

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İZMİR, GÜLBAHÇE VE SIĞACIK KÖRFEZLERİ'NDE SICAKLIK VE
AKIŞKAN HIZI MODELLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Duygu YAĞCI

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeofizik Mühendisliği Programı

OCAK, 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İZMİR, GÜLBAHÇE VE SIĞACIK KÖRFEZLERİ'NDE SICAKLIK VE
AKIŞKAN HIZI MODELLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Duygu YAĞCI
(505111402)**

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeofizik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Doğa DÜŞÜNÜR DOĞAN

OCAK, 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 505111402 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Duygu YAĞCI**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**İZMİR, GÜLBAHÇE VE SİĞACIK KÖRFEZLERİ'NDE SICAKLIK VE AKIŞKAN HIZI MODELLEMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Doğa DÜŞÜNÜR DOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Neslihan Ocakoğlu**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Nurdan Sayın
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **22 Ocak 2015**

ÖNSÖZ

Bu çalışma kapsamında, Ege Denizi içerisinde yer alan İzmir, Gülbahçe ve Sığacık Körfezleri'nde sıcaklık dağılımı ve akış modellemesi yapılmıştır. Modelleme kapsamında bölgede yapılmış sığ sismik yansıma çalışmalarından elde edilen yer içi geometrileri kullanılarak gerçekçi modeller üretilmeye çalışılmıştır.

Hem lisans hem de yüksek lisans öğrenimim boyunca anlayışını, bilgi ve tecrübelerini, en önemlisi güler yüzünü benimle paylaşan çok değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Doğa DÜŞÜNÜR DOĞAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Çalışma sırasında öneri, görüş ve yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Neslihan OCAKOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Lisans, yüksek lisans ve tez sürecim boyunca hiçbir konuda destek ve sevgisini esirgemeyen anneme ve babama, yalnızca derslerde değil tiyatrodan da beni destekledikleri için teşekkür ederim.

Tavsiye ve önerilerini asla esirgemeyen bölüm arkadaşlarıma ve beni dışarıdan sürekli destekleyen dostlarıma da teşekkürü borç bilirim.

Aralık, 2014

Duygu Yağcı
(Jeofizik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	v
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. BATI ANADOLU’NUN TEKTONİK YAPISI VE JEOTERMAL POTANSİYELİ.....	1
1.1 Batı Anadolu’nun Aktif Tektoniği	1
1.2 Batı Anadolu’nun Jeotermal Potansiyeli.....	2
1.3 Modelleme Sahası	4
1.4 Modelleme Sahasının Aktif Tektoniği ve Jeotermal Potansiyeli	5
2. KURAMSAL İLKELER.....	9
2.1 Gözenekli Ortamda Akışkanların Akışı (Darcy Kanunu).....	9
2.2 Darcy Kanunu’nun Diferansiyel Biçimi	10
2.2.1 Poroz Ortamdaki Akışın Boyutsuz Formülasyonu	12
2.2.2 Rayleigh sayısı	13
2.3 Sonlu Hacim Yöntemi ve ANYSY FLUENT®	14
3. MODELLEME	17
3.1 Test Modeller	17
4. ÇALIŞMA BÖLGESİNDE YAPILAN SICAKLIK VE AKIŞ MODELLEMELERİ.....	25
4.1 İzmir, Gülbahçe Ve Sığacık Körfezleri’nde Yapılmış Sıcaklık Ve Akış Modellemeleri	26
4.1.1 Hat-2’ye ait sıcaklık ve akış modelleri	27
4.1.2 Hat-3’e ait sıcaklık ve akış modelleri	32
4.1.3 Hat-4’e ait sıcaklık ve akış modelleri	36
4.1.4 Hat-5’e ait sıcaklık ve hız modelleri	40
4.1.5 DOG1 hattına ait sıcaklık ve hız modelleri.....	44
4.2 Balçova ve Seferihisar Grabeni’ni İçine Alan Bölgede Yapılmış Sıcaklık ve	

Akış Modeli.....	48
5. SONUÇ VE TARTIŞMALAR.....	53
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	61

KISALTMALAR

DAFZ	: Doğu Anadolu Fay Zonu
DOAFZ	: Doğrultu atımlı Fay Zonu
KAFZ	: Kuzey Anadolu Fay Zonu
HAD	: Hesaplmalı Akışkanla Dinamiği
MTA	: Maden Tetkik ve Arama

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 : Test modellerindeki gözenekli ortama ve bu ortamdaki akışkana ait fiziksel parametreler	18
Çizelge 4.1: Modellemede kullanılan sismik hatların uzunluk ve derinlik değerleri	27
Çizelge 4.2 : Hat-2 modeline ait başlangıç ve sınır koşulları	29
Çizelge 4.3 : Hat-3 modeline ait başlangıç ve sınır koşulları.	33
Çizelge 4.4 : Hat-4 modeline ait başlangıç ve sınır koşulları.	38
Çizelge 4.5 : Hat-5 modeline ait başlangıç ve sınır koşulları.	42
Çizelge 4.6 : DOG1 modeline ait başlangıç ve sınır koşulları.	45
Çizelge 4.7 : Seferihisar modeline ait başlangıç ve sınır koşulları.	50

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 : Türkiye'nin aktif tektonik haritası (Oktay ve diğ., 2000)	2
Şekil 1.2 : Bir Jeotermal sistemin şematik gösterimi	3
Şekil 1.3 : Türkiye jeotermal kaynaklar dağılımı ve uygulama haritası (MTA, tarih)	4
Şekil 1.4 : Modelleme sahasının kara geometrisi, bölgede görülen aktif faylar ve modelleme için kullanılan sismik hatlar (Ocakoglu ve diğ. 2005'ten değiştirilerek).....	5
Şekil 1.5 : Çalışma alanı ve yakın civarının aktif fayları, çizgisellikleri (beyaz ile gösterilen) ve aletsel dönemdeki depremlerin fay düzlemi çözümleri (McKenzie, 1972, Kocaefe ve Ataman, 1976, Drakopoulos ve Delibasis, 1982, Ekstrom ve England, 1989, Taymaz ve diğ., 1991, Kalafat, 1995, Taymaz ve Tan, 2003).	7
Şekil 2.1: Darcy Kanunu'nun içerdiği parametreleri ve yönleri gösteren diyagram .	10
Şekil 2.2 : Rayleigh sayısının kritik değerleri için ısı iletim yollarının şematik gösterimi	14
Şekil 3.1 : Homojen test modelinin başlangıç ve sınır koşullarıyla birlikte şematik gösterimi. (D=1500 m)	18
Şekil 3.2 : Homojen test modeline ait eş sıcaklık eğrileri (a), Darcy hızı vektörleri (b)	19
Şekil 3.3 : Homojen test modeline ait eş sıcaklık eğrileri (a), Darcy hızı vektörleri (b)	20
Şekil 3.4 : DxD boyutlarında homojen bir model için (a) eş sıcaklık eğrileri ve (b) akış fonksiyonu $Ra=500$ (Saleh H. ve diğ., 2011).....	21
Şekil 3.5 : DxD boyutlarında homojen bir model için (a) ve sıcaklık eğrileri ve (b) akış fonksiyonu ($Ra=500$)	21
Şekil 3.6: Yüksek geçirimli bir fay zonu içeren test modelinin şematik gösterimi (D=1500 m)	22
Şekil 3.7 : Ortada konumlanmış 10 m genişlikli kırık için eş sıcaklık eğrileri (a) ve Darcy hız vektörleri (b)	23
Şekil 3.8 : Sağda konumlanmış 10 m genişlikli kırık için eş sıcaklık eğrileri (a) ve Darcy hız vektörleri (b)	23
Şekil 3.9 : Sağda konumlanmış 10 m genişlikli kırık için eş sıcaklık eğrileri (a) ve Darcy hız vektörleri (b)	24
Şekil 4.1 : Çalışma bölgesinin batimetrik haritası. Modellemenin deniz kısmında kullanılan sismik hatlar ve kara kısmının konumu mavi ve kırmızı çizgilerle gösterilmiştir. (Ocakoglu ve diğ., 2005'ten değiştirilmiştir.)....	26

Şekil 4.2 : A) Hat-2'ye yansıma gücü kesiti B) Hat-2'nin yapısal ve stratigrafik yorumu (Altan, 2014)	28
Şekil 4.3 : Hat-2'ye ait modelin ağ (mesh) geometrisi.	29
Şekil 4.4 : Gülbahçe Körfezi'nin üç boyutlu görünümü (Pekçetinöz, 2010).	30
Şekil 4.5 : Hat-2'ye ait (a) sıcaklık ve (b) Darcy hızı modelleri	31
Şekil 4.6 : A)Hat-3'e ait yansıma gücü kesiti B)Hat-3'ye ait yapısal ve stratigrafik yorum (Altan, 2014)	32
Şekil 4.7 : Hat-3'e ait modelin ağ (mesh) geometrisi.	33
Şekil 4.8 : Hat-3'e ait (a) sıcaklık ve (b) Darcy hızı modelleri	35
Şekil 4.9 : A)Hat-4'e ait yansıma gücü kesiti B)Yapısal ve stratigrafik yorum (Altan, 2014).	36
Şekil 4.10 : Hat-4'e ait modelin ağ (mesh) geometrisi.	37
Şekil 4.11 : Hat-4'e ait (a) sıcaklık ve (b) Darcy hızı modelleri.	39
Şekil 4.12 : Hat-5'e ait A)Anlık yansıma kesiti B) Yapısal ve stratigrafik yorum.	40
Şekil 4.13 : Hat-5'e ait modelin ağ (mesh) geometrisi.	41
Şekil 4.14 : Hat-5'e ait (a) sıcaklık ve (b) Darcy hızı modelleri.	43
Şekil 4.15 : DOG1 hattına ait sismik stratigrafisi.	44
Şekil 4.16 : DOG1 hattına ait ağ (mesh) geometrisi. Parlak yeşil alanlar yüksek geçirimli fay zonlarını, gri bölgeler ise havza çökellerini temsil etmektedir.	44
Şekil 4.17 : DOG1 hattı civarında, karadaki jeotermal alanlar (Magri, 2010'dan yeniden düzenlenmiştir.).	46
Şekil 4.18 : DOG1 hattına ait (a) sıcaklık ve (b) Darcy hızı modelleri.	47
Şekil 4.19 : Çalışma alanı olan Seferihisar–Balçova jeotermal sistemi, faylar ve jeotermal alanlar (Eşder ve Şimşek, 1975; Genç ve diğ., 2001; Drahor ve Berge, 2006 ve Uzel ve Sözbilir, 2008). Topography derived from SRTM data (Reuter ve diğ., 2007). (Magri, 2010'dan yeniden düzenlenmiştir.)	48
Şekil 4.20 : Yapısal unsurları gösteren harita ve Balçova jeotermal alanında bulunan kuyu lokasyonları (Serpen, 2004)	49
Şekil 4.21 : Seferihisar kesitine ait ağ (mesh) geometrisi.	50
Şekil 4.22 : Seferihisar modeline ait (a) sıcaklık ve (b) Darcy hızı modelleri.	51
Şekil 4.23 : Seferihisar modeli Darcy hızı modeli. (İzmir Fayı kısmı)	52
Şekil 5.1 : (a) İzmir ve Gülbahçe sıcaklık modellerinin (b) Sığacık Körfezi ve Seferihisar sıcaklık modellerinin harita üzerinde gösterimi (Ocakoglu, N. Ve diğ. 2005'ten değiştirilerek, ölçeksiz).	55

İZMİR, GÜLBAHÇE, SIĞACIK KÖRFEZLERİ'NDE SICAKLIK VE AKIŞKAN HIZI MODELLEMESİ

ÖZET

Jeolojik olarak Alp-Himalaya dağ oluşum kuşağında yer alan Türkiye, genç tektonik dönemde kazanmış olduğu çok kırıklı yapısı ve geçirmiş olduğu volkanik aktiviteler nedeniyle jeotermal kaynaklar yönünden zengin konumdadır. Türkiye’ de jeotermal enerji çalışmaları yaklaşık 45 yıl önce MTA Genel Müdürlüğü tarafından başlatılmış ve bugüne kadar yapılan çalışmalarla 190 adet jeotermal alanın varlığı keşfedilmiştir. Bu alanların % 79’unun Batı Anadolu’da olduğu göz önüne alındığında, bölge gerek genişlemeye bağlı olarak incelmış kabuk yapısı ile gerekse horst-graben sistemleri ve bunları sınırlayan faylarla ilişkili olarak, jeotermal çalışmalar açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu tez çalışması kapsamında Batı Anadolu’da Ege Denizi’nde yer alan İzmir, Gülbahçe ve Sığacık körfezlerinde sayısal sıcaklık ve yer altı suyu modellemesi yapılmıştır. Modelleme aşamasında, sismik yansıma kesitlerinden edilen yer içine ait sediman-ana kaya tabaka kalınlıkları ve fay konumları model geometrisi oluşturmada kullanılarak gerçekçi yer içi statik sıcaklık ve akışkan hızı modelleri elde edilmeye çalışılmıştır.

Yer altı akışkan hızı ve sıcaklık modellemesi, bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan ANSYS FLUENT’in 6.3.26 versiyonu ile yapılmış olup model geometrileri GAMBIT 2.3.16 versiyonlu yazılım ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelleme için kullanılan sıcaklık değerleri, porozite, permeabilite, ısı kapasitesi, viskozite, ısıl genleşme katsayısı, ısıl iletkenlik gibi yer içi parametreleri daha önce bölgede yapılan çalışmalardan derlenip, sismik kesitlerden elde edilen geometrilerle birleştirilerek çalışma bölgesi içerisinde yer alan bölgede karadan deniz tabanına kadar uzanan fayların bölgedeki jeotermal akışkan rejimine etkileri irdelenmiştir.

Sayısal modellemede kullanılmış sismik hatlara ait anlık genlik kesitlerinde, sıvı ya da gaz içeren sedimanlar olduğu düşünülen düşük genlikli alanlar ve yer altı akışkanlarına işaret eden olası bir çamur diapiri tespit edilmiştir (Altan, 2014). Çalışma kapsamında yapılan Darcy hızı modellerinde de bu türden akışkan çıkışları ve/veya girişleri görülmüş olup mevcut sismik kesitlerle karşılaştırılarak modellerin gerçeğe uygunluğu tartışılmıştır. Çalışmanın kara ayağında ise Balçova jeotermal alanı ve Seferihisar Horst’unu içine alan bir bölgeden alınmış bir kesit doğrultusunda, hem uzunluk hem de derinlik açısından geniş ölçekli bir sıcaklık ve Darcy hızı modeli oluşturularak kara ve deniz modelleri birlikte yorumlanmıştır.

