



Jeotermal Sahalarda Fayların Eğiminin Ve Permeabilite Kontrastının Sıcaklık Ve Akış Dağılımına Etkisinin Sayısal Modellenmesi

Numerical Simulation Of The Effects Of The Fault Dip Angle And Permeability Contrast On Heat Transfer And Fluid Flow In Geothermal Sites

BAHAR GÜVEM ¹, DENİZ ORTA ¹, ASİN ÜZÜM ¹, DİĞA DÜŞÜNÜR-DOĞAN ^{1*}

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Geliş (received): 03 Ocak (January) 2023 Kabul (accepted): 23 Kasım (November) 2023

ÖZ

Jeotermal sahalarda fayların ve çatlak sistemlerinin varlığı, jeotermal akışkanın ve sıcaklığın dolaşımını önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle yoğun faylanmanın olduğu sahalarda bu etki daha fazla ön plana çıkmaktadır. Önceki çalışmalar, fayların varlığının ve fay ile ortam arasındaki permeabilite farkının, akışkan hareketi üzerine olan etkilerini tartışmıştır. Bu etkinin anlaşılabilmesi için seçilebilecek yöntemlerin başında, pek çok fiziksel ve hidrolik parametreyi kapsayan sayısal modelleme çalışmaları gelmektedir. Bu çalışmada, fayların eğimlerinin ve fay zonunda permeabilite kontrastının neden olduğu sıcaklık dağılımı ve yeraltısuyu akış dağılımı farklı 2 boyutlu test modelleri oluşturularak incelenmiştir. Sayısal modelleme için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programı olan ve sonlu hacimler prensibi ile çalışan ANSYS Fluent yazılımı kullanılmıştır. Test modellerinin sonuçları, fay açısı değişiminin, sıcaklık dağılımını ve hız vektörlerinin yönünü bir miktar etkilese de, esas belirleyici faktörün permeabilite kontrastı olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, yoğun faylanmanın olduğu jeotermal sahalarda, akışkanın olası yollarını kestirebilmek için bir ön çalışma olarak uygulanabilir ve geliştirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Fay, permeabilite, sıvı akışı, sayısal modelleme, ısı geçişi, jeotermal, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

ABSTRACT

The presence of faults/fractures in geothermal fields significantly affects fluid flow and temperature distribution. This effect is more dominant especially in areas with dense faulting. Previous studies discussed the effects of the faults and permeability contrast between faults and surrounding geological units on fluid flow. In order to investigate this phenomenon, numerical methods are unique since they include physical and hydraulic parameters of the medium. In this study, the temperature pattern and groundwater flow due to the dip angle of the fault and permeability contrast were explored by various 2-dimensional numerical test models. We used

finite volume-based Computational Fluid Dynamic (CFD) Software, ANSYS Fluent, for numerical modeling. The results of the numerical simulations indicate that, although the dip angle of the fault can slightly modify the fluid vectors and temperature distribution, the main determining factor is the permeability contrast. This study can be used and expanded as a preliminary study to predict the possible fluid paths, in extensively faulted geothermal fields.

Keywords: Fault, permeability, fluid flow, numerical modeling, heat transfer, geothermal, Computational Fluid Dynamics (CFD)

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1228841>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: dusunur@itu.edu.tr

GİRİŞ

Faylar ve çatlak sistemleri, yeraltında oluşan ısı transferi ve akışkan hareketini kontrol edebilecek ve yönlendirebilecek bir öneme sahip jeolojik yapılardır (Gudmundsson, 2000; McKenna ve Blackwell, 2004; Simms ve Garven, 2004; Cherubini vd., 2013; Loreto vd., 2019). Faylar, akışkanlar için bariyer ve/veya hidrolik kanal olarak davranabilirler (Yang vd., 1998; Sarkar vd., 2002; Yang vd., 2004; Magri vd., 2010). Bu sebeple yeraltındaki sıcaklık ve yeraltı suyu akışı hareketlerinin anlaşılabilmesi için fayların konumlarının ve davranışlarının bilinmesi önemlidir. Literatürde, fayların akışkan hareketi ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkilerinin araştırıldığı birçok jeofizik çalışma bulunmaktadır (Üner vd., 2019; Başokur vd., 2022). Bunların yanı sıra, son dönemlerde farklı sayısal yöntemlere dayanan modelleme çalışmaları da bulunmaktadır (örn: Magri vd., 2010; Taillefer vd., 2018; Loreto vd., 2019).

Sayısal modelleme çalışmaları, karmaşık yeraltı yapılarını, pek çok parametreyi dahil ederek temsil edebilme esnekliğine sahip yegane yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Sıvı akışı ve sıcaklık dağılımının belirlenmesi amacıyla üretilen tüm sayısal modellerde, çalışılan gözenekli ortamın geometrisi (örn: topoğrafya, fay zonlarının yerleri ve jeolojik

birimler) ve fiziksel/hidrolik özellikleri (örn: akışkanın yoğunluğu ve viskozitesi, jeolojik birimlerin permeabilite ve gözeneklilik değerleri) giriş parametreleri olarak kullanılmaktadır. Bu parametreler kullanılarak, farklı hidrojeofizik problemlere çözüm üreten çalışmalar literatürde yer almaktadır. Bu çalışmalardan bazıları, geçirgen fay zonlarının sistemdeki ısı taşınımını nasıl tetiklediğini ve ısı dağılımına nasıl katkıda bulunduğunu araştırmıştır (Sorey, 1971; Forster ve Smith, 1989; Fairley ve Hinds, 2004; Simms ve Garven, 2004). Forster ve Smith (1989), fayın permeabilitesinin belli bir eşik değeri aştığında dolaşım hücreleri oluşturduğunu ve bunların ısı transferinde, ısı iletiminden baskın ve belirleyici olduğunu öne sürmüştür. L'opez ve Smith (1995), topoğrafyanın yeraltı suyu dinamiği üzerine etkisini araştırırken, aynı zamanda izotropik ve homojen ortamda bulunan yüksek eğim açısına sahip fayların, bölgesel ısı akışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma, fay derinliği, fay uzunluğu ve su tablası geometrisi gibi parametrelerin fay zonunda, sıvı sirkülasyonu ve ısı transferini önemli ölçüde belirlediğini göstermiştir. Çalışmanın sonuçları, permeabilitenin, fay zonuunun

termal ve hidrojeolojik özelliklerini tahmin etmede kılavuz görevi görebileceğini desteklemektedir. Yang vd. (1998, 2004) ise, fayların varlığının, sıvı akış modelleri üzerinde, ortamın fiziksel özelliklerinden daha büyük bir etkiye sahip olduğunu ileri sürmüşlerdir ve gerçekleştirdikleri sayısal modeller ile fay permeabilitesi, genişliği ve derinliğinin, havzalardaki akışkan hareketi ve sıcaklık desenleri üzerinde önemli bir role sahip olduğunu göstermişlerdir. Benzer şekilde, Simms ve Garven'in (2004) çalışmasında, fayların konveksiyon hücrelerinin boyutunu belirleyerek ve yerlerini sınırlayarak, akışkanın hızını, termal konveksiyon hücrelerinin konumunu, şeklini belirlemede güçlü bir etkiye sahip oldukları gösterilmektedir. Cherubini vd. (2013) ise 3-boyutlu gözenekli ortam modelleri ile, fayların akışkan sistemi ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Gudmundsson'a (2000) göre, fayın yeraltı suyu için akış yolu olarak davranabilmesi iki temel faktöre bağlıdır. Bunlardan ilki, fay zonunun permeabilite değerinin civar kayalara göre yüksek olmasıdır. İkincisi ise fay zonunun eğiminin yeraltı suyunun doğal akış yönüne paralel olmasıdır. Fay zonu, yeraltı suyunun akış yönüne dik olarak konumlanmaktaysa, fay ve onu çevreleyen jeolojik birimler arasındaki permeabilite farkının, yeraltı suyunun akışı üzerindeki etkisinin düşük olduğu gözlenmiştir. Tüm bu çalışmalar, sadece fayın permeabilite özelliklerinin değil aynı zamanda eğiminin de belirleyici faktör olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, fay eğiminin, permeabilite ve gözeneklilik değerlerinin, sıcaklık dağılımı ve sıvı akışı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla, sonlu hacimler tabanlı HAD yazılımı Ansys Fluent kullanılarak test modelleri üretilmiştir. Bu çalışma kapsamında üretilen modeller, fay eğiminin sıcaklık ve akış dağılımını bir miktar değiştirdiğini

