.J., Oldenburg C.M., Pan L. 2012. Numerical simulation of salt precipitation in the fractures of a CO₂ enhanced geothermal system. *Geothermics*, 44, 13-22.
- Bourdet J., Pironon J., Levrèse G., Tritlla J. 2010. Petroleum accumulation and leakage in deeply buried carbonate reservoir, Nispero field (Mexico). *Marine and Petroleum Geology* 27, 126-142.
- Christoph G., Dermietzel J., 2000. The impact of a contaminated lignite seam on groundwater quality in the aquifer system of the Bitterfeld Region- Modeling of groundwater contamination. *Water, Air, and Soil Pollution* 122, 421-431.
- COMSOL Multiphysics® v. 5.4. www.comsol.com COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
- Diersch, H. G., FEFLOW – Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media, Springer, 2014, Berlin Heidelberg, XXXV, 996p., ISBN 978-3-642-38738-8, ISBN 978-3-642-38739-5 (eBook), doi:10.1007/978-3-642-38739-5.
- Eyles N., Meriano M. 2010. Road-impacted sediment and water in a Lake Ontario watershed and lagoon, City of Pickering, Ontario, Canada: An example of urban basin analysis. *Sedimentary Geology* 224, 15-28.
- Harbaugh, A. W. 2005. MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process. *Techniques and Methods* 6-A16. U.S. Geological Survey.
- Magri, F., Akar, T., Gemici, U., ve Pekdeger, A. 2010. Deep geothermal groundwater flow in the seferihisar-balcova area, turkey: results from transient numerical simulations of coupled fluid flow and heat transport processes. *Geofluids*, 10(3), 388-405. doi: 10.1111/j.1468-8123.2009.00267.x
- Magri, F., Akar, T., Gemici, U., ve Pekdeger, A. 2012. Numerical investigations of fault-induced seawater circulation in the seferihisar-balçova geothermal system, western Turkey. *Hydrogeology Journal*, 20(1), 103-118. doi: 10.1007/s10040-011-0797-z
- McKenna, J. R., ve Blackwell, D. D. 2004. Numerical modeling of transient basin and range extensional geothermal systems. *Geothermics*, 33(4), 457-476. doi:10.1016/j.geothermics.2003.10.001
- Moridis G.J. 2002. Numerical Studies of Gas Production From Methane Hydrates. *Society of Petroleum Engineers* 75691.
- Oldenburg C.M. ve Pruess K. 1998. Layered Thermohaline Convection in Hypersaline Geothermal Systems. *Transport in Porous Media* 33,29-63.
- Prechelt, L. 1994. A set of Neural Network Benchmark Problems and Benchmarking Rules. Technical Report 21/94. University of Karlsruhe.

Pruess, K., Oldenburg, C., Moridis, G. 1999. TOUGH2 User's Guide, Version 2.0. Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory University of California, Berkeley, California

Sarkar, S., Toksöz, M. N. ve Burns, D. R. 2002. Fluid flow simulation in fractured reservoirs. Massachusetts Institute of Technology. Earth Resources Laboratory.

Sarkar, S., Toksöz, M. N. ve Burns, D. R. 2004. Fluid flow modeling in fractures. Massachusetts Institute of Technology. Earth Resources Laboratory.

Taillefer, A., Guillou-Frottier, L., Soliva, R., Magri, F., Lopez, S., Courrioux, G., Millot, R., Ladouche, B., Le Goff, E. 2018. Topographic and Faults Control of Hydrothermal Circulation Along Dormant Faults in an Orogen. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 19,4972-4995.