TEMPERATURE AND FLOW MODELLING IN İZMİR, GÜLBAHÇE AND SİĞACIK BAY

SUMMARY

Turkey is located in the Alpine-Himalayan orogenic belt geologically. It has many geothermal resources due to fractured structure geologic base. That fractured structure can be considered to have been formed in the young tectonic period. This period is assumed to be a phase of substantial emergence of the past volcanic activities. As a beginning for the innovative energy explorations, geothermal energy studies have been started by Mineral Research & Exploration General Directorate (MTA) in the past decades. In Turkey, geothermal energy consumption and usage can be observed in a wide area of fields. Geothermal energy is mainly used in thermal tourism, which includes alternative curing and health tourism, heating applications in many residential and industrial buildings, greenhouse heating, industrial mineral (liquid CO₂) and also as a renewable and environmental friendly energy production method in electricity production. MTA have discovered 190 geothermal areas so far which are mostly distributed in Aegean part of Anatolia. West Anatolia, which has 79% of these geothermal areas and has crustal thinning due to the extensional regime, own many horst-graben systems restricted with the faults is under the influence of active volcanism. Therefore, this region has a great importance for the field of geothermal studies. In this thesis, a numerical static temperature distribution and ground water flow modeling is performed for İzmir, Gülbahçe and Sığacık Bays which are located in the Aegean Sea. In the modeling process, thickness of basin deposits and bedrock, and the fault locations obtained from the shallow seismic reflection profiles are used for a realistic static temperature distribution and flow modeling.

In the last decade, numerical models of coupled fluid and heat flow were increasingly used to improve the understanding of hydrothermal systems and their natural evolution. Those numerical models of coupled fluid and heat flow were especially used for systems in fractured environments. Amongst hundreds of numerical investigations, recently modelled faulted areas include the Rhine Graben Germany, the Basin and Range, USA, the Ashanti belt, Ghana, and the Mc Arthur and Mount Isa basins, Australia. The major outcome of all these studies is that convection induced by thermal buoyant forces is a major mechanism driving hot basinal fluids. Faults play a dominant role in density-driven flow as they control recharge and discharge. Depending on their hydraulic properties, faults can also allow deep fluid circulation within impervious basement and act as fast flow pathways for both solute and energy transport. In pioneering investigations on groundwater flow in fault zones, it is found that the different regimes of heat transfer (i.e. conductive, advective, stable or unstable convective) fall within discrete ranges of permeability contrasts between the fault zone and the surrounding country rock. Furthermore, fault zones can induce convection in neighbouring units where geophysical conditions are, in principle, not favourable for convective flow. Therefore, in a hydrothermal

system, multiple heat transport processes are likely to co-exist.

ANSYS FLUENT 6.3.26 which is computational fluid dynamics software operating Finite Volume Method (FVM) was used for the flow and temperature modeling by implementing the mesh geometries using GAMBIT 2.3.16 software. The finite volume method (FVM) is a common approach used in CFD codes, as it has an advantage in memory usage and solution speed, especially for large problems, high Reynolds number turbulent flows, and source term dominated flows (like combustion). In the finite volume method, the governing partial differential equations (typically the Navier-Stokes equations, the mass and energy conservation equations, and the turbulence equations) are recast in a conservative form, and then solved over discrete control volumes. This discretization guarantees the conservation of fluxes through a particular control volume.

The modeling parameters such as temperature, porosity, permeability, heat capacity, viscosity, thermal expansion coefficient and thermal conductivity were acquired from the previous researches that were conducted in the same region. These parameters were combined with the sub-surface geometries obtained from the seismic profiles for investigating the effects of the faults extended from the continental area to the sea floor, on the geothermal flow regime.

In the marine part of the study, a numerical static temperature distribution and ground water flow modeling is performed for İzmir, Gülbahçe and Sığacık Bays which are located in the Aegean Sea. The subsurface structures obtained from the seismic reflection data is used for building mesh geometry. Combining seismic reflection study and numerical flow and temperature modelling is the constitutive idea of the thesis due to procure realistic temperature distributions and velocity models.

Low amplitude values related to sediments probably including geothermal fluid or gas and a structure interpreted as a mud diapir indicating underground outflow were determined from the reflection strength sections. Those kind of inflow/outflow regimes also were encountered in the Darcy velocity models and they were compared with the present seismic reflection sections in order to discuss whether it is compatible with the seismic interpretations.

This research also monitors usable data regarding continental parts of the region. In the continental part of this research, the temperature and Darcy velocity models were executed in order to analyze the sea and continent models together by choosing a large cross-sectional area in terms of length and depth, including Balçova geothermal area and Seferihisar Horst. The Seferihisar–Balçova Geothermal system is located in the Aegean region, western Turkey. The main faults are the İzmir, Cumalı, Tuzla and Doğanbey parts of the system which can be named as substantial fault spots. These strike-slip and normal faults break into several splays along which natural hot springs form. Considering temperature observations, it can be noticed that venting temperatures range from 30 °C to 78 °C. To monitor the historical progress of the analysis of the systems it can be determined that geothermal exploration in the Seferihisar–Balçova Geothermal system started in the early 1960s. Technical authorities has moved the progress of explorations with many welling operations, approximately 50 wells have been drilled by the General Directorate of Mineral Research and Exploration of Turkey (MTA) both for developing and monitoring geothermal energy production. Based on the well log data, geophysical and hydrochemical investigations have been carried out over the Seferihisar–Balçova

Geothermal system in order to define its major tectonic features and to delineate the possible groundwater flow paths. Meteoric waters from the Seferihisar Horst infiltrate down to 2 km depth or more. After being heated by an unidentified heat source, the hot and less-dense deep waters ascend to the surface along the major faults and fractures and also the cold water descend to the bottom through major faults. To detect the groundwater movements (flow) and static temperature distribution in the area, a two-dimensional numerical model is chosen. Seferihisar Horst model differs from other models in terms of both scale and topography. Another feature of this model is having sea floor and a topographic rise, which is Seferihisar Horst, together. This feature has insured us an opportunity to investigate the topographically-driven flow. A topography-driven flow system is one in which ground water flows from higher-elevation recharge areas, where hydraulic head is higher, to lower-elevation discharge areas, where hydraulic head is lower. This type of flow system is commonly encountered in ground-water basins. The main factors that control ground-water flow are basin geometry, shape of the water table, and the distribution of hydraulic properties. A key purpose of the TopoDrive model is to enable the user to investigate how these factors control ground-water flow. In Seferihisar Horst model, it can be seen that the topography-driven flow is the dominant component of the flow. Temperature distribution of the model tend to be conduction. However, it can be recognized in the Darcy velocity model small convective flows in the thick reservoir layer and especially in the thin alluvium layer.

1. BATI ANADOLU’NUN TEKTONİK YAPISI VE JEOTERMAL POTANSİYELİ

1.1 Batı Anadolu’nun Aktif Tektoniği

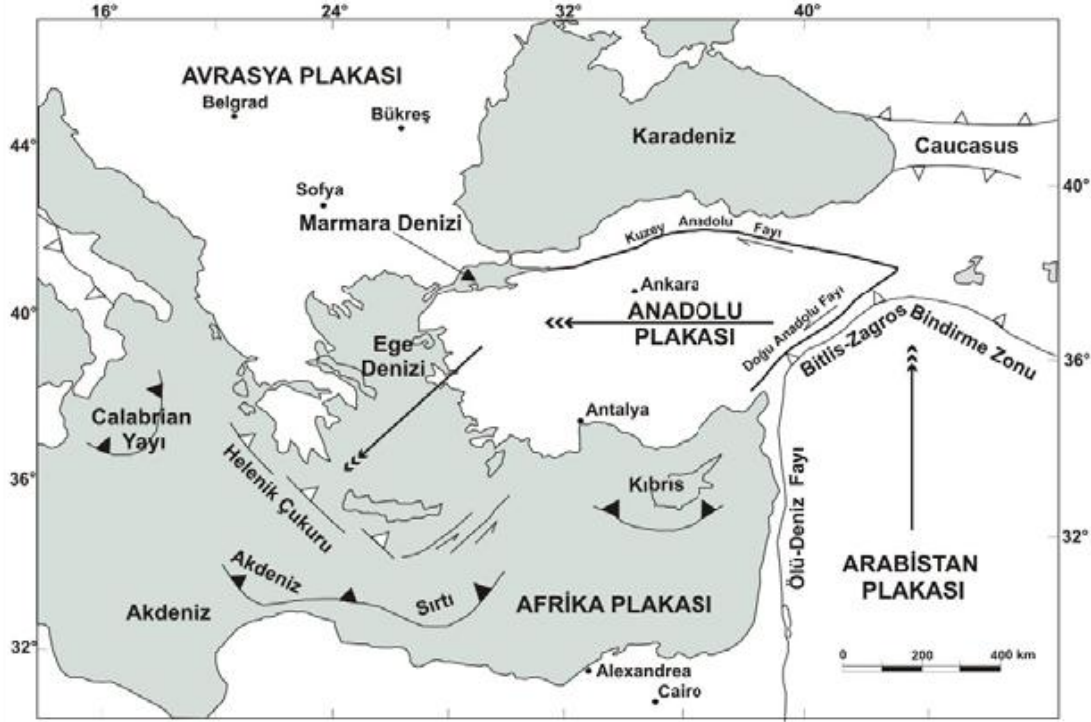
Neotektonik, jeolojik geçmişte herhangi bir zamanda başlayıp, niteliğini değiştirmeksizin etkinliğini günümüzde de sürdüren tektonik rejimdir. Bu anlamda Neotektonik terimi çok daha geniş bir kavram olup aynı zamanda ‘Aktif Tektonik’ ve ‘Traverten Tektoniği’ gibi diğer bazı terimleri de kapsar. Neotektonik rejim genişlemeli ya da sıkışmalı özellikte olabilir. Türkiye ve yakın çevresinde olduğu gibi, her iki tür neotektonik rejim geniş bir bölgede yan yana gelişip birbirini etkileyebilir. Türkiye’nin aktif tektonik haritası Şekil 1.1’de verilmiştir.

Batı Anadolu ve Ege Denizi’nin aktif tektoniği; Anadolu’nun sağ yanal Kuzey Anadolu (KAFZ) ve sol yanal Doğu Anadolu (DAFZ) doğrultu atımlı fay zonları boyunca batıya kaçıışı; Yunanistan’ın batısındaki kıtasal kalınlaşmadan dolayı Anadolu’nun batıya kaçışının engellenmesi ve kuzey ve orta Ege bölgesinde doğu-batı sıkışma oluşması bunun sonucunda Batı Anadolu’nun saatin tersi yönünde dönerek güneybatı yönünde Hellen yayı üzerine hareket etmesi ile özetlenebilir. (McKenzie, 1972 ve 1978; Dewey ve Şengör, 1979; Le Pichon ve Angelier, 1979 ve 1981; Şengör ve diğ., 1985; McKenzie ve Yılmaz, 1991; Taymaz ve diğ., 1991; Barka ve Reilinger, 1997; McClusky ve diğ., 2000).

Batı Anadolu Geç Oligosen’den beri K-G doğrultusunda genişleyen bir bölge olarak kabul edilmektedir (Seyitoğlu ve Scott, 1992). Bu genişleme graben havzalarını sınırlayan yaklaşık D-B doğrultulu düşük- ve yüksek-açılı normal fayların oluşmasını sonuçlamıştır (Bozkurt ve Park 1994; Hetzel ve diğ., 1995; Emre 1996; Emre ve Sözbilir 1997; Koçyiğit ve diğ., 1999; Yılmaz ve diğ., 2000; Bozkurt, 2000, 2001, 2003; Lips ve diğ., 2001; Sözbilir 2001, 2002; Seyitoğlu ve diğ., 2002; Bozkurt, 2000, 2001; Bozkurt ve Sözbilir, 2004, 2006).

Batı Anadolu’nun neotektonik aktivitesi Avrasya plakasına karşı Arabistan plakasının kuzeye doğru olan hareketiyle ilişkilidir. Anadolu plakası sismik olarak

aktif zonlar arasında çok sayıdaki sıcak çıkışlarla pek çok küçük parçadan oluşmaktadır (McKenzie, 1972; Dewey ve Şengör, 1979). Batı Anadolu, gerek horst–graben yapılarının varlığı gerekse de aktif volkanizma’nın etkisinden dolayı, jeotermal ve hidrotermal aktivitelerin varlığı konusunda farklı bir konuma sahiptir.



Şekil 1.1 : Türkiye’nin aktif tektonik haritası (Okay ve diğ., 2000).