ancak dağılımın nihai olarak permeabilite kontrastı tarafından belirlendiğini göstermektedir.

YÖNTEM

Üner ve Düşünür Doğan (2019) tarafından, yerbilimlerinde kullanılabilirliği karşılaştırmalı değerlendirme (benchmarking) yöntemiyle araştırılarak uygun bulunan Ansys Fluent yazılımı, yerbilimlerine ait farklı problemlerin çözümlerinde kullanılmaktadır. Jeofizik ve jeolojik problemlerin çözümüne uygun olan Ansys Fluent yazılımı, çatlaklı rezervuarlardaki sıvı akışının analiz edilmesi (Sarkar vd., 2002), çatlaklı yapılardaki sıcaklık akışının incelenmesi ve hidrolik karakterizasyonun yapılması (Sarkar vd., 2004), sıcaklık ve akışkan akış modelleri oluşturularak hidrotermal akış yönünü etkileyen faktörlerin araştırılması (Düşünür Doğan ve Üner, 2019; Erçetin ve Düşünür Doğan, 2021), fay varlığının ısı ve akışkan akışına etkilerinin hidrojeofizik modeller oluşturularak incelenmesi (Üner vd., 2019; Üner ve Düşünür Doğan, 2021; Şen ve Düşünür Doğan, 2021), gaz hidratların çözünme davranışının ve yayılımının zamana bağlı araştırılması (Düşünür Doğan vd., 2022) gibi pek çok yerbilimlerine ait problemlerinin çözümü sırasında kullanılmıştır.

Bu çalışmada, fayların eğimi, permeabilite ve gözeneklilik değerlerinin, sıcaklık dağılımı ve sıvı akışı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla sonlu hacimler tabanlı HAD yazılımı ANSYS Fluent kullanılarak test modelleri üretilmiştir. Üretilen modeller zamana bağlı olarak çözdürülmüştür. Kütle, momentum ve enerji korunumu denklemlerini eşzamanlı olarak çözen bu yazılımda, eşitlik (1)' de gösterilen Darcy kanunu geçerlidir.

$$u = -\frac{K}{\mu}(\nabla P - \rho_w g) \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de; u akış hızı (m/s), K ortamın geçirimsizliği (m^2), μ akışkanın dinamik viskozitesi (kg/m.s), P ortamdaki basınç (Pa), ρ_w akışkanın yoğunluğu (kg/m^3), g yerçekimi ivmesi (m/s^2), ∇ laplace operatörüdür. Hesaplanan Darcy hızları, eşitlik (2)'de gösterilen süreklilik denklemini sağlamaktadır.

$$\nabla \cdot (\rho_w u) = 0 \quad (2)$$

Test modellerinde doğrusal (laminar) akış gösteren viskoz akışkan kullanılmış, eylemsizlik etkileri ihmal edilmiş ve akışkanın yoğunluğunun, eşitlik (3)'te gösterilen Boussinesq denklemine göre sıcaklık ile ilişkili olarak değişmekte olduğu kabul edilmiştir.

$$\rho_w = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (3)$$

Eşitlik (3)'te; ρ_0 akışkanın T_0 sıcaklığındaki yoğunluğu (kg/m^3), β ısıl genleşme katsayısıdır ($1/K$). Enerjinin korunumu denklemi, eşitlik (4)'te verildiği gibidir.

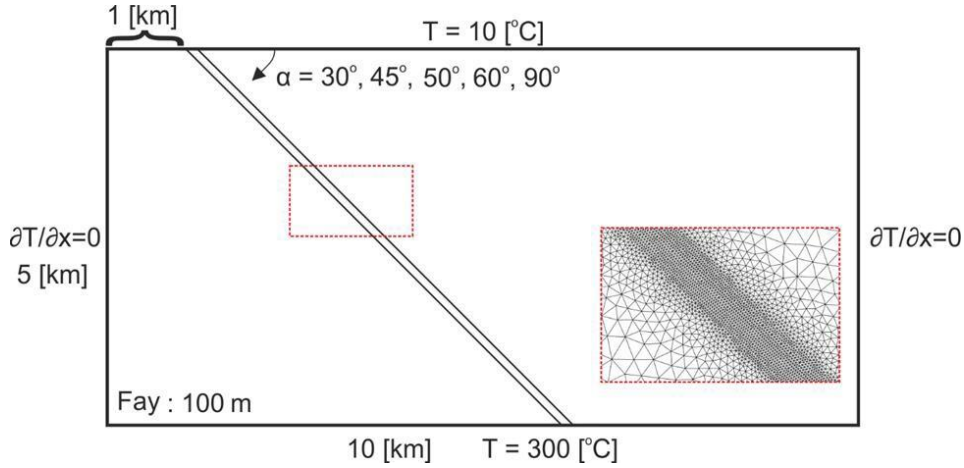
$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (u \rho_w c_p T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (4)$$

Eşitlik (4)'te; c_p gözenekli ortamın ısı kapasitesi (J/kg.K), λ doymuş gözenekli ortamın ısı iletkenlik kat sayısıdır (W/m.K).

Fayların eğimlerinin, civar kayalıklara göre bağlı permeabilite ve gözeneklilik değerlerinin, yeraltı suyu akışı ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkilerinin gözlemlenebilmesi için, ilk aşamada farklı eğimlere sahip faylar içeren 5 farklı model geometrisi oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra, fayların varlığının sisteme etkisinin kıyaslanabilmesi için model geometrisi diğerleri ile birebir aynı olan ancak "fay içermeyen" bir test model oluşturulmuştur. Şekil 1'de üretilen model geometrileri özetlenmektedir. Model geometrileri oluşturulduktan sonra, sistemin ayrıklaştırılması (meshing) için üçgen ağ elemanları kullanılmıştır (Şekil 1 iç şekil). Bu modeller, ANSYS Design Modeler programı kullanılarak oluşturulmuştur. Kullanılan üçgen

ağ hücreleri, fayların olduğu alanlarda daha küçük, faylardan uzaklaştıkça ise daha geniş olarak seçilmiştir. Çözümün stabilitesini sağlamak için optimum ağ geometrisi oluşturulmuştur.

Şekil 1'de gösterilen model kutusu 10 km genişliğe, 5 km derinliğe sahiptir ve jeolojik birimi iki ana gövdeye ayıran bir faydan oluşur. Tüm sayısal modellerde, fay kalınlığı 50 metre olarak kabul edilmiştir ve farklı açılarla dalım yapan fay, model kutusunun sol üst köşesine 1 km mesafede yer almaktadır. Modelin yan duvarları, ısı ve madde geçişine izin verilmeyen, yalıtımlı duvarlardır. Alt ve üst duvarlar, izotermal dengededir, yani sıcaklık sabittir. Üst duvarın sıcaklık değeri $10^\circ C$ ve üst duvara uygulanan basınç 1 atmosferik basınca eşittir; alt duvarın sıcaklık değeri ise $300^\circ C$ olarak sabitlenmiştir. Tüm modellerde, model kutusu boyunca derinlere doğru, sıcaklık gradyanının doğrusal değiştiği kabul edilmiştir. Sabit sıcaklık sınır koşulu yerine ısı akısına bağlı sınır koşulu konulduğunda da niteliksel olarak farklı bir sonuç alınmamaktadır (Magri vd., 2010). Modeller tamamen suya doygundur ve üst duvardan akışkan girişine izin verilmemektedir. Zamana bağlı olarak çözülen modellerden çoğu belirli bir süre sonra kararlı hale geçmiş, bir kısmı da kararlı hale geçmemiştir. Kararlı hale geçmeyen modeller kıyaslanabilmek için eşit sürte boyunca oluşturulmuş ve sonuçları bu şekilde paylaşılmıştır. Fayların permeabilite değerlerinin çevre sedimanlardan daha yüksek olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Daha önce jeotermal sahalarda yapılan çalışmalar fayın permeabilite değerinin civar kayalıklardan daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır (örn: Randolph ve Johnson, 1989; Smith vd., 1990; Scholz, 1990; Caine vd., 1993; Antonellini ve Aydın, 1994; Forster vd., 1994; Simms ve Garven, 2004; Şen ve Düşünür Doğan, 2021). Sıvının sedimanlardan çok fay içinde hareket edeceği ve dolayısıyla ısı



Şekil 1. Çalışma kapsamında kullanılan, modellere ait geometrik bilgiler. Şekil içindeki kırmızı kesikli çizgilerle işaretlenmiş dikdörtgen alan yakınlaştırılmış ağ geometrisi bilgisini içermektedir.

Figure 1. Model geometry for numerical calculations. The rectangular area with red dashed lines (inset figure) contains the zoomed mesh geometry information.

transferinin fay ve fay çevresinde gerçekleşeceği öngörülmüştür. Bu nedenle ağ geometrisi oluşturulurken fay ve yakın çevresidaha küçük ağ elemanları kullanılarak ayrılaştırılmıştır (Şekil 1).

Fay zonundan uzaklaştıkça ağ elemanlarının boyutu büyümektedir. Bu sayede aynı zamanda sayısal çözümün stabilitesi ve hızı da optimumda sağlanmıştır. Modellere ait düğüm noktası ve üçgen eleman (hücre) sayıları Tablo 1'de verilmiştir.

Model geometrilerine sınır (sınır sıcaklık ve basınç koşulları) ve hücre koşulları (permeabilite, viskozite, vb.) uygulanarak farklı test modelleri üretilmiştir. Sıvı akışı ve sıcaklık dağılımı hesaplamalarında kullanılan ilgili parametreler Tablo 2'de gösterildiği gibi tanımlanmıştır.

Tablo 1. Modellerin düğüm noktası ve üçgen eleman (hücre) sayıları.

Table 1. Number of nodes and triangular elements (cells) of the models.

Fay Eğimi (°)	Düğüm Noktası Sayısı	Üçgen Eleman Sayısı
30	22522	20560
45	17506	16064
50	16408	15057
60	14544	13330
90	13128	12032

Tablo 2. Akışkan ve ısı akışı hesaplamalarında kullanılan parametreler daha önceki çalışmalardan derlenmiştir (Düşünür Doğan ve Üner, 2019).

Table 2. The parameters used in the fluid and heat flow calculations derived from previous studies (Düşünür Doğan and Üner, 2019).

Parametre	Değer
Isı Kapasitesi (C_p)(J/kg.K)	4200
Isıl İletkenlik Katsayısı (λ)(W/m.K)	User-defined thermal cond. (UDF)
Dinamik Viskozite (μ)(kg/m.s)	$5 \cdot 10^{-5}$
Isıl Genleşme Katsayısı (β)(1/K)	$2.07 \cdot 10^{-4}$
Akışkanın Yoğunluğu (kg/m ³)	1000
Yerçekimi İvmesi (m/s ²)	9.8

Modellerde, gözenekli ortamların termal dengede olduğu kabul edilmiştir. Yani katı malzeme ile malzemenin gözenekleri arasında sıcaklık farkı yoktur ve aralarında ısı alışverişi gerçekleşmemektedir. Fayın etkisinin en net biçimde ortaya konulabilmesi için yeraltı modeli oldukça basitleştirilmiştir. Modellerde fay ve fayı çevreleyen jeolojik birim (sediman) olmak üzere iki farklı katı ortam tanımlanmıştır. Bu ortamların fiziksel ve termal özelliklerinin kendi içinde sabit ve homojen dağılım gösterdiği kabul edilmiştir. Çalışma kapsamında sıcak su tipi (hot water type system) jeotermal alan temsil edilmek istenmiş ve bu nedenle örtü kaya sistemde tanımlanmamıştır. Daha gerçekçi ve kompleks modeller için ilerleyen aşamalarda örtü kaya ve akifer de modele dahil edilmelidir. Sediman ve fay ortamları için tanımlanan parametreler Tablo 3'te verilmektedir. Fay permeabilite ve gözeneklilik parametreleri, test modellerinde değişken olarak kullanılan parametrelerdir ve bu değerler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Ortam parametreleri önceki modelleme çalışmalarına benzer şekilde seçilmiştir (McKenna ve Blackwell, 2004; Düşünür Doğan ve Üner, 2019).

Table 3. Medium parameters derived similar to previous modeling studies.

Ortam	Permeabilite (kx/kz)(m ²)	Gözeneklilik (ϕ)(1)	Isıl İletkenlik Katsayısı (λ)(W/m.K)	Yoğunluk (ρ)(kg/m ³)	Isı Kapasitesi (C_p)(J/kg.K)
Sediman	$1 \cdot 10^{-15}/1 \cdot 10^{-15}$	$1 \cdot 10^{-15}/1 \cdot 10^{-15}$	1.25	2650	1000
Fay (Hasar Zonu)	Değişken	Değişken	1.25	2650	1000

TEST MODELLERİ

Bu çalışmada bir adet faysız ve 30 adet fay içeren test model üretilmiştir. İlk aşamada, faylı ve faysız modeller arasında kıyaslama yapabilmek için referans bir model olarak fay zonu içermeyen bir model tanımlanmıştır. Faysız modele tüm sistem için homojen bir permeabilite dağılımı atanmıştır ($k_x=k_z=1*10^{-15} \text{ m}^2$) (Şekil 2). Fay içeren modeller iki grup halinde üretilmiştir. Fay eğimi ve fay permeabilitesi bakımından karşılaştırmalı değerlendirme yapabilmek için 30° , 45° , 50° , 60° ve 90° eğime sahip modellerde, fay geçirimsizliğine 3 farklı değer atanmış, toplamda 15 test modeli oluşturulmuştur. Tüm modellerde faylar homojen ve izotropik kabul edilmiştir. Fay içerisindeki yatay ve düşey permeabilite değerleri birbirine eşittir. Ayrıca, tüm test gruplarında sedimanın yatay ve düşey permeabilite değerleri $1*10^{-15} \text{ m}^2$ olarak sabit tutulmuştur.