1.2 Batı Anadolu’nun Jeotermal Potansiyeli

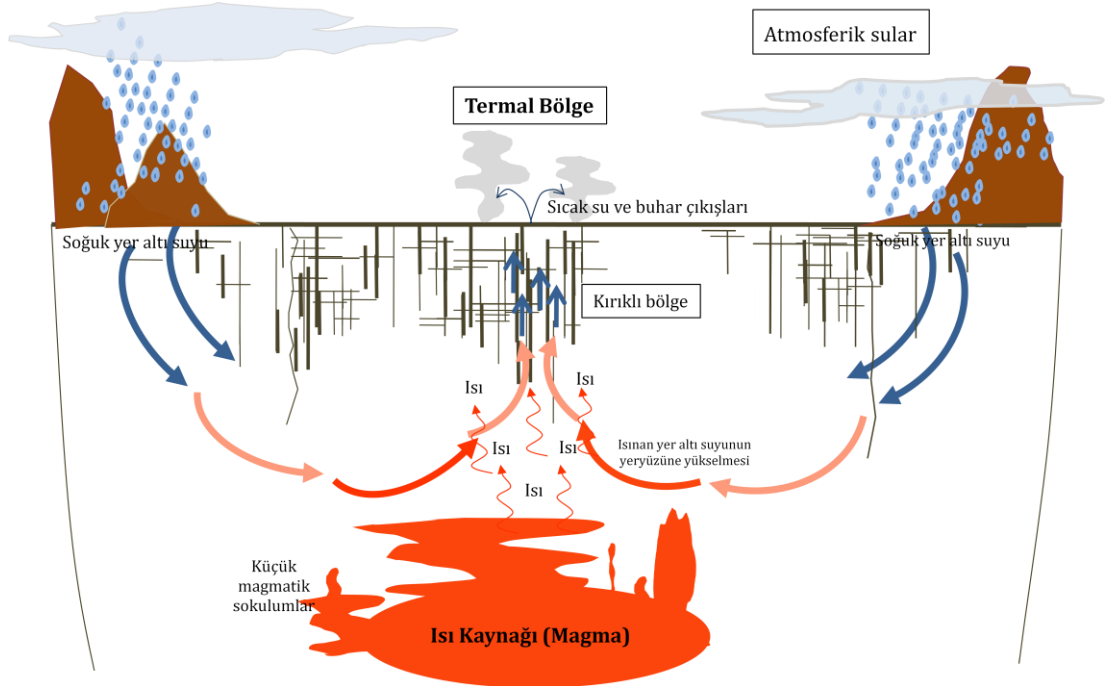
Jeotermal, yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde var olan ısının oluşturduğu, çeşitli kimyasallar içeren sıcak su, buhar ve gazlardır. Jeotermal enerji ise bu jeotermal kaynaklardan ve bunların oluşturduğu enerjiden doğrudan veya dolaylı yollardan faydalanmayı kapsamaktadır. Özellikle son yıllarda oldukça fazla araştırmaya konu olmuş jeotermal enerji; yeni, yenilenebilir, sürdürülebilir, tükenmez, ucuz, çevre dostu, yerli ve yeşil bir enerji türü olmasıyla pek çok enerji kaynağından daha güvenilirdir.

Yağmur, kar, deniz ve magma sularının yeraltındaki gözenekli ve çatlaklı kayalar kütlelerini besleyerek oluşturdukları jeotermal rezervleri, yeraltı ve reenjeksiyon koşulları devam ettiği müddetçe yenilenebilir ve sürdürülebilir özelliklerini korurlar. Kısa süreli atmosfer koşullarından etkilenmezler. Dünya’daki mevcut enerji kaynaklarının hızla tükenmesi ve küresel ısınma gibi problemlerin çözüm

aşamasında anahtar bir görev üstlenebilecek olan jeotermal enerji, kendi potansiyelinin açığa çıkarılmaya başlanmasıyla birlikte hızla yaygınlaşan bir enerji türü olmuştur.

Bir jeotermal sistemin dört ana unsurdan oluşur (Şekil 1.2):

- Isı kaynağı (magma)
- Rezervuar ve/veya hazne
- Örtü kayaç
- Isıyı taşıyan akışkan



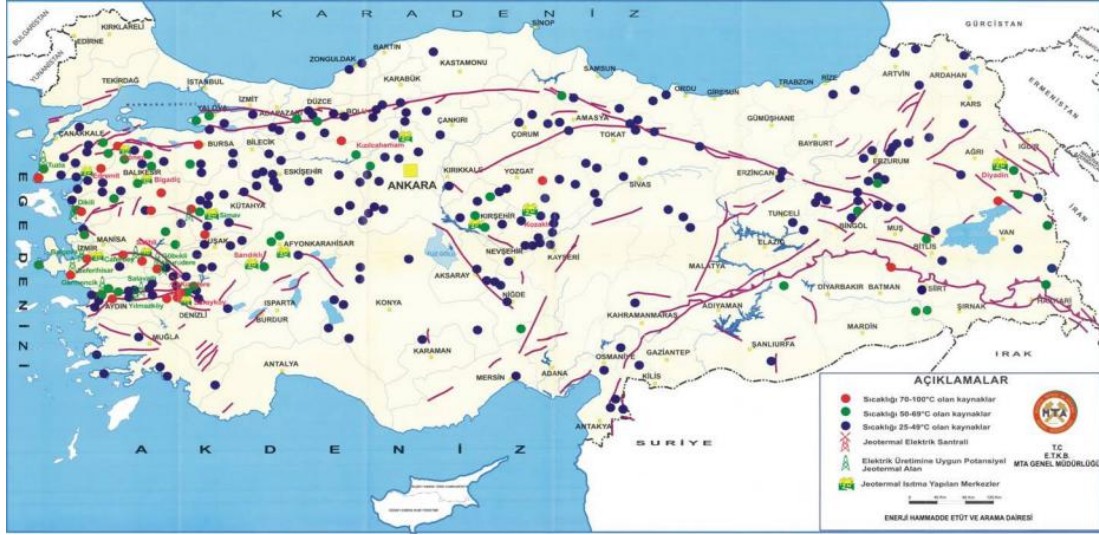
Şekil 1.2 : Bir Jeotermal sistemin şematik gösterimi.

Jeotermal enerji, ülkeler ve kökenlerine göre değişik sınıflandırmalar olmasına karşın sıcaklık içeriklerine göre;

- Düşük Entalpili Sahalar (20-70 °C)
- Orta Entalpili Sahalar (70-150 °C)
- Yüksek Entalpili Sahalar (>150 °C) olmak üzere kabaca üç gruba ayrılır.

Jeolojik olarak Alp-Himalaya dağ oluşum kuşağında yer alan ülkemiz, genç tektonik dönemde kazanmış olduğu çok kırıklı yapısı ve geçirmiş olduğu volkanik faaliyetlerden dolayı (Şekil 1.3) jeotermal kaynaklar yönünden zengin konumdadır.

Türkiye’ de jeotermal enerji çalışmaları yaklaşık 45 yıl önce MTA Genel Müdürlüğü tarafından başlatılmış ve bugüne kadar yapılan çalışmalarla 190 adet jeotermal alanın varlığı keşfedilmiştir. Bu alanların % 79’u Batı Anadolu’da, % 8,5’i Orta Anadolu’da, % 7,5’i Marmara Bölgesinde, % 4,5’i Doğu Anadolu’da ve % 0,5’i diğer bölgelerde yer almaktadır. Bu oranlar göstermektedir ki, Türkiye’nin jeotermal potansiyelinin çoğunu Batı Anadolu bölgesi içermektedir.



Şekil 1.3 : Türkiye jeotermal kaynaklar dağılımı ve uygulama haritası (MTA, 2005).

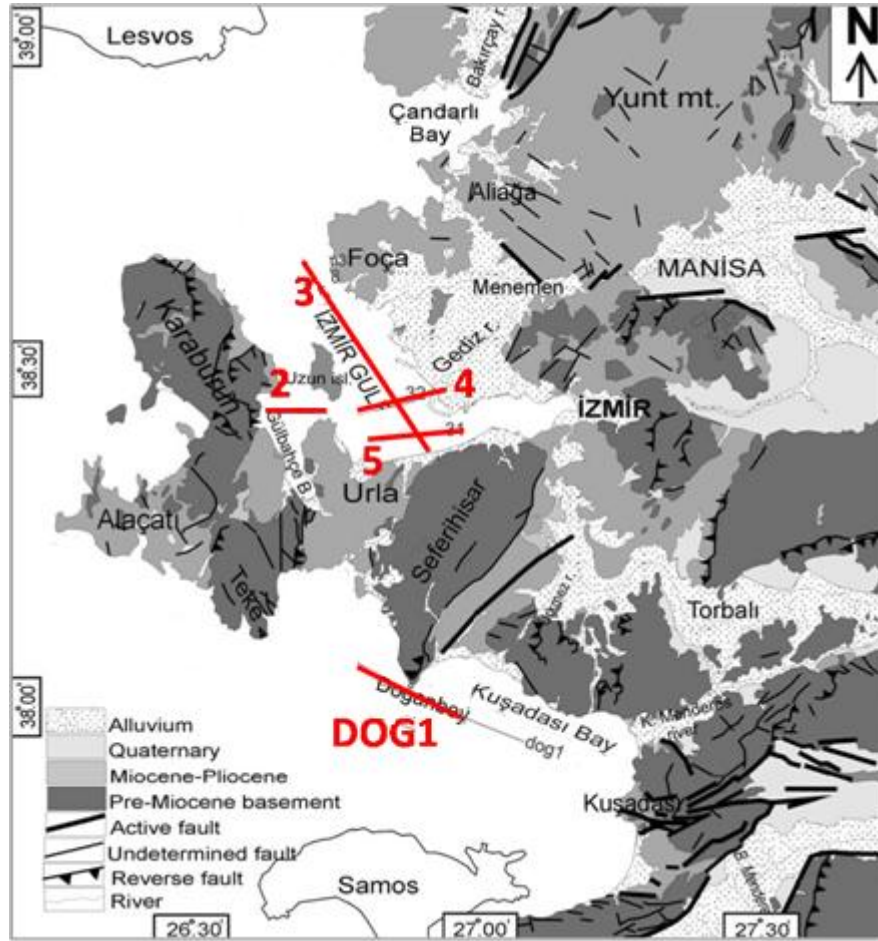
Sıcaklık ve akış modellerimizin geometrisini oluşturan sismik hatların yer aldığı İzmir, Sığacık ve Gülbahçe Körfezleri’ni içine alan bölgede yer alan başlıca jeotermal enerji üretim sahaları Aliağa, Balçova, Bergama, Çeşme, Dikili, Edremit, Kestanbol, Tuzla şeklinde sıralanabilir.

Araştırma alanımızda bulunan en önemli jeotermal saha şüphesiz ki Balçova jeotermal üretim sahasıdır. Burada buluna jeotermal sistemin, D-B uzanımlı İzmir fayı kontrollü olduğu düşünülmektedir ve ülkemizdeki en yüksek sıcaklığa sahip jeotermal alanlardan birisidir. Öyle ki Batı Anadolu’da ortalama ısı akısı yoğunluğu $110.8 \pm 48.1 \text{ mWm}^{-2}$ olup Yerküre ortalamasından %50 kadar daha yüksektir (Jongsma, 1974).

1.3 Modelleme Sahası

Sıcaklık ve akışkan modellerimizi yaptığımız alan Batı Anadolu’da D-B doğrultulu grabenlerin doğusunda yer alan K-G uzanımlı İzmir, Gülbahçe ve Sığacık Körfezleri’dir. Bölgeye ait kara jeolojisi ve aktif faylar basitleştirilmiş jeoloji

haritasında (Şekil 1.4) verilmiştir. Aynı şekil üzerinde görülen 2, 3, 4 ve 5 numaralı hatlar, modellerimize ait geometrilerin sağlandığı hatlardır. Buna ek olarak Ocakoğlu ve diğ. (2005)'ten alınan ve Seferihisar yükseltisinin en güney ucuna denk gelen bir sismik kesit daha modellenmiş ve tüm bu modeller, Balçova ve Seferihisar yükseltisini de içine alacak şekilde, geniş ölçekli bir sıcaklık ve akış modellemesi yapılmasına olanak vermiştir. Bu modellemeler ile bölgede var olan karmaşık jeotermal yapı anlaşılmaya çalışılmış ve karadaki mevcut jeotermal sistemin denizde bir sürekliliğinin olup olmadığı araştırılmıştır.



Şekil 1.4 : Modelleme sahasının kara geometrisi, bölgede görülen aktif faylar ve modelleme için kullanılan sismik hatlar (Ocakoğlu ve diğ, 2005'ten değiştirilerek).

1.4 Modelleme Sahasının Aktif Tektoniği ve Jeotermal Potansiyeli

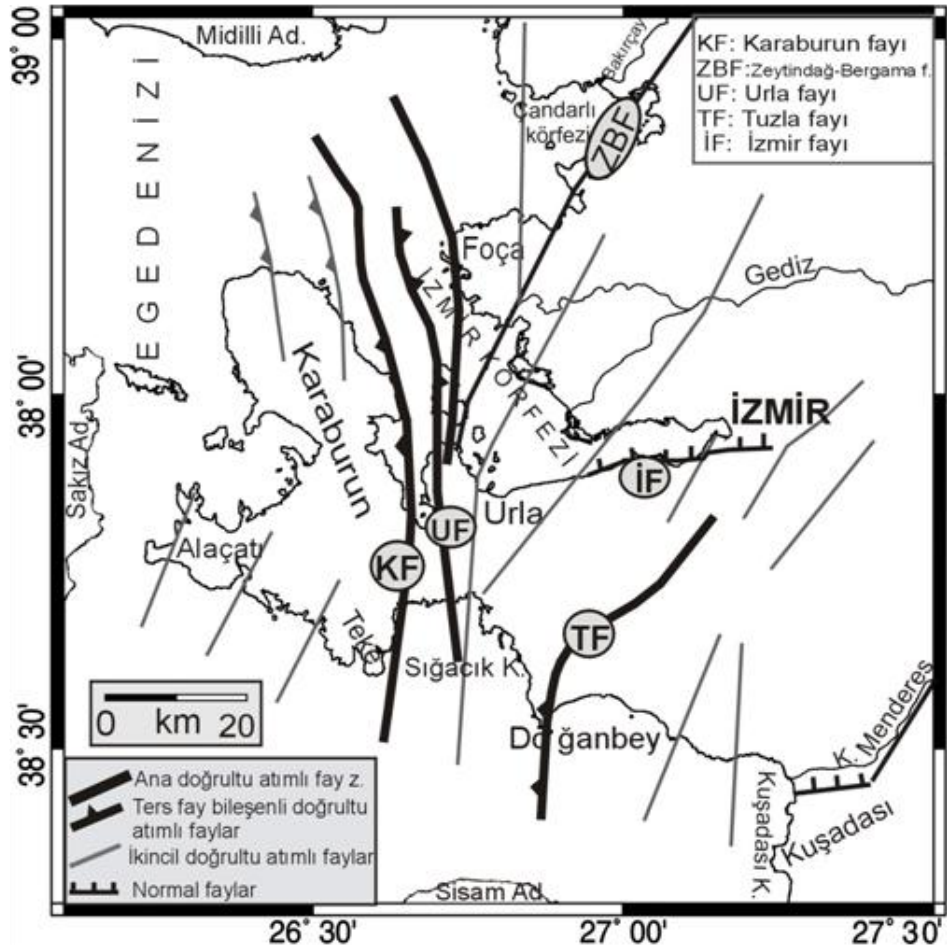
Batı Anadolu ve Ege Denizi'nin belirgin yapıları D-B gidişli grabenler olarak bilinir. Bu grabenlerden başlıcaları, kuzeyden güneye Saroz, Edremit, Bakırçay, Gediz,