İlk grup modellerde, faya ait permeabilite değeri; Test A modellerinde $1*10^{-14} \text{ m}^2$, Test B modellerinde $5*10^{-14} \text{ m}^2$ ve Test C modellerinde $1*10^{-13} \text{ m}^2$ olarak atanmıştır. Test A, B ve C grubundaki modellerin tümünde fayın gözeneklilik değeri 0.1 olarak kabul edilmiştir (Tablo 4).

İkinci grup modellerde ise fayın değişen gözenekliliğinin etkilerinin anlaşılması hedeflenmiştir. Bu amaçla fay içi gözenekliliği 5 kat artırılmıştır. Bu kapsamda üretilen model sonuçları, gözeneklilik değişiminin, sıcaklık ve akış dağılımında önemli ölçüde değişikliğe yol açmadığını göstermektedir. Bu sebeple fay içi gözeneklilik değerine sahip modeller burada sunulmamıştır. Test modellerinde kullanılan parametreler Tablo 4'te listelenmektedir.

Tablo 4. Test modellerinde kullanılan fay eğimi, yatay (k_x) ve düşey (k_z) permeabilite, gözeneklilik değerleri.

Table 4. ault dip angle, horizontal (k_x) and vertical (k_z) permeabilities, porosity values used in the test models.

Modeller	Fay Eğimi ($^\circ$)	Fay Permeabilite (k_x/k_z)(m^2)	Fay Gözeneklilik (ϕ)(%)
Faysız Model	-	$1*10^{-15}/1*10^{-15}$	$1*10^{-1}$
Test A			
A-1	30	$1*10^{-14}/1*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
A-2	45	$1*10^{-14}/1*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
A-3	50	$1*10^{-14}/1*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
A-4	60	$1*10^{-14}/1*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
A-5	90	$1*10^{-14}/1*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
Test B			
B-1	30	$5*10^{-14}/5*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
B-2	45	$5*10^{-14}/5*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
B-3	50	$5*10^{-14}/5*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
B-4	60	$5*10^{-14}/5*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
B-5	90	$5*10^{-14}/5*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
Test C			
C-1	30	$1*10^{-13}/1*10^{-13}$	$1*10^{-1}$
C-2	45	$1*10^{-13}/1*10^{-13}$	$1*10^{-1}$
C-3	50	$1*10^{-13}/1*10^{-13}$	$1*10^{-1}$
C-4	60	$1*10^{-13}/1*10^{-13}$	$1*10^{-1}$
C-5	90	$1*10^{-13}/1*10^{-13}$	$1*10^{-1}$

Sunulan tüm test model sonuçlarında, hesaplatılan eş sıcaklık eğrilerinin üzerine, akışkan akış vektörlerinin yönleri ve hızları çizdirilmiştir. Şekil 2'de fay zonu içermeyen modelin sıcaklık-akış dağılımı görülmektedir. Modelin ağ yapısında, fayın ve yakın civarının daha sık ayrıklaştırılması (mesh) sebebiyle bu bölgelerde daha sık sayısal hesaplama yapılmaktadır ve bu bölgelerdeki hız vektörleri belirginleşmektedir. Bu görüntünün model için elde edilen sıcaklık ve akış desenine bir etkisi yoktur.

Modelde akışkan hızları en fazla $2.7 \cdot 10^{-9}$ m/s değerine ulaşmaktadır. Model kutusunun alt duvarında ısınan akışkan ($300 \text{ }^\circ\text{C}$), geçirimsiz yan duvarlar ile karşılaşana kadar yatay yönde hareketini sürdürmüştü, ardından sıcaklığın etkisi ile yükselerek model yüzeyine kadar ilerlemiştir (Şekil 2). Yüzeyde soğuyan akışkan, artan yoğunluğunun etkisi ile modelin merkezinden aşağı yönlü harekete başlamıştır. Bu durum iki tane belirgin ve ters yönlü sirkülasyon hücresi oluşturmuştur. Daha önceki çalışmalar da benzer sirkülasyon hücrelerinin varlığını bildirmiştir (örn: Simms ve Garven, 2004; Parisio vd., 2019). Bu hücreler sıcaklık dağılımını şekillendirmiştir. Sağdaki hücre saat yönünün tersine doğru akış oluştururken, soldaki hücre ise saat yönünde akışa neden olmaktadır. Bu sayede modelin ortası soğurken, modelin köşelerinde yukarı yönlü akış sebebiyle sıcaklık yüzeye doğru taşınmaktadır.

Test A grubuna ait tüm modellerin sonuçları Şekil 3'te verilmektedir. Modelleme sonuçlarına göre Test A grubunun tümünde hesaplamalar yakınsamaktadır. Modellerde zamana bağlı olarak bir değişim izlenmemektedir (steady-state, kararlı durum).

SAYISAL MODELLER

Bunun en önemli sebebi, sistemin ortalama permeabilite değerinin düşük olmasıdır. Test A modelleri için maksimum akışkan hızlarının ($1.7 \cdot 10^{-8}$ m/s), herhangi bir fay içermeyen sisteme kıyasla ($2.7 \cdot 10^{-9}$ m/s) farklı eğimli modeller için 2-6 kat arttığı gözlenmiştir. Bunun esas nedeni, yüksek permeabiliteye sahip fayın, sistemin toplam Rayleigh sayısını artırıyor olmasıdır. Akışkan vektörlerinin yönü detaylı incelendiğinde, 30° (A-1) ve 60° 'lik (A-4) fay eğimi içeren modellerde, fay içerisindeki akışkanın yer içinde belirli bir derinliğe kadar (referans derinlik) akışkanı aşağı yönde taşıdığı görülmektedir. Referans derinliğin altında ise, fay boyunca ısınan akışkan yukarı yönlü taşınmaktadır. Örneğin, 30° fay eğimi içeren modelde soğuk akışkan yerin ~ 750 m derinliklerine kadar fay tarafından taşınmaktadır (yatay yönde 2.5 km). Bu referans derinliğin altında ise fay, model tabanından ısınan akışkanı yukarı doğru taşımaktadır. Referans derinlik değeri, 60° 'lik fay eğimi için 2.5 km (yatayda 2.5 km) olarak ölçülmüştür. Fay eğimi değiştikçe, buna bağlı olarak referans derinlik değerleri de değişmektedir. Bu bize fayın eğiminin özellikle yeryüzünden süzülen akışkanın inebileceği maksimum derinliği baskın bir şekilde denetleyebileceğini göstermektedir. 45° eğime sahip olan fayda akışkan modelin en derin noktasından yüzeye kadar yukarı yönde taşınırken, 50° ve 90° 'lik fay eğimi durumunda ise akışkan modelin en derin noktasına kadar aşağı yönlü taşınmaktadır. Sistemde akışkanın davranışını belirleyen ana kuvvetler, viskoz ve yüzdürücü (buoyancy forces) kuvvetlerdir. Sıcaklık ve permeabilite dağılımına bağlı olarak, modelin farklı bölgelerinde, bu iki kuvvetin bileşkesi