Küçük Menderes, Büyük Menderes ve Gökova grabenleridir. Bu anlamda çalışma alanı olan İzmir Körfezi'nin uzanımı Batı Anadolu'nun D-B gidişli grabenleri ile uyumsuzluk göstermektedir. İzmir körfezi D-B gidişli bir iç körfez ile KKB-GGD gidişli bir dış körfezden oluşmaktadır. Gerçekte körfezin KKB-GGD parçasının oluşumu Batı Anadolu'nun bilinen neotektonik rejimi altında günümüze değin yeterince açıklanamamıştır. Kaya (1979) körfezi paleotektonik dönemde K-G, KD-GB gidişli derin oblik faylarla oluşmuş bir çöküntü alanı olarak yorumlamış ve bu paleotektonik yapıların kısmen günümüz Kuvaterner tektoniğinde de etkili olduğunu belirtmiştir. Diğer bir açıdan, önceki çalışmalarla İzmir körfezi ve yakın çevresindeki deniz ve kara alanlarında haritalanan aktif fay sistemleri de diğer grabenlerin aktif fay sistemlerinden farklıdır. Kuzey ve orta Ege'de Saroz ve Edremit körfezlerinde sağ yanal doğrultu atımlı KAFZ'nun ve kollarının etkileri görülürken (Mc Kenzie, 1978; Taymaz ve diğ., 1991; Boztepe ve diğ., 2001) güneyde Gökova grabeninde olduğu gibi daha çok Hellen yayına bağlı gerilme rejimi hakimdir (Le Pichon ve Angelier, 1979 ve 1981; Görür ve diğ., 1995; Kurt ve diğ., 1999). Bu anlamda orta Ege'de yer alan çalışma alanındaki faylanma türlerinin Batı Anadolu'nun kuzey ve güney jeodinamikleri arasında; bir geçiş bölgesinde oluştuğu düşünülebilir çünkü İzmir körfezi ve onu çevreleyen kara alanlarında hem D-B gidişli Gediz, Küçük Menderes grabenleri hem de KD-GB gidişli aktif fay sistemleri haritalanmıştır (Şekil 1.5). Karada K-G ve KD-GB gidişli faylar genelde doğrultu atım özelliğinde olup en önemlileri Zeytindağ-Bergama, Tuzla fay zonları olarak isimlendirilmiştir (Dewey ve Şengör, 1979; Kaya, 1981; Aksu ve diğ., 1987 ve 1990; Mascle ve Martin, 1990; Şaroğlu ve diğ., 1992; Emre ve Barka, 2000). Çalışma sahasındaki en önemli D-B doğrultulu fay İzmir Fayı'dır. Bahsi geçen önemli önemli faylar Şekil 1.5'te verilen haritada gösterilmiştir.

Modelleme bölgesindeki önemli aktif faylar Şekil 1.5'te gösterilmiştir. Bunlar, sağ yanal atımlı doğrultu atım karakterli Tuzla Fayı, Seferihisar Fayı, Karaburun Fayı (Güzelbahçe Fay Zonu)'dur. Denizde gerçekleştiren çalışmalardan elde edilen bilgiler, bize İzmir Körfezi'nin KB-GD doğrultulu normal faylar ile sınırlı olduğunu söylemektedir (Aksu ve diğ., 1987). 2005 yılında Ocakoğlu ve diğ. gerçekleştirmiş olduğu çalışmada, bölgenin aktif denizaltı tektonizmasından sorumlu KD-GB gidişli doğrultu atımlı aktif faylar ve yer yer D-B gidişli aktif normal faylanmalar gözlenmiştir.

Bölgede yapılan deniz çalışmaları karada var olan mevcut fayların deniz içerisinde devamlılığının araştırılması açısından önem taşımıştır. Deniz çalışmaları Aksu ve diğ.'nin (1987) yaptığı sığ sismik çalışmalar ile başlamış olup, Ocakoğlu ve diğ.'nin (2004,2005) gerçekleştirdiği çok kanallı derin çalışmalar ile devam etmiştir. Bölgede KD-GB gidişli, aktif, doğrultu atımlı faylar haritalanmıştır. (Şekil 1.5)

Özellikle, Balçova bölgesinin aktif tektonizma açısından zengin bir bölgede bulunması, yüksek ısı akıllı jeotermal alanların, bu alanlarda bulunan hidrotermal akışkanın yeraltındaki dolanımının ve bu akışkanların ısıl durumlarının belirlenmesinde çok önemli bir parametredir.



Şekil 1.5 : Çalışma alanı ve yakın civarının aktif fayları, çizgisellikleri (Ocakoğlu ve diğ., 2005).

Bilindiği gibi faylar uzun kırıklar boyunca oluşurlar ve bu kırıklar jeotermal akışkanın kolayca başka ortamlara iletebileceği geçirgen jeolojik yapılardır. Bu nedenle faylar yeraltı suları için geçirgenliği arttıran formasyonlardır. Ancak faylar, sadece mevcut jeotermal akışkanları geçiren ya da yeryüzüne ulaştıran yapılar olarak

tanımlamak eksik olacaktır. Fayların, belirli ya da belirsiz bir kaynak tarafından ısıtılan hidrotermal akışkanların soğumasına da büyük katkısı vardır. Yapılan modellemelerde, deniz tabanına kadar uzanan kırıklarda yalnızca sıcak su çıkışı değil, aynı zamanda soğuk deniz suyunun mevcut kırıklı geçirgen yapı vasıtası ile içeri penetre ettiği de gözlemlenmiştir.

2. KURAMSAL İLKELER

2.1 Gözenekli Ortamda Akışkanların Akışı (Darcy Kanunu)

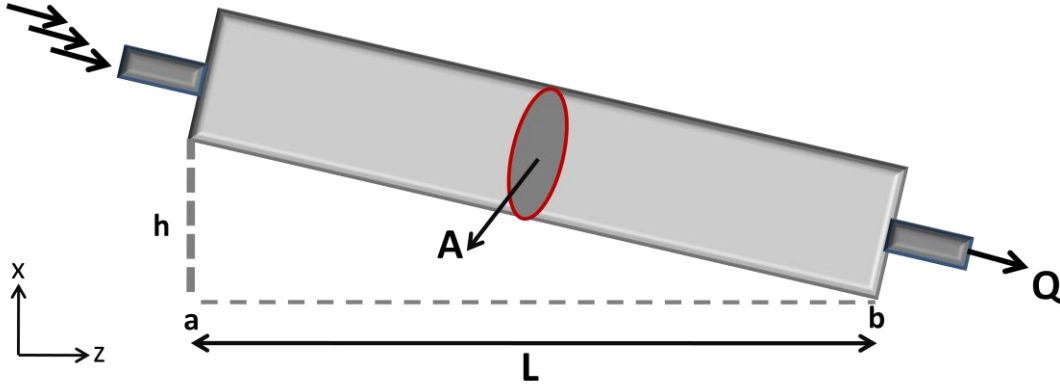
En geniş anlamda gözenekli ortam, içinde düzgün ya da karışık bir dağılım gösteren delikleri ve boşlukları bulunan bir katıdır. Bu gözenekler birbiriyle ilişkili (bağlantılı) olabileceği gibi bağımsız boşluklar da olabilirler. Ancak bir akışkanın gözenekli bir ortam içerisinde akması için bu boşluk yapılarının birbiriyle bağlantılı olması gerekir.

Gözenekli ortamda akışın incelenmesi için önemli olan birtakım özellikler parametreler vardır. Bu parametrelerin başında porozite gelmektedir. Gözenekli bir ortamın porozitesi boşlukların kaba hacme oranı olarak tanımlanır ve ϕ simgesi ile temsil edilir (2.1). Aşağıda verilmiş olan formülde V_p gözeneklerin toplam hacmi, V_B ise toplam kaba hacimdir.

$$\phi = \frac{V_p}{V_B} \quad (2.1)$$

Akışkan akışına etki eden bir diğer önemli parametre ise geçirimsizlik (permeabilite)'dir. Permeabilite, uygulanan bir basınç gradyeni ile akışkanın gözenekli ortamdaki akış kolaylığını karakterize eden, gözenekli ortamın bir özelliğidir. Permeabilite, gözenekli maddenin akışkan geçirgenliğidir. Gözenekli maddenin akışkan geçirgenliğini karakterize eden parametrenin anlamlı bir şekilde tariflenebileceği 1856'da Darcy tarafından ilk defa gösterilmiştir. Gerçekten permeabiliteyi ölçülebilir büyüklüklerde ifade eden denklem *Darcy Kanunu* olarak bilinir. Basitçe Darcy kanunu, sabit bir eğimde poroz bir ortamdan geçen akışkanın anlık debisi Q , viskozitesi μ (Pa·s), akışın sürdüğü mesafe, L (m) boyunca meydana gelen basınç değişimi ΔP (Pa), eğim h/L ve poroz ortamın kesitsel alanı A (m²) arasındaki oransal ilişkiyi açıklar (2.2). Şekil 2.1'de tüm bu parametrelerin görüldüğü temsili bir diyagram verilmiştir. Darcy'nin deney düzeneği, içinde kum bulunan A kesitli silindirik bir borudan ibarettir. Akış çok yavaştır ve silindirin üst kısmından giren su aşağı doğru kum taneleri arasından süzülerek iner (Şekil 2.2).

Akış daimi, gözenekli ortam özdeş ve akış tek yönlüdür. Darcy, deney sırasında akışkanın kum ile dolu kısmına girdiği sütunun üst ve çıktığı alt seviyelerindeki basınç farkı ile akışkan akışı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu bulmuştur.



Şekil 2.1: Darcy Kanunu'nun içerdiği parametreleri ve yönleri gösteren diyagram.

$$Q = \frac{K A}{\mu} \frac{\Delta P h}{L} \quad (2.2)$$

(2.2)'de her iki taraf da kesit alanı olan $A.h$ 'ye bölüldüğünde,

$$q = \frac{Q}{Ah} = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad (2.3)$$

şeklinde düzenleme yapılmış olur. (2.3)'te q Darcy akısını göstermektedir. ∇P (Pa/m) ise basınç gradyanı olarak tanımlanır. Darcy akısı q , akışkanın hızını ifade etmez ancak, poroz ortamdan geçen akışkanın hızı bu akıya q ve porozite ϕ 'ye bağlıdır (2.4).

$$v = \frac{q}{\phi} \quad (2.4)$$

Bağıntı (2.2) ve oradan elde edilen (2.3) Darcy Kanunu'nun en genel halidir. Ancak iki ya da üçüncü boyutta akışı tanımlamak için yeterli olmayacaktır. Bu türden akışları tanımlamak için Darcy Kanunu'nun diferansiyel biçimi kullanılmalıdır.

2.2 Darcy Kanunu'nun Diferansiyel Biçimi

Daha önce de bahsedildiği gibi klasik hidrodinamik verilen sınırlardaki ideal viskoz sıvıların akışlarını belirtir. Bu teoremin matematik denklemlerini belirli bir sıvı akış

problemine uygulayabilmek için eldeki sistemin sınırlarının matematiksel olarak belirlenmesi gerekir. Bu çalışmada oluşturulan modellere ait ortamda olduğu gibi, doğal gözenekli ortamdaki akışta gözenek yapısının karmaşıklığı böyle bir matematiksel anlatımı oldukça zor kılmaktadır. Dolayısıyla, gözenekli ortamdaki akışın matematiksel teorisi gerçekleştirilese bile, böyle bir teori, istatistiksel biçimde ya da sadece akışın makroskobik özelliklerini belirten kanunlara dayanan bir teori biçiminde olmalıdır.

Bu durumda Darcy yasası aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Holzbecher, 1998):

$$v = -\frac{k}{\mu} (\nabla P - \rho g) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho) = -\nabla \cdot (\rho v) \quad (2.6)$$

Bağıntı (2.5)'te v Darcy hızı olarak bilinir veya bütün akış kesiti içindeki akışkanın ortalama hızı olarak tanımlanır. ∇P (Pa) ise akışkan kısmı içinde basınç değişim vektörüdür. Gözenekli ortamın geçirgenlik tensörü k ve porozite ϕ olarak verilmiştir. Yerçekimi ivmesi g (m/s^2) ile gösterilmiştir. Son olarak μ ise akışkanın dinamik viskozitesini verir. Bağıntı (2.6) ise kütle korunum denkleminin analitik şekilde yazılmış halidir. Eğer bağıntı (2.5)'ü, bağıntı (2.6)'da yerine yazarsak,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho) = \nabla \cdot \left(\rho \frac{k}{\mu} (\nabla P - \rho g) \right) \quad (2.7)$$

denklemini elde ederiz. Buradan yola çıkarak modellemelerimizde kullandığımız akışkan hızlarının yatay (x) ve düşey (z) bileşenleri sırasıyla,

$$u = -\frac{K_x}{\nu} \left(-\frac{dP}{dx} \right) \quad (2.8)$$

$$v = -\frac{K_z}{\nu} \left(-\frac{dP}{dz} + \rho g_z \right) \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edebilir. Bu denklemlerde g yerçekimi ivmesi (m/s^2), ν kinematik viskozite (m^2/s) ve ρ ise yoğunluktur. K_x ve K_z ise ortamın permeabilitesinin yatay ve düşeydeki değerleridir.

(2.7)'de verilmiş olan bağıntı; ρ , μ , ϕ ve k 'nın değişmediği koşullarda yer altı sularının akışını modellemek için kullanılmaktadır. Bağıntıdaki tek değişkenin P basınç değişkeni olduğu görülmektedir. Söz konusu bir diferansiyel denklem

olduğundan, başlangıç ve sınır koşulları verildiğinde, sayısal olarak çözülebilmektedir. Buradaki formülasyon akışın basınca bağlı sayısal çözümünü verecektir. Ancak bir akışkanın gözenekli bir ortamdaki akışı, Oberbeck-Boussinesq formülasyonu, akış fonksiyonu formülasyonu ya da boyutsuz formülasyon gibi farklı formülasyonlarla da gösterilebilir (Holzbecher, 1998).

Bu çalışmanın kapsamında elde edilen modellerde, yer altındaki akışkanın hem Darcy hız vektörleri hem de statik sıcaklık dağılımları gösterilmekte olduğundan boyutsuz formülasyon ele alınmıştır.

2.2.1 Poroz Ortamdaki Akışın Boyutsuz Formülasyonu

Çalışmada yer alan yer altı modellerindeki akışın temeli, ρ yoğunluk parametresinin T sıcaklığı sebebiyle değişiminden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple modeller sıcaklığa bağlı bir yoğunluk olan Boussinesq yoğunluk kullanılarak geliştirilmiştir. Jeotermal bir akışkanın akışını boyutsuz olarak formüle edebilmek için bazı dönüşümler yapmak gerekmektedir. Bu dönüşümler aşağıda verilmiştir (Holzbecher, 1998).

$$X, Z = x, z/D \quad (2.10)$$

$$\Psi = \psi/\alpha \quad (2.11)$$

$$U, V = u, v/\left(\frac{\alpha}{D}\right) \quad (2.12)$$

$$\tau = \frac{t \alpha}{\sigma D^2} \quad (2.13)$$

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T D^3}{\alpha \nu} \quad (2.14)$$

$$Da = \frac{K}{D^2} \quad (2.15)$$

$$\theta = \frac{T - T_{soğuk}}{T_{sıcak} - T_{soğuk}} \quad (2.16)$$

$$Ra^* = Ra \cdot Da \quad (2.17)$$

Yukarıda verilen parametre değişimlerinde x, z ; X, Z sırasıyla yatay ve düşey koordinatları, Ψ ; ψ akış fonksiyonunu, u, v sırasıyla yatay ve düşeydeki Darcy hız bileşenlerini, U, V sırasıyla yatay ve düşeydeki boyutsuz Darcy hız bileşenlerini, α poroz ortamın efektif ısıl yayınma katsayısını, D poroz katmanının kalınlığını, t zamanı ve τ boyutsuz zamanı, Ra Rayleigh sayısını, Da Darcy sayısını, g yerçekimi ivmesini, β ısıl genleşme katsayısını, ΔT modelin sıcak taban duvarı ile göreceli olarak soğuk olan üst duvarı arasındaki sıcaklık farkını ($\Delta T = T_{sıcak} - T_{soğuk}$), ν kinematik viskoziteyi, K geçirimsizliği, T sıcaklığı ve θ boyutsuz sıcaklığı, Ra^* ise düzenlenmiş Rayleigh sayısını temsil etmektedir. Buna göre doygun poroz bir ortam için boyutsuz Ψ akış fonksiyonu ve θ sıcaklık fonksiyonu aşağıdaki gibidir (Holzbecher, 1998):

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = Da Ra \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Z} = \nabla^2 \theta \quad (2.19)$$

Daha önce de bahsedildiği gibi modellemelerde Boussinesq yoğunluk kullanılmıştır. Bu durumda sayısal simülasyonlarda kinematik viskozite sabit olarak alınmakta ve yoğunluk sıcaklıkla lineer fakat ters orantılı olarak değişmelidir. Bu değişimi aşağıdaki gibi ifade etmek mümkündür:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (2.20)$$

Burada ρ_0 ve T_0 referans yoğunluk ve sıcaklık değerlerini göstermektedir.

2.2.2 Rayleigh sayısı

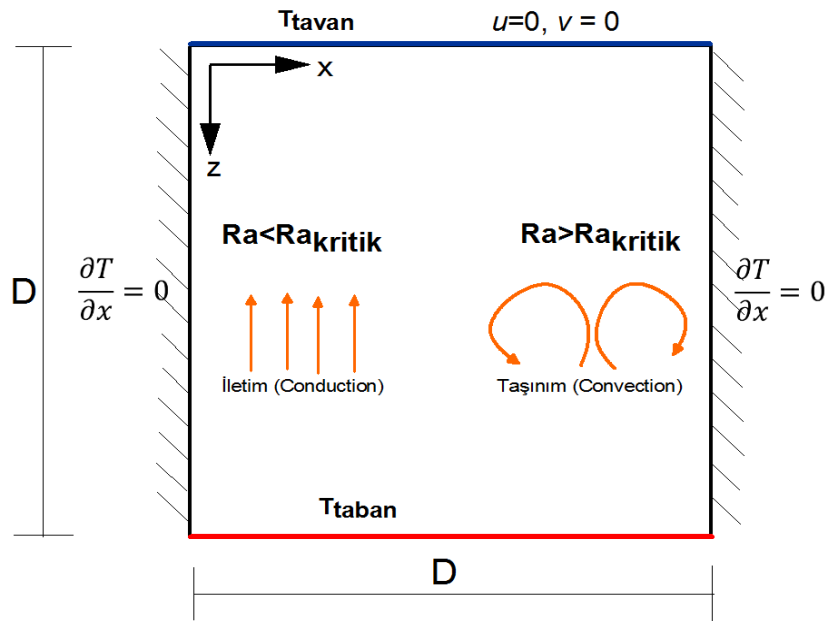
Akışkanlar mekaniğinde Rayleigh sayısı Ra bir akışkan içerisindeki ısı taşınımının karakteristiğini belirten boyutsuz bir sayıdır. Öyle ki, bu sayının değeri, söz konusu akışkanın kritik Rayleigh sayısının altında ise ısı transferi iletim yoluyla (kondüksiyon) olmakta, kritik değer aşıldığında ise ısı iletimi taşınım yoluyla (konveksiyon) olmaktadır. Rayleigh sayısı matematiksel olarak

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T D^3}{\alpha \nu} \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilir. Burada g (m/s^2) yer çekimi ivmesini, β ($^{\circ}K^{-1}$) ısıl genleşme

katsayısını, ΔT ($^{\circ}K$) sıcaklık farkını, D (m) karakteristik uzunluğu, α ($m^2 \cdot s^{-1}$) gözenekli ortamın efektif ısıl yayınma katsayısını ve ν ($m^2 \cdot s^{-1}$) ise kinematik viskoziteyi temsil etmektedir (Holzbecher, 1998).

Şekil 2.2’de söz konusu durum şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde görülen sistem kapalı ve homojen bir sistem olup, taban ve tavan duvarları sabit sıcaklık sınır koşulu ile sınırlanmıştır. Başlangıç koşulunda, yatay ve düşey yöndeki hızların sıfır olduğu görülmektedir. Yanal duvarlarda ise ısı akısının sıfır olduğu görülmektedir. Bu tür sistemlere adiyabatik (yalıtılmış) sistemler de denir.



Şekil 2.2 : Rayleigh sayısının kritik değerleri için ısı iletim yollarının şematik gösterimi.

2.3 Sonlu Hacim Yöntemi ve ANYSY FLUENT[®]

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), akışkanlar mekaniği problemlerinin analizi ve çözülmesi için sonlu elemanlar, sonlu farklar ya da sonlu hacimler yöntemi gibi sayısal yöntem ve algoritmaların kullanıldığı bir akışkanlar mekaniği bilimi dalıdır. ANYSY FLUENT, sonlu hacimler yöntemini kullanan bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çözücüsüdür.

Sonlu hacimler yöntemi, çeşitli türden korunum denklemlerinin (eliptik, parabolik ya da hiperbolik vs.), sayısal simülasyonları için oldukça uygun bir ayrıştırma yöntemidir. Bu yöntem, akışkanlar mekaniği, ısı ve kütle geçişi gibi pek çok

mühendislik alanında kapsamlı olarak kullanılmaktadır. Sonlu hacimler yönteminin önemli özellikleri, sonlu elemanlar yöntemininkine oldukça benzer. Bu yöntem yapısal ya da yapısal olmayan ağlar (mesh) ile gelişigüzel geometrilere sahip problemlere uygulanabilir ki bu yöntemi güçlü kılan özelliklerden birisidir. Yöntemin başka bir özelliği ise, sayısal akıların bölgesel korunumudur; yani sayısal akılar, bir ayrılmış hücreden bu hücreye komşu olan diğer hücreye kadar muhafaza edilir. Bu son özellik, akının önemli olduğu akışkanlar mekaniği, ısı ve kütle geçişi gibi problemlerin çözümünde sonlu hacimler yöntemini oldukça çekici kılmaktadır (Eymard, Gallouet, Herbin, 2000).

Sonlu hacimler yöntemi, kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen çözümü güç problemlerin çözümünde, bütünü belirli sayıda sonlu parçalara ayırarak çözüm üretmek amacıyla kullanılan bir ayırma yöntemidir. Sonlu sayıda hacimlere bölünen bütünün her bir parçasına korunum denklemleri uygulanır ve hesaplanacak değişkenler sonlu hacmin merkezindeki kontrol noktasındaki değer ile ifade edilirler (Versteeg, Malalasekara, 1995).

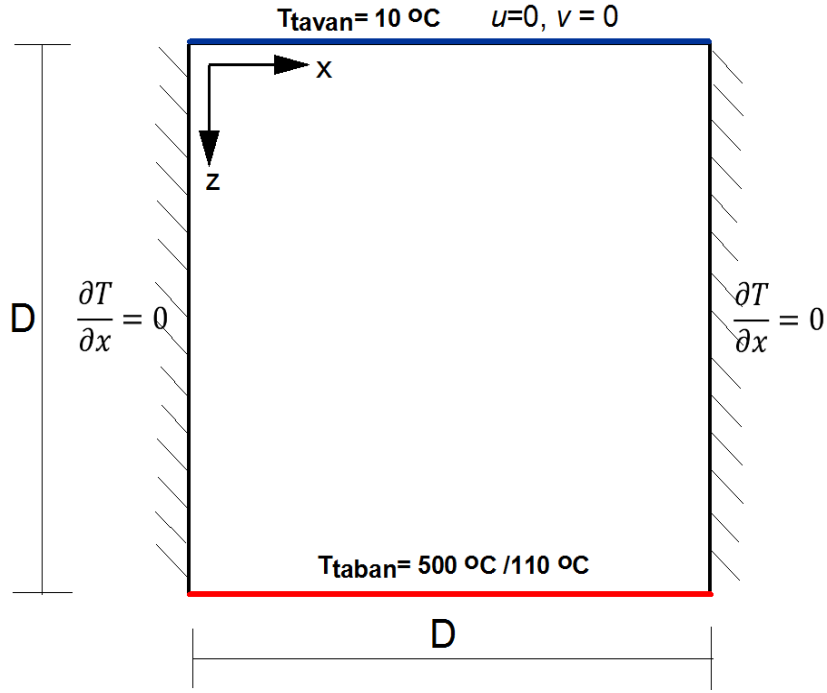
3. MODELLEME

Modelleme, gerçeğe benzer görüntüler yapmaktır. İnsanlar, bilimsel yöntemin henüz tanımlanmadığı ilk çağlardan bu yana karşılaştıkları problemlerle başa çıkma, evreni anlama ve doğaya hakim olma, daha rahat ve güvenli yaşama isteği doğrultusunda; ya sistemin kendisi üzerinde veya soyut/somut bir modeli üzerinde deneyler yapma ihtiyacı hissetmişlerdir. Modeller bizim mekanizmasını bilmediğimiz olayları anlamamıza, kurguladığımız hipotezleri test etmemize yardımcı olurlar.

Bu çalışmanın kapsamındaki modeller, belli düzgün geometrilere indirgenmiş gözenekli ortamlarda, jeotermal akışkanın akış hızı ve doğrultularını ve yer içine ait sıcaklık yapısını araştırmak amacıyla oluşturulmuştur. Modelleme, bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan ANSYS FLUENT yazılımındaki paket programlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.1 Test Modeller

Elimizdeki gerçek sismik kesitlerden elde edilmiş yer içi geometrilerine dayanan bir modelleme uygulamasından önce, gözenekli ortama ve bu ortamdaki jeotermal akışkana ait bir takım fiziksel parametreleri test etmek ve uygunluğunu onaylamak için bazı test modelleri oluşturulmuştur (Çizelge 3.1). Kullanılan tüm parametreler çalışma bölgemiz olan İzmir ve civarında yapılmış benzer çalışmalardan derlenmiştir. Şekil 3.1’de homojen, yalıtılmış, DxD boyutlarında oluşturulmuş bir model görülmektedir. Mevcut modelde, taban ve tavan duvarlarına ait sınır koşulları sabit sıcaklık sınır koşulu olarak adlandırılır ve sırasıyla 10 °C ve 110 °C /500 °C olarak belirlenmiştir.



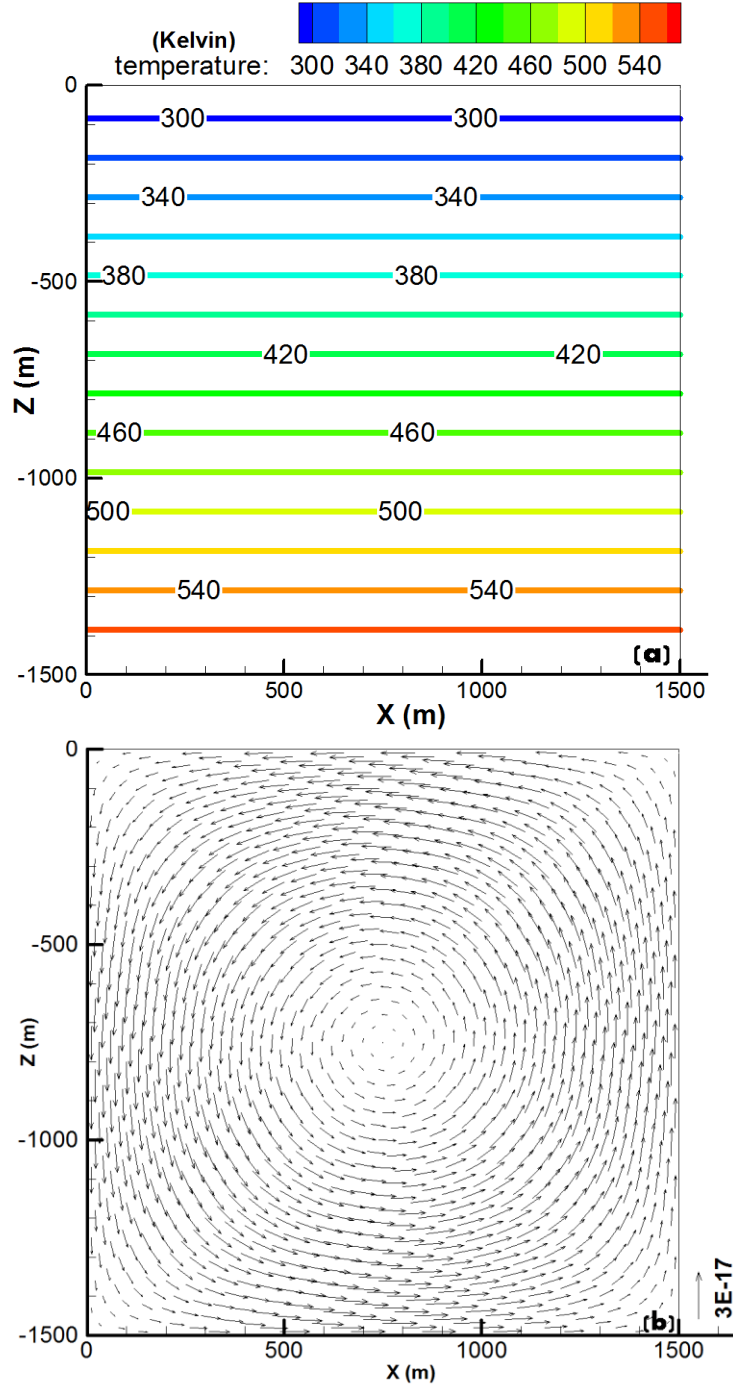
Şekil 3.1 : Homojen test modelinin başlangıç ve sınır koşullarıyla birlikte şematik gösterimi. (D=1500 m).