akışkanın yönünü denetlemektedir. Bu nedenle yüzdürücü kuvvetlerin baskın geldiği alanlarda akışkan yukarı yönlü hareket etmekteyken, gravite kuvvetler baskın olduğunda akışkan aşağı yönlü ilerlemektedir. Görüldüğü üzere (Tablo 4), test grupları arasında, fay ve civar jeolojik birimin permeabilite kontrastının en düşük olduğu modeller, A grubu modelleridir (permeabilite kontrastı = 10). Geçirimsizlik kontrastının düşük olması, civar kayalarda gerçekleşen doğal sirkülasyonun, fay içerisinde ilerleyen akışkanın akış yönünü etkileyebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum en açık şekilde, fay açısı 60° olan Model A-4'de gözlemlenmektedir. Bu modelde, fayın sığ kesimlerinde akışkan aşağı, derin kesimlerinde ise yukarı yönlü taşınmaktadır. Model kutusunun sol tarafında oluşan büyük sirkülasyon hücresi, fayın tümünü içine almaktadır ve fay içerisindeki akışkan yönleriyle örtüşen yönde dolaşım yapmaktadır. Sirkülasyon hücreleri, fayı aşağı yönlü beslediğinde akışkan da aşağı yönlü, yukarı yönlü beslediğinde akışkan da yukarı yönlü hareket etmektedir. Bu modelde gözlemlenen akışkan hareketi, civar kayalar ile fay arasındaki permeabilite kontrastının, akışkanın akış yönü üzerindeki önemini ortaya koymaktadır.

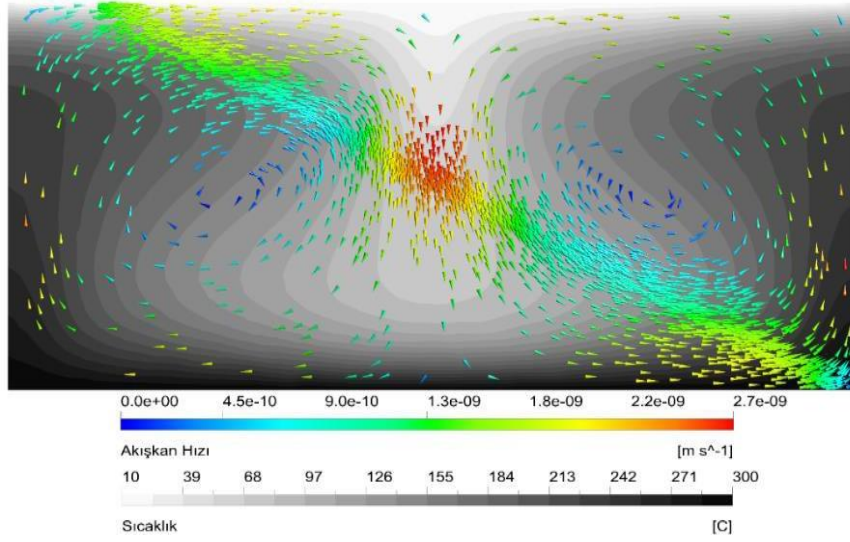
Şekil 4'te (convergence) Test B'ye ait sonuçlar sunulmuştur. A grubu modellerin aksine tüm B grubu modelleri kararlı duruma ulaşmamaktadır ve zamana bağlı değişim izlenmektedir. Bu model grubunda, ilk model grubundan farklı olarak fayın permeabilite değeri $5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ seçilmiştir. Test B grubunda maksimum hızlar, tüm fay eğimleri için artmaktadır. Modellerdeki akışkan vektörlerinin yönü incelendiğinde, 30°'lik fay eğimi (B-1) durumu hariç, sıcak akışkanın, modelin tabanından yüzeye doğru yukarı yönlü taşındığı gözlemlenmektedir. 30°'lik fay eğimi durumunda ise Test A'ya benzer şekilde belirli referans derinliğine kadar (B-1 modeli için ~ 3.6

km derinlikte ve yatayda 7.3 km) soğuk akışkan aşağı yönde taşındığı izlenmiştir. Test A modellerine göre geçirimsizlik kontrastının 50 kat olduğu bu modellerde, çevre kayalarda görülen sirkülasyonun fay içindeki akış yönünü Test A modellerindeki kadar büyük ölçüde etkileyememektedir.

Şekil 5'te Test C'ye ait sonuçlar sunulmuştur. Bu gruptaki test modelleri kararlı halde değildir ve zamana bağlı çözülmüşlerdir. Bu grupta, fayın permeabilite değeri $1 \cdot 10^{-13}$ olarak seçilmiştir ve bu değer Test A ve Test B'ye kıyasla en yüksek permeabilite değeridir. Diğer test modellerine göre fayın permeabilite değerinin maksimum olmasından dolayı, en yüksek fay içi hız değerleri bu test modelinde elde edilmiştir. Akışkan vektörlerinin yönü incelendiğinde 30°, 60° ve 90°'lik fay eğimine sahip modellerde, ısınan akışkanın modelin derin bölgelerinden yukarı yönde taşındığı izlenmektedir. 45° ve 50°'lik fay eğimine sahip modellerde ise akışkan, modelin en derin noktasına doğru aşağı yönde taşınmaktadır. Modelin geneline bakıldığında yüksek permeabilite kontrastı, akışkan hareketinin baskın şekilde fay tarafından belirlenmesine sebep olmaktadır.

Tüm modellerin sıcaklık dağılımına bakıldığında, bu dağılımı belirleyen en önemli değişkenin akışkanın hızı ve akışkan vektörlerinin yönü olduğu açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Test modellerindeki en doğru sıcaklık deseni çıkarımları faya yakın bölgelerde yapılabilir. Faydan uzak bölgelerdeki sıcaklık deseni başlangıç modeline oldukça bağımlıdır.

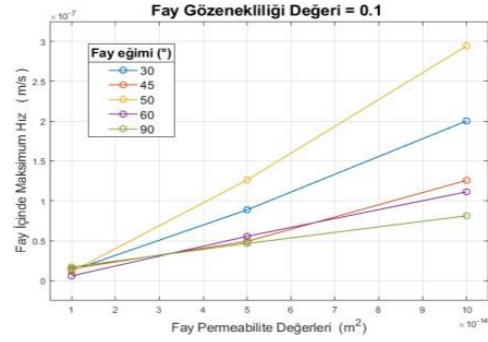
Yukarıda tartışıldığı gibi, ortaya çıkan sıcaklık deseni her ne kadar fayın eğimi kaynaklı oluşan hız vektörlerinin yönünden etkilense de aynı zamanda modelde değişen fay uzunluğu da bir parametre olarak değerlendirilmelidir. Fay uzunluğu arttıkça, sistemin ortalama permeabilite değeri artmaktadır ve bu da sistemin Rayleigh sayısını arttırmaktadır.



Şekil 2. Fay zonu içermeyen referans modeli.

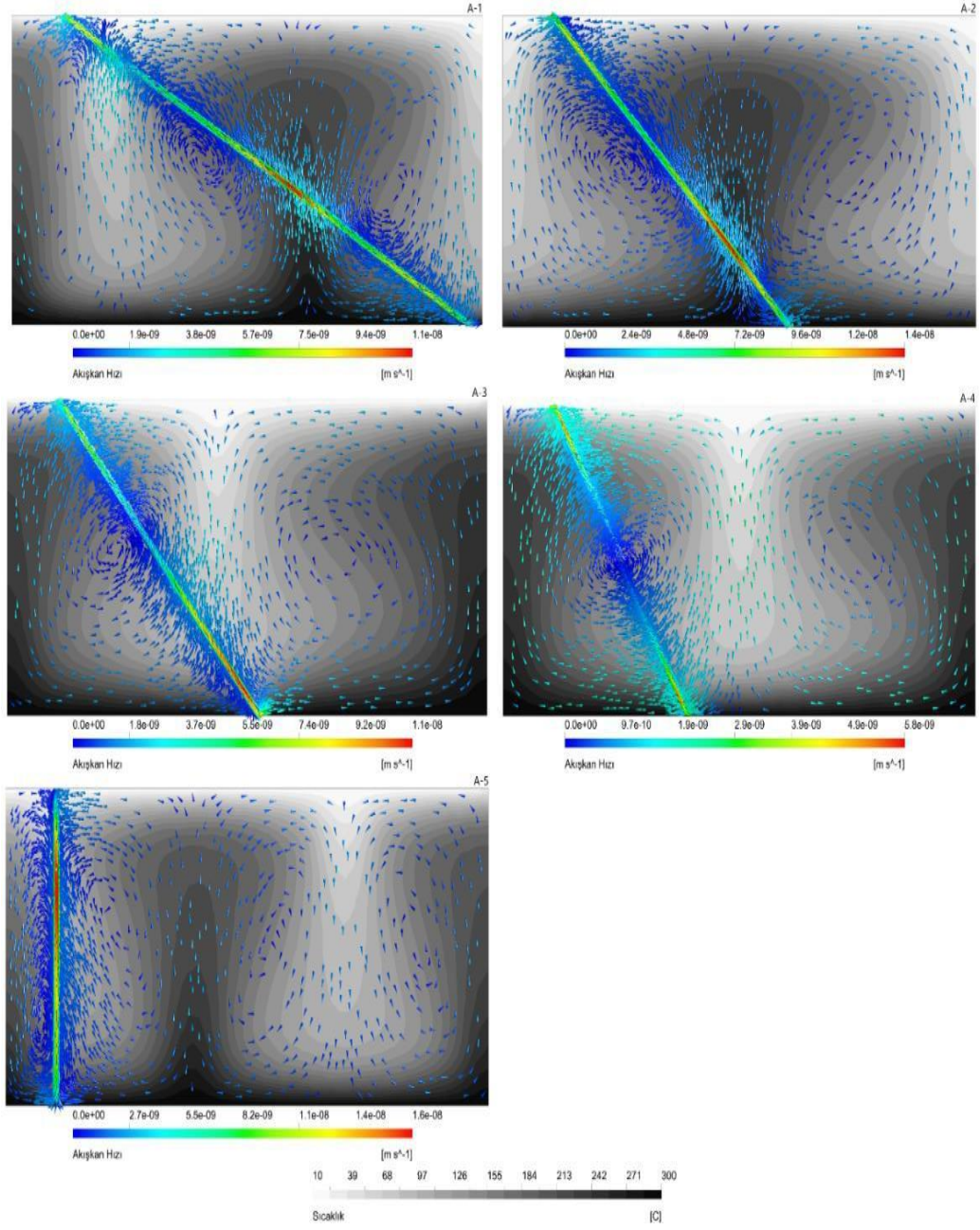
Figure 2. Reference model without fault zone.

Modeller arasındaki fay uzunluğu farkı çok fazla olmasa da, sonuçlar üzerindeki olası etkisini göz önünde bulundurmak gerekebilir. Şekil 6, 6 fay içinde ölçülen en yüksek hızların fay permeabilitesine bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir. Farklı eğime sahip fayların bulunduğu modellerin tamamında, fayın permeabilite değeri arttıkça, fay içinde ölçülen en yüksek hız değerlerinin de arttığı görülmektedir. En düşük permeabiliteye sahip modellerde (Test A), fayın açısına bağlı olmaksızın, sistemde oluşan en büyük hız değerleri tüm modeller için birbirine oldukça yakındır (Şekil 6). Fayın permeabilitesi arttıkça, modellerde hesaplanan hız değerleri giderek neredeyse lineer olarak artmaktadır ancak bu artış fay açısından bağımsız olarak izlenmektedir (Şekil 6).



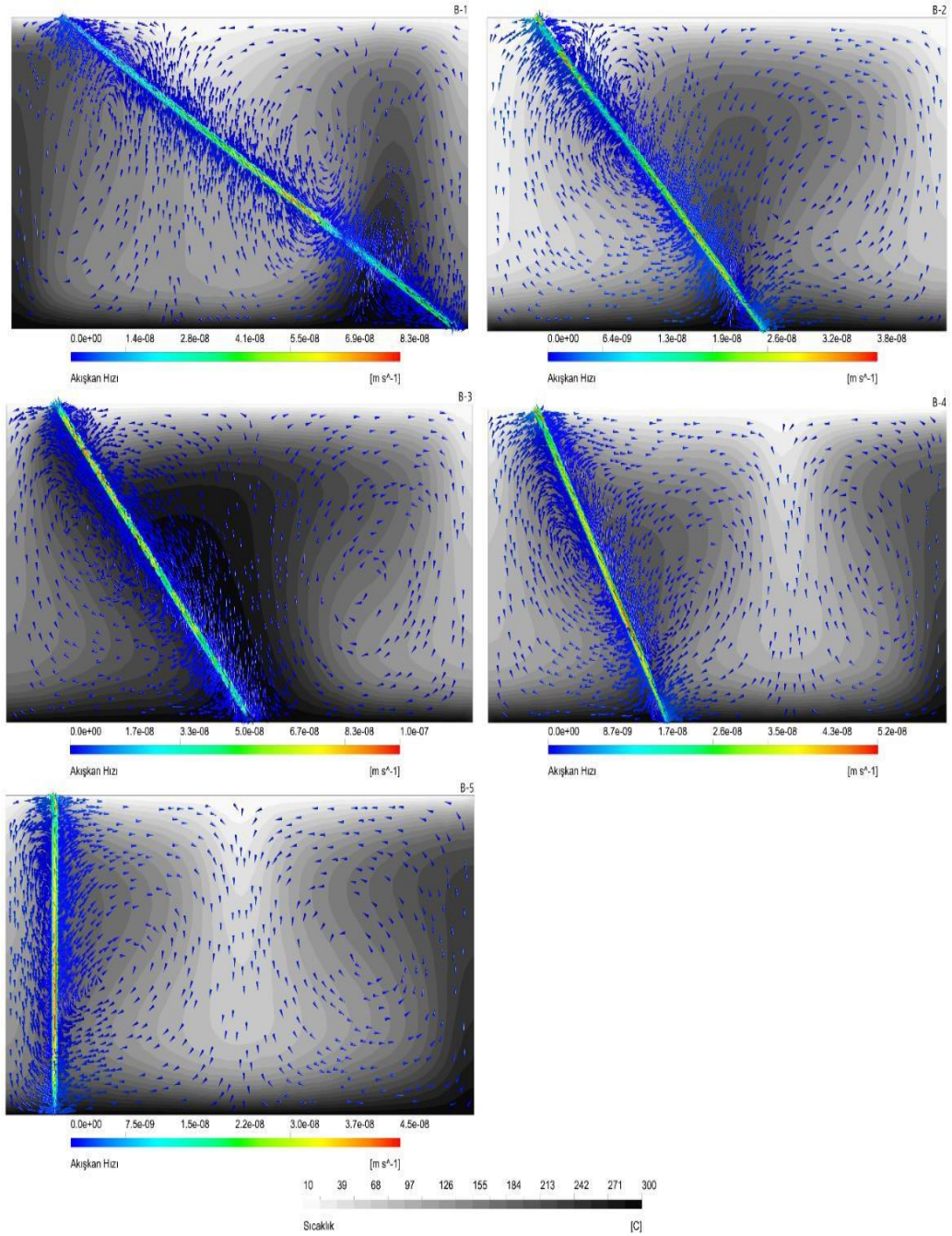
Şekil 6. Farklı fay eğimi değerlerindeki, farklı permeabilite değerlerine karşılık gelen fay içindeki maksimum hız grafiği. Grafikte, fay gözenekliliği 0.1 olan modellerin sonuçları kullanılmıştır.