Çizelge 3.1 : Test modellerindeki gözenekli ortama ve bu ortamdaki akışkana ait fiziksel parametreler.

Akışkan ve Gözenekli Ortam Parametreleri	Kırık Zonu	Gözenekli Dış Ortam
Geçirgenlik K ($1/m^2$)	10^{-14}	10^{-15}
Akışkan Yoğunluk ρ (kg/m^3)	1000	1000
Isı Kapasitesi C_p ($J/kg\cdot K$)	34000	34000
Isıl İletkenlik k ($W/m\cdot K$)	2.5	2.5
Viskozite μ ($kg/m\cdot s$)	$5e^{-5}$	$5e^{-5}$
Isıl Genleşme Katsayısı β ($1/K$)	2.07×10^{-3}	2.07×10^{-3}

Çizelge 3.1’de verilmiş olan parametreler ile Şekil 3.1 de şematik olarak gösterilen modele ait sıcaklık ve akış modelleri Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’te verilmiştir. Şekil 3.2’de taban sıcaklığı $T_{taban}=300\text{ }^{\circ}C=573\text{ }^{\circ}K$ olarak alınmıştır. Sıcaklık izotermlerine bakıldığında ısının iletim yoluyla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi verilen

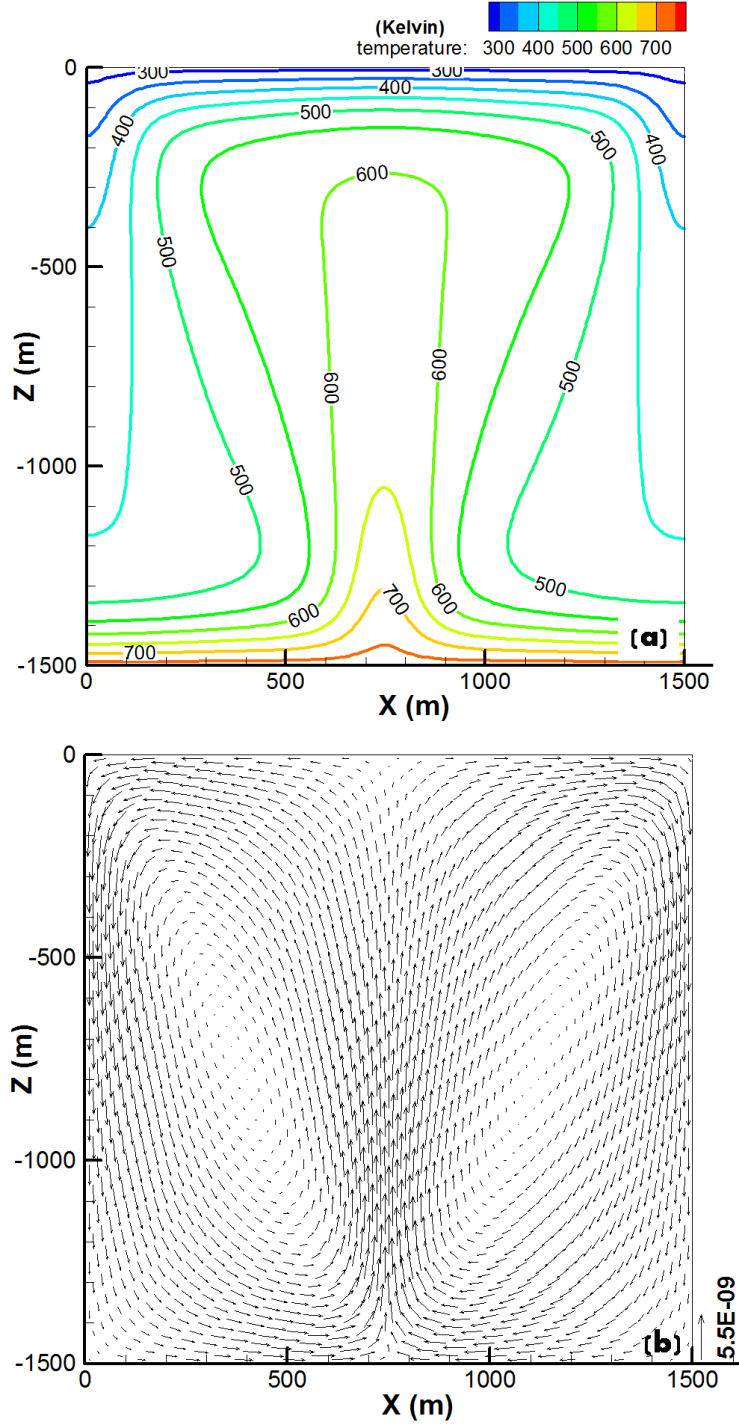
başlangıç taban sıcaklığının taşınımı başlatamayacak kadar düşük olmasıdır. Bir başka deyişle Rayleigh sayısının kritik değeri aşılmadığından ortamdaki ısı iletim kondüktif şekilde olmaktadır.



Şekil 3.2 : Homojen test modeline ait eş sıcaklık eğrileri (a), Darcy hızı vektörleri (b)

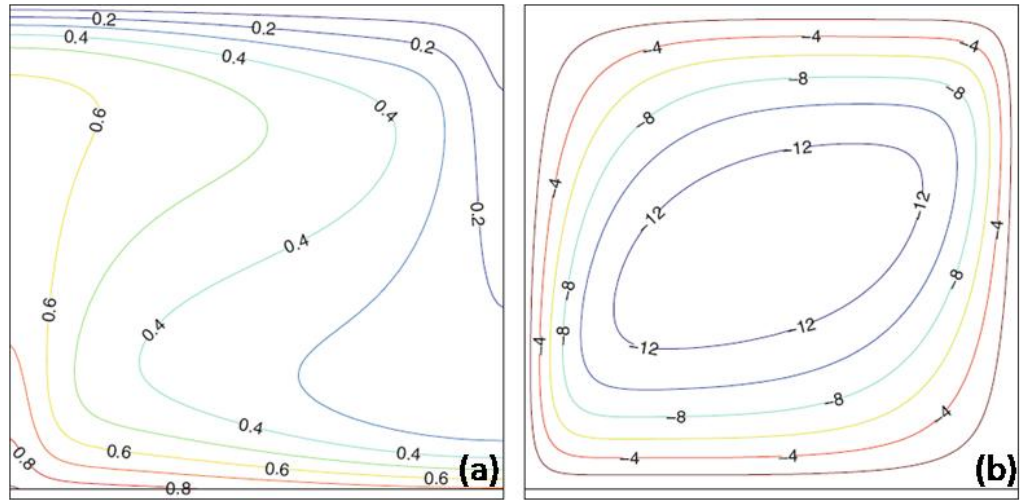
Şekil 3.3’de taban sıcaklığı $T_{taban}=500\text{ }^{\circ}\text{C}=773\text{ }^{\circ}\text{K}$ olarak alınmıştır. Sıcaklık izotermlerine bakıldığında, bir önceki modelin aksine, eş sıcaklık eğrilerinin bükülerek tabakanın içlerine kadar bir sokulum yaptığı görülmektedir. Bu durum, ısının akışkan sıvının taşınımı sebebiyle meydana gelmektedir. Bunun sebebi verilen

başlangıç taban sıcaklığının taşınımı başlatacak kadar yüksek olmasıdır. Nitekim şekil 3.3 (b)'de görülen Darcy hız vektörlerinin, iki adet birbirine simetrik ve eş taşınım hücresi oluşturduğu görülmektedir. Bir başka deyişle Rayleigh sayısının kritik değeri aşıldığından ortamdaki ısı iletim konvektif şekilde olmaktadır.

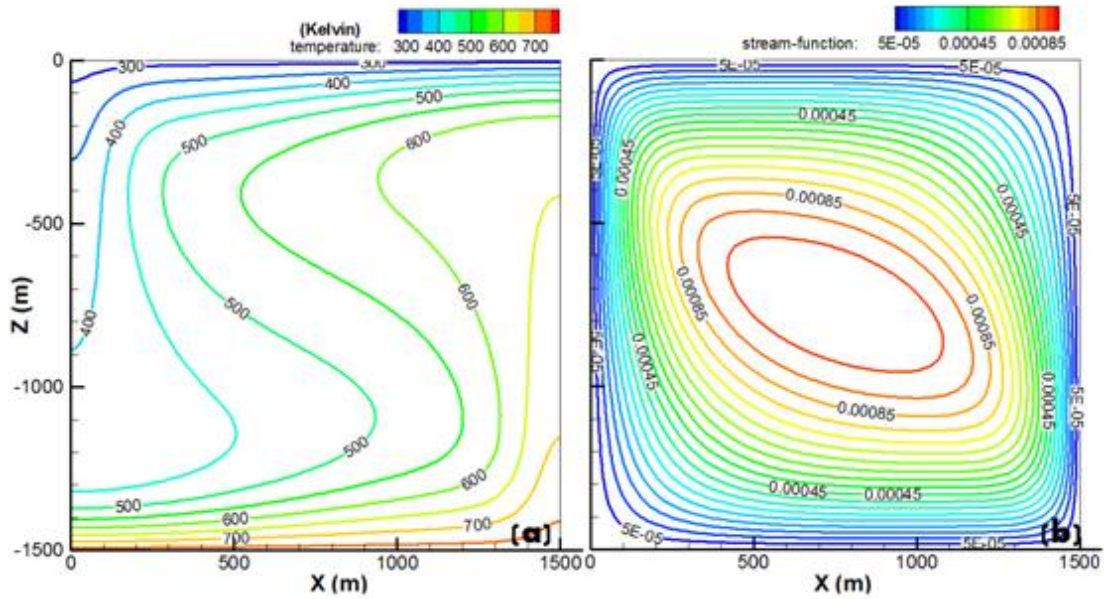


Şekil 3.3 : Homojen test modeline ait eş sıcaklık eğrileri (a), Darcy hız vektörleri (b).

Bu türden temel test modellerini benzer çalışmalar ile kıyaslamak, çalışmada yapılacak daha karmaşık modellemelerde doğru parametrelerin kullanılıp kullanılmadığını sınamak için oldukça önemlidir. Bu sebeple çalışma için derlenen parametreler Saleh (2011)'in benzer bir modelleme çalışmasıyla kıyaslanmıştır. Şekil 3.4'te yüksek Rayleigh sayılı ($Ra=500$) bir modele ait eş sıcaklık eğrileri ve akış fonksiyonu (stream function) görülmektedir. Şekil 3.5'te ise bu çalışma için derlenen yer içi parametreleriyle, Şekil 3.4'teki model baz alınarak yeni bir modelleme yapılmış ve benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

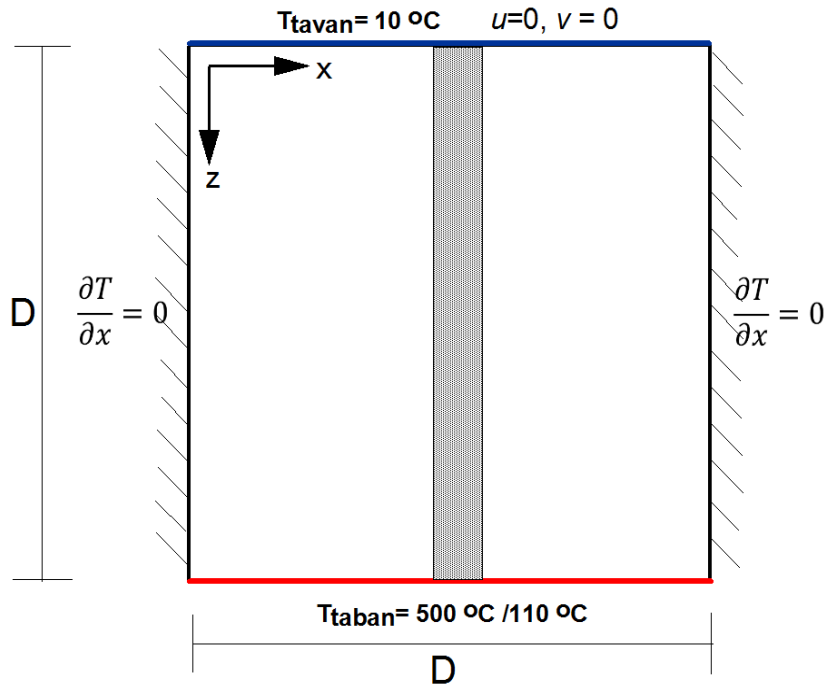


Şekil 3.4 : DxD boyutlarında homojen bir model için (a) eş sıcaklık eğrileri ve (b) akış fonksiyonu $Ra=500$ (Saleh H. ve diğ., 2011).