Figure 6. Maximum velocity in the fault corresponding to different permeability values at different fault dip angle values. The results of models with a fault porosity of 0.1 are used in the plots.



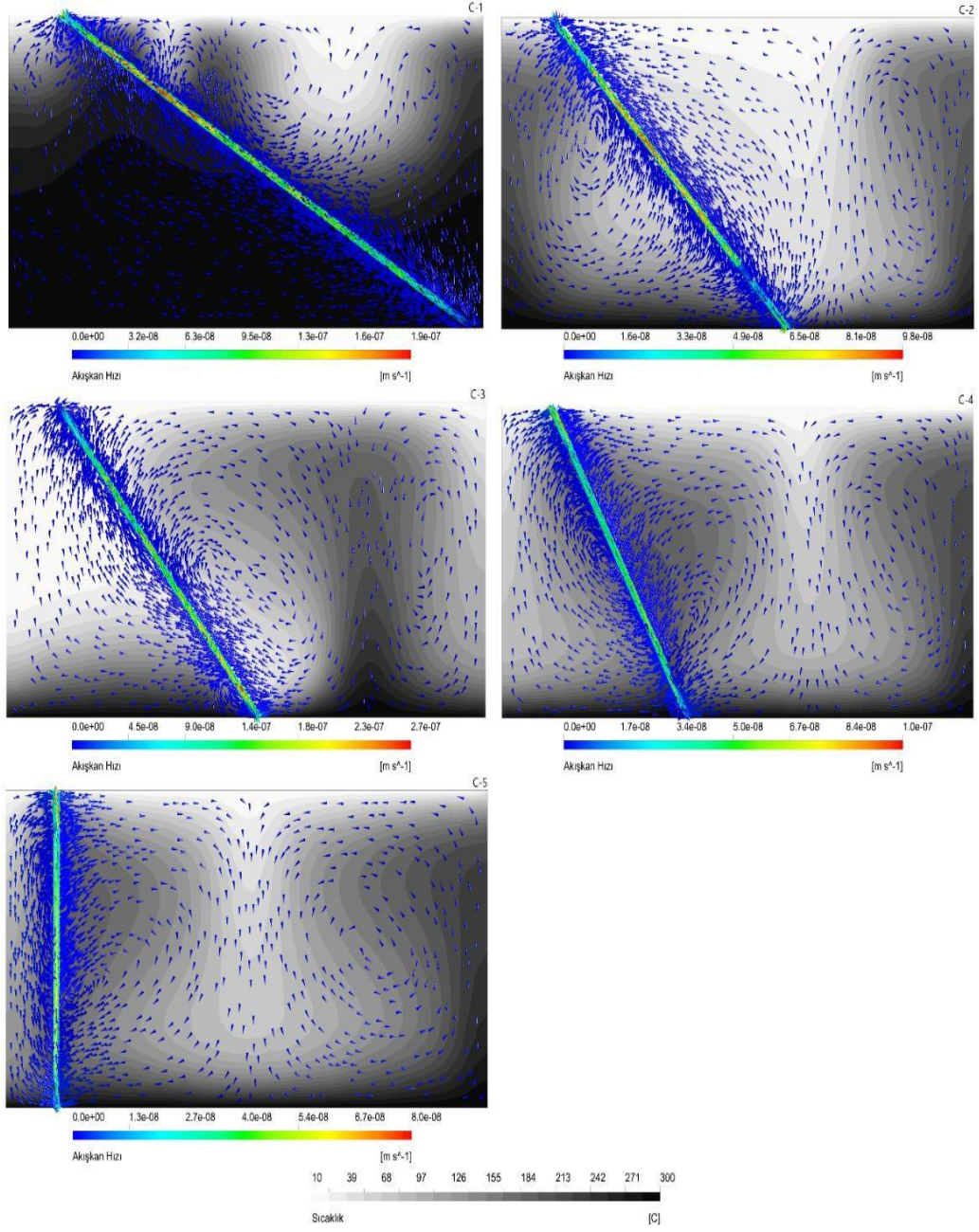
Şekil 3. Test A modelleri. Sırasıyla 30°, 45°, 50°, 60°, 90° fay eğimlerinde $1 \cdot 10^{-14}$ fay permeabilite değerlerinde üretilen modeller.

Figure 3. Models of Test A. Models which fault dip angles are 30°, 45°, 50°, 60°, 90°, produced with fault permeability values of $1 \cdot 10^{-14}$.



Şekil 4. Test B modelleri. Sırasıyla 30°, 45°, 50°, 60°, 90° fay eğimlerinde $5 \cdot 10^{-14}$ fay permeabilite değerlerinde üretilen modeller.

Figure 4. Models of Test B. Models which fault dip angles are 30°, 45°, 50°, 60°, 90°, produced with fault permeability values of $5 \cdot 10^{-14}$.



Şekil 5. Test C modelleri. Sırasıyla 30°, 45°, 50°, 60°, 90° fay eğimlerinde $1 \cdot 10^{-13}$ fay permeabilite değerlerinde üretilen modeller.

Figure 5. Models of Test C. Models which fault dip angles are 30°, 45°, 50°, 60°, 90°, produced with fault permeability values of $1 \cdot 10^{-13}$.

SONUÇLAR

Özellikle yoğun faylanmaların bulunduğu jeotermal sahalar modellenirken, bölgedeki fayların mekansal dağılımının yanı sıra, eğim ve permeabilite değerleri de mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışma genişletilerek ve araştırılmak istenilen bölgenin jeolojisine uyarlanarak, farklı sahalar için de kullanılabilir. Bu araştırmanın, yerbilimleri kapsamında yapılacak sayısal sıcaklık ve akış modellemesi çalışmalarına katkı sağlaması muhtemeldir. Bu ve benzeri modelleme çalışmaları özellikle jeotermal sahalarda üretim başlamadan önce olası kuyu yerlerinin belirlenmesinde öncü yöntemler olarak geliştirilebilir ve değerlendirilebilir. Çalışma kapsamında üretilen tüm sayısal modellere bakıldığında aşağıda özetlenen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Fayın eğimi, sıcaklık dağılımını etkilediği, esas belirleyici faktör, fay ve civar kayaç arasındaki permeabilite kontrastıdır.
- Permeabilite değeri arttıkça, modeldeki en yüksek hız değerleri de neredeyse lineer olarak artmaktadır.
- Permeabilite kontrastı arttıkça, fay içerisindeki yüksek hızlar baskın hale gelmekte ve modelin diğer kısımlarından ayrılmaktadır. Aynı zamanda kontrast azaldıkça, yatay yönde hızların arttığı ve fay içindeki akışkanın civar kayaçları daha fazla beslediği görülmektedir. Diğer bir deyişle yüksek permeabiliteye sahip faylar, sistemdeki akışkanın hareketini baskın bir biçimde etkiler ve çevre kayaçlardaki akışkan hızını azaltır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü desteği ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanmış olduğumuz modellerin, ilk oluşturulmasında