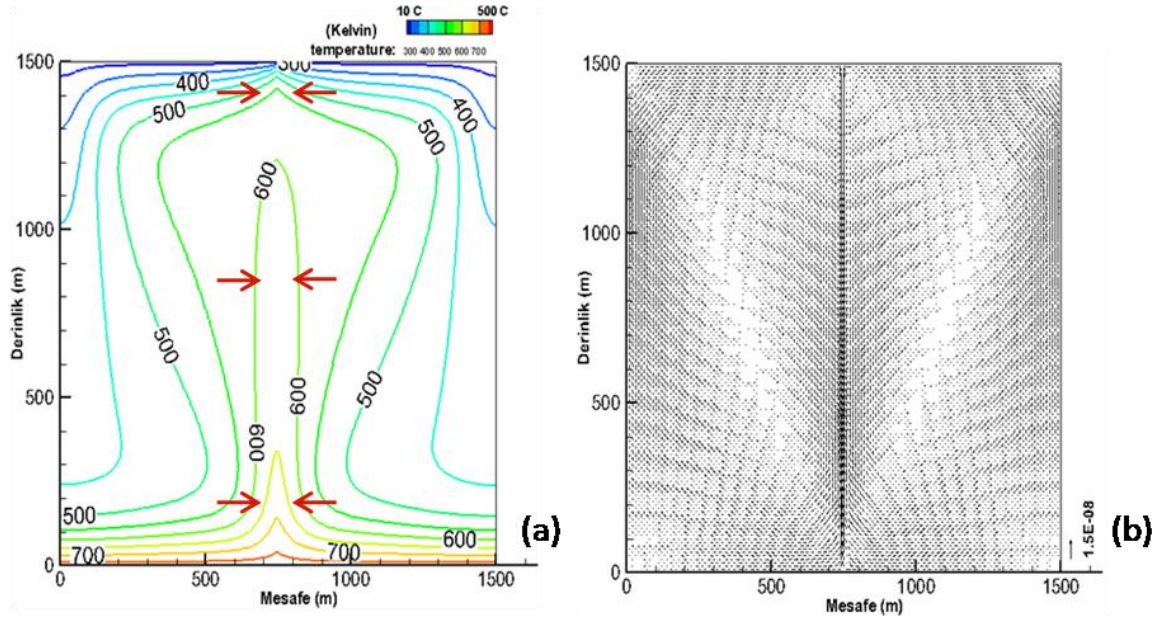
Şekil 3.5 : DxD boyutlarında homojen bir model için (a) ve sıcaklık eğrileri ve (b) akış fonksiyonu ($Ra=500$).

Şekil 3.6’da homojen modele bir adet yüksek geçirimli fay zonu eklenmiştir. Bu durumda model artık homojen bir yer içi yapısını sahip değildir. Bu türden bir yer içi yapısına aynı başlangıç ve sınır koşulları uygulanırsa, eş sıcaklık eğrilerinin yüksek geçirimli fay zonuna yaslanması öngörülür. Darcy hız vektörlerinin ise dış ortama göre daha geçirgen olan fay zonu boyunca en büyük değerlerine ulaşması beklenir. Bahsi geçen modelde dış ortamın geçirimsizliği $k_{dış}=10^{-15} \text{ m}^2$ ve $k_{fay}=10^{-14} \text{ m}^2$ olarak alınmıştır.

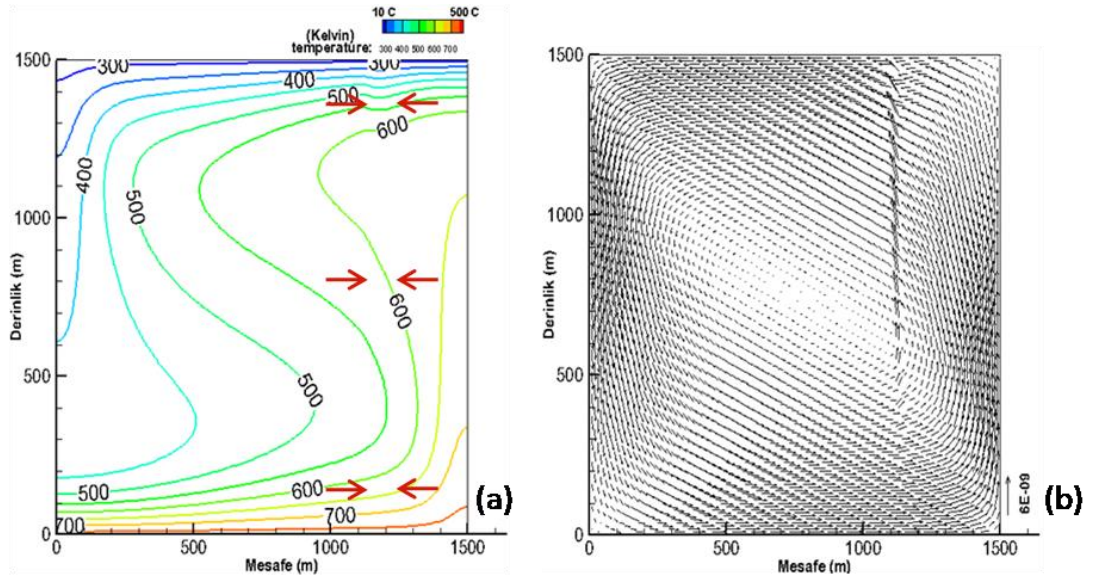


Şekil 3.6: Yüksek geçirimli bir fay zonu içeren test modelinin şematik gösterimi (D=1500 m).

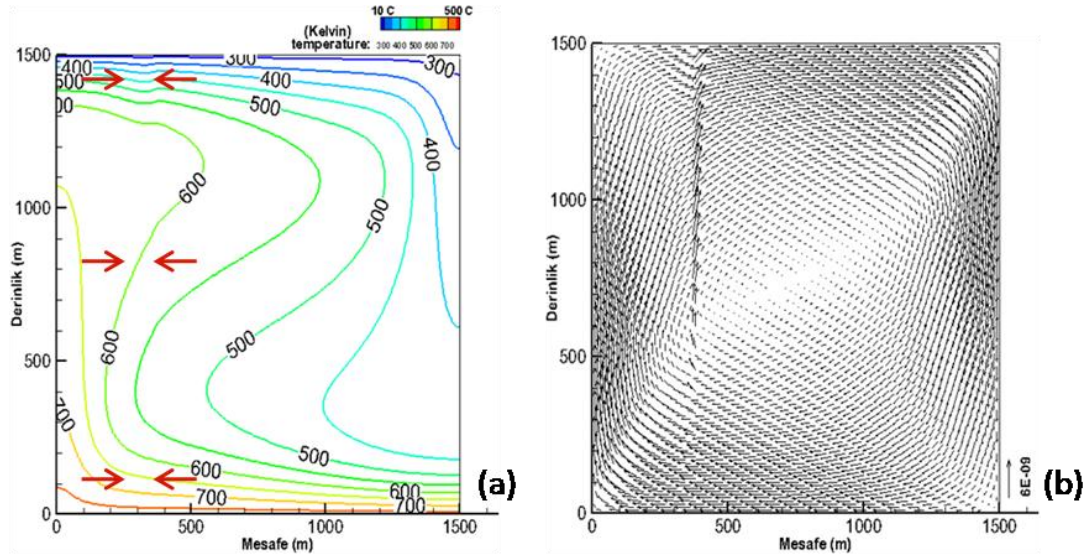
Darcy hız vektörlerinin konum ve büyüklükleri, fay zonunun konumuna göre değişiklik göstermektedir (Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9) Bu durum, modellemede fay zonlarının konumunun ne derece önemli olduğunu kanıtlamaktadır. Bu sebeple, çalışmamız kapsamında kullanılan yer içi geometrilerinin, gerçek sismik kesitlerden alınarak oluşturulmuş olması, gerçeğe en yakın modelleri oluşturma amacımıza büyük katkı sağlamıştır. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da 10 m kalınlıklı, geçirimsizliği dış ortama göre 10 kat daha fazla olan kırığın, farklı konumlarda olması durumundaki eş sıcaklık eğrileri ve Darcy hız vektörleri görülmektedir.



Şekil 3.7 : Ortada konumlanmış 10 m genişlikli kırık için eş sıcaklık eğrileri (a) ve Darcy hız vektörleri (b).



Şekil 3.8 : Sağda konumlanmış 10 m genişlikli kırık için eş sıcaklık eğrileri (a) ve Darcy hız vektörleri (b).



Şekil 3.9 : Sağda konumlanmış 10 m genişlikli kırık için eş sıcaklık eğrileri (a) ve Darcy hız vektörleri (b).

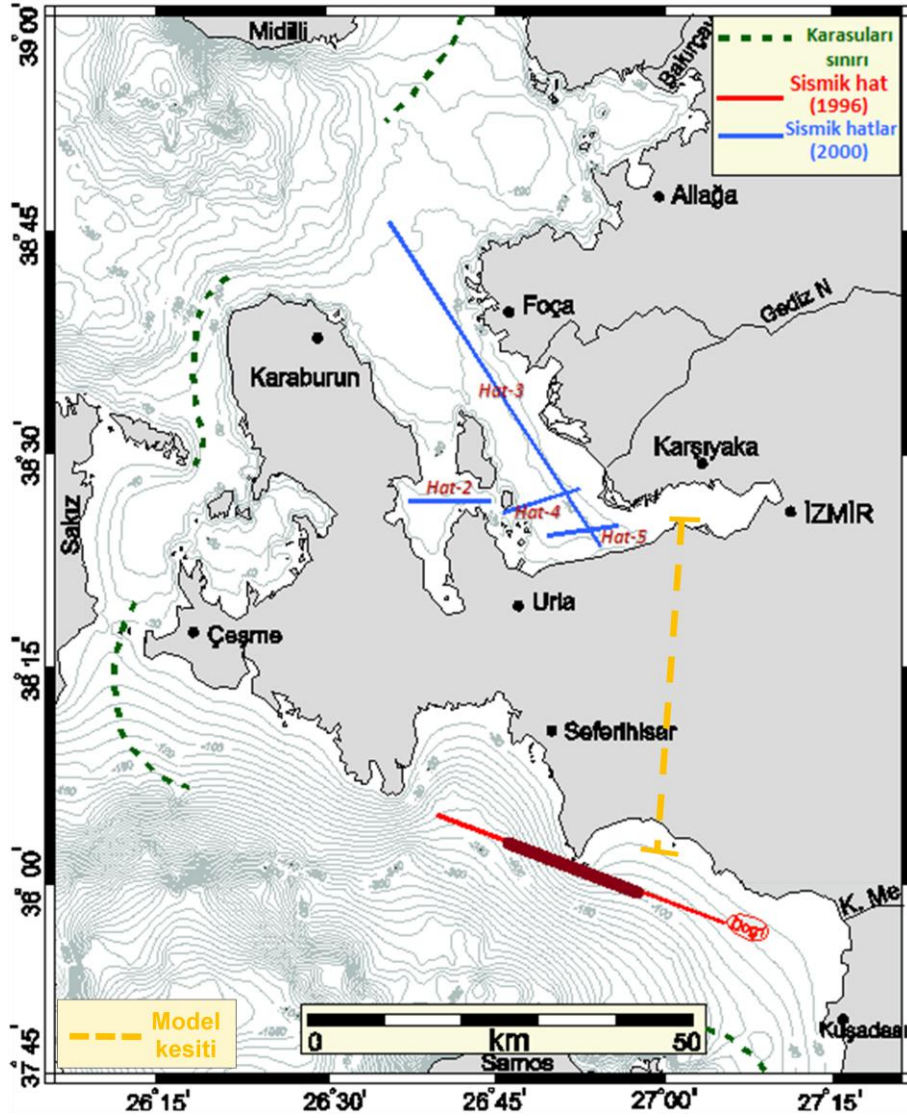
Şekillerde eş sıcaklık eğrilerinin, yüksek geçirimli kırığa doğru yaslandığı görülmektedir. Aynı zamanda kırığın geçtiği konumda, eş sıcaklık eğrilerinin seviyesinde bir miktar konveksiyonel eğilim görülmektedir. Bunun sebebi yüksek geçirimli bir bölge olan kırık bölgesinin soğumaya katkı sağlamış olmasıdır. Her iki şekilde de benzer bir rejim gösteren Darcy hız vektörlerine bakıldığında ise, kırık boyunca izlenebilen, ortamdakine göre hızlı bir akış gözlemlemek mümkündür. Modellerimizde homojen olarak kabul ettiğimiz bir ortama (Şekil 3.1), yüksek geçirimli bir kırık koyulduğunda, akışta meydana gelen değişim Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da açıkça görülmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda fayların, ısı iletimini ve yer içi akışkanlarının akışını kontrol eden çok önemli jeomorfolojik yapılar olduğunu söylemek mümkündür. Dolayısıyla, bu tezin konusu olan bölgede yapılmış sismik yansıma çalışmalarından elde edilen fayların ve sıcak su çıkışlarının meydana getirdiği düşünülen formasyon bozuşmalarının konumları oldukça önemlidir. Bu tez kapsamında oluşturulan modellerin gerçeğe yakınlığı, bölgede yapılan sismik yansıma çalışmalarından elde edilen sismik kesitlerin yorumlarıyla birlikte irdelenecektir.

4. ÇALIŞMA BÖLGESİNDE YAPILAN SICAKLIK VE AKIŞ MODELLEMELERİ

Modelleme yaptığımız çalışma bölgesini kabaca deniz ve kara olmak üzere iki bölgeye ayırmak mümkündür. Çalışma denizde İzmir, Gülbahçe ve Sığacık Körfezleri'ni, karada ise Balçova ve Seferihisar Horstu'nu içine alan bölgede yapılmıştır. Modellemenin deniz kısmında, 2000 yılında MTA Sismik-1 gemisiyle bölgeden toplanmış tek ve çok kanallı sismik yansıma verilerinin stratigrafik yorumlarından ve yansıma gücü kesitlerinden faydalanılmıştır (Altan, 2014 ve Ocakoğlu, 2005). Balçova ve Seferihisar Horstu'nu içeren kara kısmında ise Magri'nin (2010) aynı bölgede yaptığı, akış ve ısı taşınımı simülasyonlarından oluşan çalışması referans alınmış, bölgeye ait permeabilite, porozite, ısıl iletkenlik, hacimsel ısı kapasitesi gibi yer içi parametreleri derlenmiştir. Yer içine ait sıcaklık değerleri ise Serpen'in (2004) Balçova jeotermal alanında yaptığı çalışmadan derlenmiştir. Balçova jeotermal sahasında açılmış mevcut kuyulardan elde edilen sıcaklık logları kullanılarak modele ait sıcaklık sınır koşulları belirlenmiştir. Şekil 4.1'te modellemede kullanılan sismik hatlar ve modellemenin kara kısmının konumu gösterilmektedir. Şekildeki mavi hatlar 2000 yılında, kırmızı renk ile temsil edilen DOG1 hattı ise 1996 yılında yapılmış sismik çalışmalardan elde edilmiştir. Çalışma kapsamında DOG1 hattının üzerinde koyu kırmızı renk ile gösterilen bölgenin sismik kesiti üzerinde çalışılmıştır. Aynı şekilde kesikli sarı çizgi ile temsil edilen kesit kara kısmında yapılan modelleme hattını göstermektedir.