emeği olan Rahmetli Yük. Müh. Serkan Üner'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Antonellini, M., & Aydin, A., 1994. Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: Petrophysical properties: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 78, p. 355–377. DOI: 10.1306/bdff90aa-1718-11d7-8645000102c1865d
- Başokur, A. T., Koçyiğit, A., Hacıoğlu, Ö., Arslan, H. İ., & Meqbel, N., 2022. Magnetotelluric imaging of the shallow-seated magma reservoir beneath the Karadağ stratovolcano, Central Anatolia, Turkey. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 427, 107567. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2022.107567
- Caine, J. S., Forster, C. B., and Evans, J. P., 1993. A classification scheme for permeability structures in fault zones. Eos (Transactions, American Geophysical Union), v. 74, p. 677.
- Cherubini, Y., Cacace, M., Blöcher, G., & Scheck-Wenderoth, M., 2013. Impact of single inclined faults on the fluid flow and heat transport: Results from 3-D finite element simulations. Environmental Earth Sciences, 70(8), 3603–3618. DOI: 10.1007/s12665-012-2212-z
- Düşünür Dogan, D. , Ocakoğlu Gökaşan, N., Tinivella, U. ,Giustiniani, M, Turkdogan, S., Arık, S. & Altan, Z., 2022. Modeling the time-dependent dissolution of Gas Hydrates in the South Shetland Islands, Antarctica.
- Düşünür Doğan, D., & Üner, S., 2019. Numerical simulation of groundwater flow

- and temperature distribution in Aegean Coast of Turkey. *Journal of Earth System Science*, 128(6), 1-12. DOI: 10.1007/s12040-019-1183-9
- Erçetin, E., & Doğan, D., 2021. Deniz Tabanı Batımetrisinin Hidrotermal Dolaşım Üzerindeki Etkisinin Araştırılması: Lucky Strike Örneği . *İstanbul Yerbilimleri Dergisi* , 2021 (1) , 1-10.
- Fairley, J. P., & Hinds, J. J., 2004. Rapid transport pathways for geothermal fluids in an active great basin fault zone. *Geology*, 32(9), 825. DOI: 10.1130/G20617.1
- Forster, C. B., Goddard, J. V., & Evans, J. P., 1994. Permeability structure of a thrust fault, in *The mechanical involvement of fluids in faulting: U.S. Geological Survey Open-File Report 94-228*, p. 216–223
- Forster, C., & Smith L., 1989. The influence of groundwater flow on thermal regimes in mountainous terrain, a model study. *Journal of Geophysical Research*, 94, 9439–51. DOI: 10.1029/JB094iB07p09439
- Gudmundsson, A., 2000. Active fault zones and groundwater flow. *Geophysical Research Letters*, 27(18), 2993–2996. DOI: 10.1029/1999GL011266
- López, D. L., & Smith, L., 1995. Fluid flow in fault zones: Analysis of the interplay of convective circulation and topographically driven groundwater flow. *Water Resources Research*, 31(6), 1489–1503. DOI: 10.1029/95WR00422
- Loreto, M. F., Düşünür-Doğan, D., Üner, S., İşcan-Alp, Y., Ocakoğlu, N., Cocchi, L., Muccini, F., Giordano, P., & Ligi, M., 2019. Fault-controlled deep hydrothermal flow in a back-arc tectonic setting, Se Tyrrhenian sea. *Scientific Reports*, 9(1). DOI: 10.1038/s41598-019-53696-z
- Magri, F., Akar, T., Gemici, U., & Pekdeğer, A., 2010. Deep geothermal groundwater flow in the Seferihisar-Balçova 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
- McKenna, J. R., & 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
- McKibbin, R., 1986. Heat transfer in a vertically-layered porous medium heated from below. *Transport in Porous Media*, 1(4). DOI: 10.1007/BF00208043
- Moreno, D., Lopez-Sanchez, J., Blessent, D., & Raymond, J., 2018. Fault characterization and heat-transfer modeling to the northwest of Nevado del Ruiz Volcano. *Journal of South American Earth Sciences*, 88, 50–63. DOI: 10.1016/j.jsames.2018.08.008
- Parisio, F., Vilarrasa, V., Wang, W., Kolditz, O., & Nagel, T., 2019. The risks of long-term re-injection in supercritical geothermal systems. *Nature communications*, 10(1), 4391. DOI: 10.1038/s41467-019-12146-0
- Randolph, L., & Johnson, B., 1989. Influence of faults of moderate displacement on groundwater flow in the Hickory sandstone aquifer in central Texas. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 21, p. 242. DOI: 10.1306/703ca257-1707-11d7-8645000102c1865d
- Sarkar, S., Toksöz, M. N. & Burns, D. R., 2002. Fluid flow simulation in fractured reservoirs. Massachusetts Institute of Technology. Earth Resources Laboratory. DOI:
- Sarkar, S., Toksöz, M. N. & Burns, D. R., 2004. Fluid flow modeling in fractures.

- Massachusetts Institute of Technology. Earth Resources Laboratory.
- Scholz, C. H., 1990. The mechanics of earthquakes and faulting: Cambridge, Cambridge University Press, 439 s.
- Simms, M. A., & Garven, G., 2004. Thermal convection in faulted extensional sedimentary basins: Theoretical results from finite-element modeling. *Geofluids*, 4(2), 109–130. DOI: 10.1111/j.1468-8115.2004.00069.x
- Smith, L., Forster, C. B., & Evans, J. P., 1990. Interaction between fault zones, fluid flow, and heat transfer at the basin scale. *Hydrogeology of permeability environments*, International Association of Hydrogeologists, v. 2, p. 41–67.
- Sorey M., 1971. Measurement of vertical groundwater velocity from temperature profiles in wells. *Water Resources Research*, 7, 963–70. DOI: 10.1029/WR007i004p00963
- Şen, E., & Doğan, D., 2021. Finite volume modeling of bathymetry and fault-controlled fluid circulation in the Sea of Marmara. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30(5), 628-638. DOI : 10.3906/yer-2101-20
- 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*. DOI: 10.1029/2018GC007965
- Üner, S., & Dogan, D. D., 2021. An integrated geophysical, hydrological, thermal approach to finite volume modelling of fault-controlled geothermal fluid circulation in Gediz Graben. *Geothermics*, 90, 102004. DOI: 10.1016/j.geothermics.2020.102004
- Üner, S., Ağaçoğuz, G. Ö., & Düşünür Doğan, D., 2019. Hydrogeophysical modelling of Hisarcik (Kütahya) geothermal field, western Turkey. *Geophysical Prospecting*, 67(8), 2176-2195. DOI: doi.org/10.1111/1365-2478.12826
- Yang, J., Large, R. R., & Bull, S. W., 2004. Factors controlling free thermal convection in faults in sedimentary basins: Implications for the formation of zinc-lead mineral deposits. *Geofluids*, 4(3), 237–247. DOI: 10.1111/j.1468-8123.2004.00084.x
- Yang, J., Latychev, K., & Edwards, R. N., 1998. Numerical computation of hydrothermal fluid circulation in Fractured Earth structures. *Geophysical Journal International*, 135(2), 627–649. DOI: 10.1046/j.1365-246X.1998.00669.x