Tez çalışmasının bu kısmında Altan (2014) ve Ocakoğlu'nun (2005) stratigrafik yorumlamalarından elde edilen yer içi geometrileri ve Magri'den (2010) derlenen fiziksel parametreler bir araya getirilerek özgün sıcaklık ve akış modelleri oluşturmaya çalışılmıştır. Bölgenin jeotermal potansiyelinin dikkat çekici olması, çalışma amacının yalnızca modelleme ile sınırlanmasına müsaade etmemiş, bu jeotermal potansiyelin de incelenmesini sağlamıştır. Nitekim karada var olan olduğu bilinen jeotermal alanların, deniz içinde uzantılarının olup olmadığı hala tartışılmaktadır. Çalışmanın hem denizde hem de deniz kısmına yakın bir kara

bölgesinde yapılmış olması, mevcut jeotermal alanları içerisinde bulunduran sistemin denizde devamlılığı olup olmadığı konusunda tartışmayı olanaklı hale getirmiştir.



Şekil 4.1 : Çalışma bölgesinin batimetrik haritası. Modellemenin deniz kısmında kullanılan sismik hatlar ve kara kısmının konumu mavi ve kırmızı çizgilerle gösterilmiştir (Ocañoğlu ve diğ., 2005'ten değiştirilmiştir.).

4.1 İzmir, Gülbahçe Ve Sığacık Körfezleri'nde Yapılmış Sıcaklık Ve Akış Modellemeleri

Bu modellemenin temelleri, bahsi geçen bölgelerde yapılmış sismik yansıma çalışmalarından alınan verilerdir. Bu veriler Altan (2014) tarafından yorumlanmış ve yorumlama sonucunda ortaya çıkan fay zonları, bu zonlardaki fayların konumu, ana kaya ve rezervuar kayaların derinlikleri gibi bilgiler model geometrisi oluşturmak

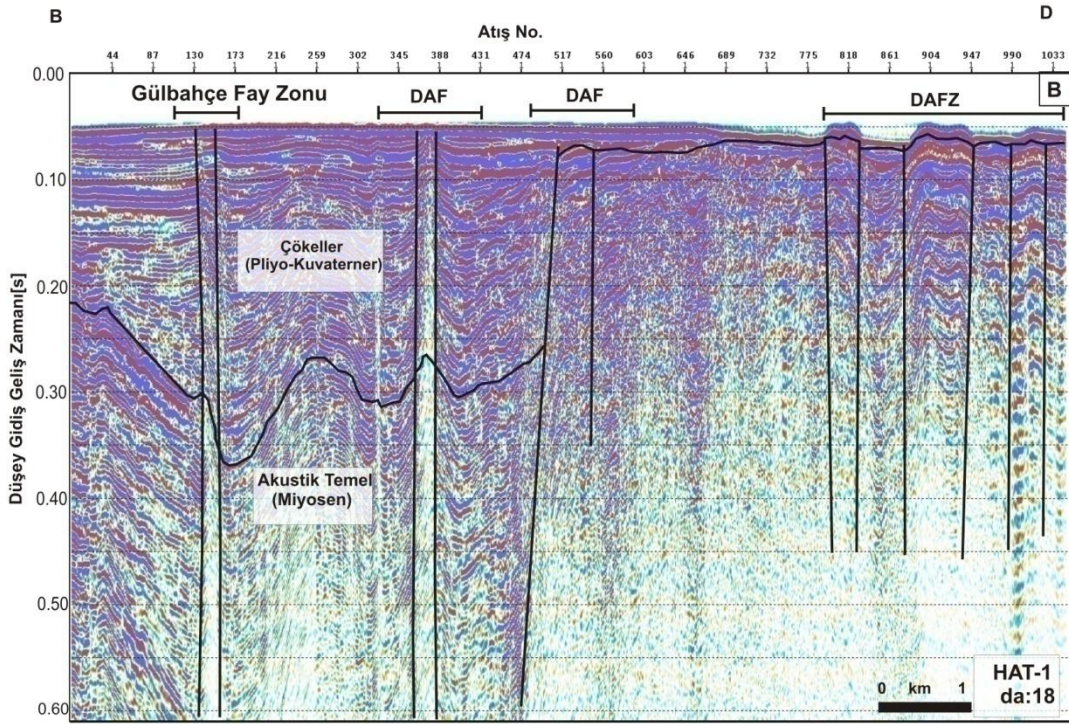
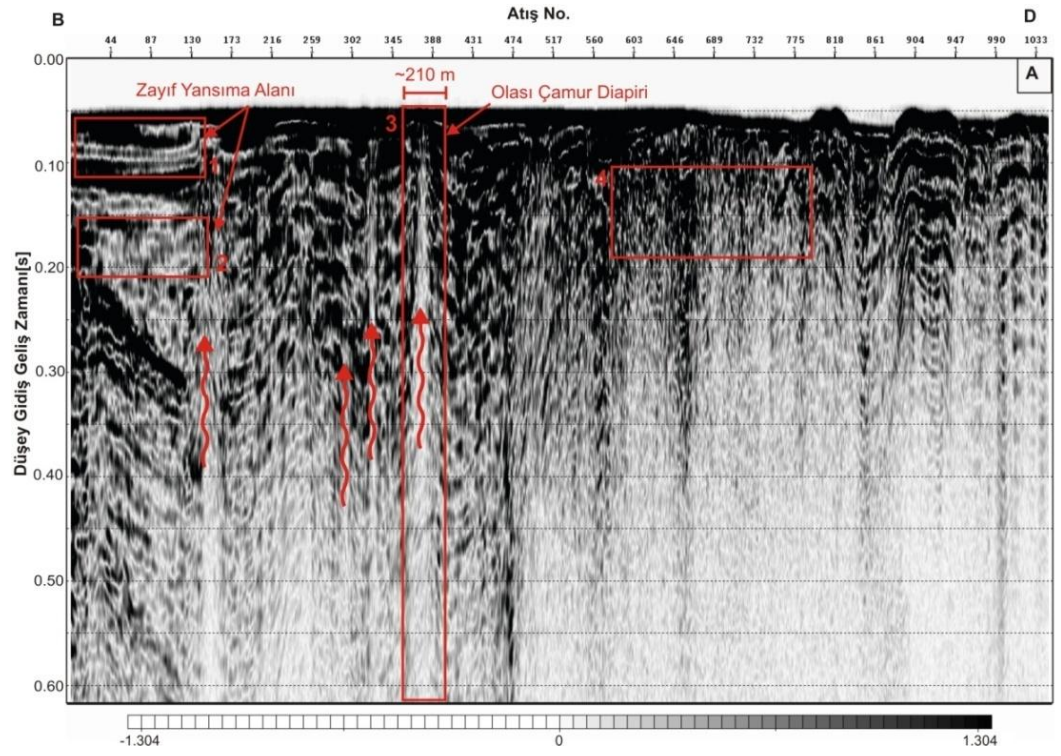
için kullanılmıştır. Şekil 4.1’te görüldüğü gibi modellemede 6 adet hat kullanılmıştır. Bu hatlar sırasıyla hat-2, hat-3, hat-4, hat-5 ve DOĞ1 hattıdır. Hatların uzunluk ve derinlik değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Modellere ait sabit sıcaklık sınır koşulları ise hem Serpen’in (2004) hem de Magri’nin (2010) çalışmalarından derlenmiş ve genel bir yaklaşımla bölgedeki belirli derinlikler için belirli sıcaklık değerleri kabul edilmiştir.

Çizelge 4.1 : Modellemede kullanılan sismik hatların uzunluk ve derinlik değerleri.

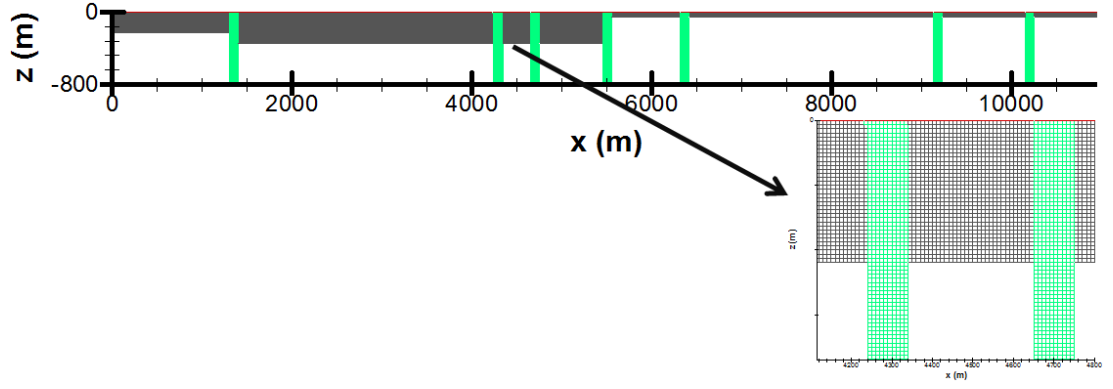
Sismik Hat	Uzunluk (m)	Derinlik (m)
Hat-2	11000	800
Hat-3	27860	1300
Hat-4	8710	1300
Hat-5	9560	1300
DOG1	20260	2390

4.1.1 Hat-2’ye ait sıcaklık ve akış modelleri

Hat-2 Gülbahçe Körfezi’nin kuzeyinde ve D-B uzanımlı bir hattır. Bu hatta ait yansıma gücü kesiti ile yapısal ve stratigrafik yorum Şekil 4.2’de verilmiştir. Yapısal ve stratigrafik yorumlarda ortaya konmuş faylar model geometrisinde 100 m kalınlıklı fay zonları olarak temsil edilmiştir. Fay zonları poroz ortam içerisinde permeabilite farkı ile temsil edilmiştir. Çevre kayalarda permeabilite değeri $10^{-15} m^2$ olarak alınmışken, fay zonları içerisinde permeabilite değeri $10^{-14} m^2$ ’dir. Bu değerler literatürde yer alan daha önce yapılmış çalışmalar ile uyum göstermektedir (örn.Magri ve diğ., 2010). Şekil 4.3’te ise Hat-2’den elde edilen derinlik, fay konumları, havza çökellerinin kalınlığı, akustik temel ve su kolonu kalınlığı dikkate alınarak oluşturulmuş model geometrisi (mesh) görülmektedir. Model geometrisi 88000 adet dikdörtgensel sonlu hacim elemanı (cell) ve bu elemanları birbirine bağlayan 89181 adet düğüm noktasından (node) oluşmaktadır. Geometri ağının rezolüsyonu 10 m’dir.



Şekil 4.2 : A) Hat-2'ye yansıma gücü kesiti B) Hat-2'nin yapısal ve stratigrafik yorumu (Altan, 2014).



Şekil 4.3 : Hat-2'ye ait modelin ağ (mesh) geometrisi.

Çizelge 4.2'de ise hat-2'ye ait modelde kullanılmış başlangıç ve sınır koşulları verilmiştir. Modelin yer içi parametreleri ise önceki bölümlerde Çizelge 3.1'te verilmiştir. Şekil 4.3'te verilmiş model geometrisinde gri renk ile temsil edilen kısım havza çökellerini temsil etmekte ve porozite değeri ana kayaya göre 10 kat fazla alınmıştır.

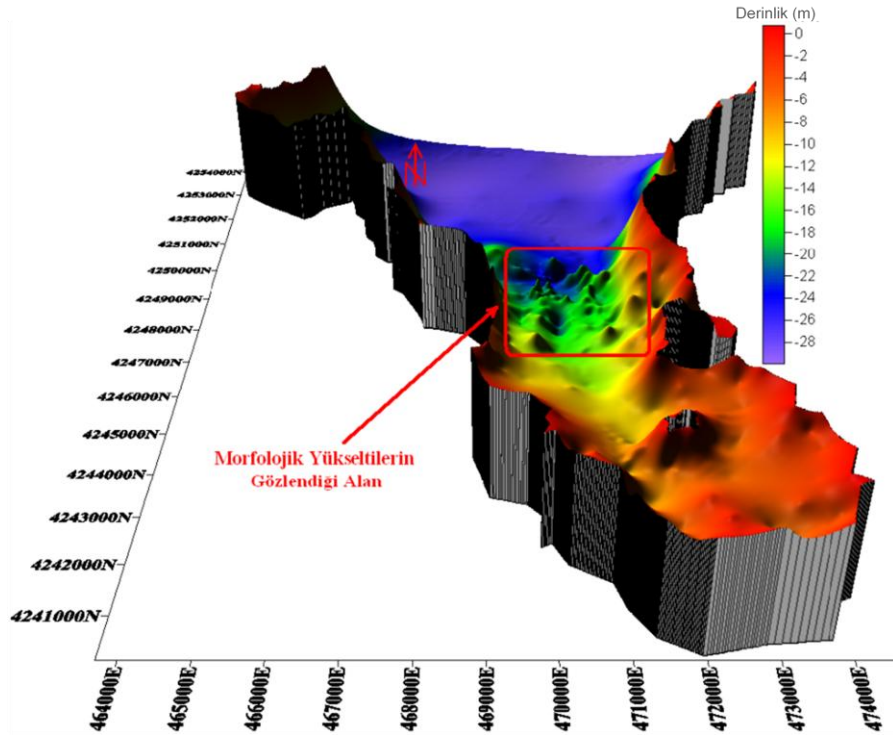
Çizelge 4.2 : Hat-2 modeline ait başlangıç ve sınır koşulları.

Başlangıç ve sınır koşulları	Değerler
Taban duvarı sıcaklığı (°C)	100
Tavan sıcaklığı (°C)	10
Su kolonu basıncı (Pa)	473725
Sağ duvar koşulu	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$
Sol duvar koşulu	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$

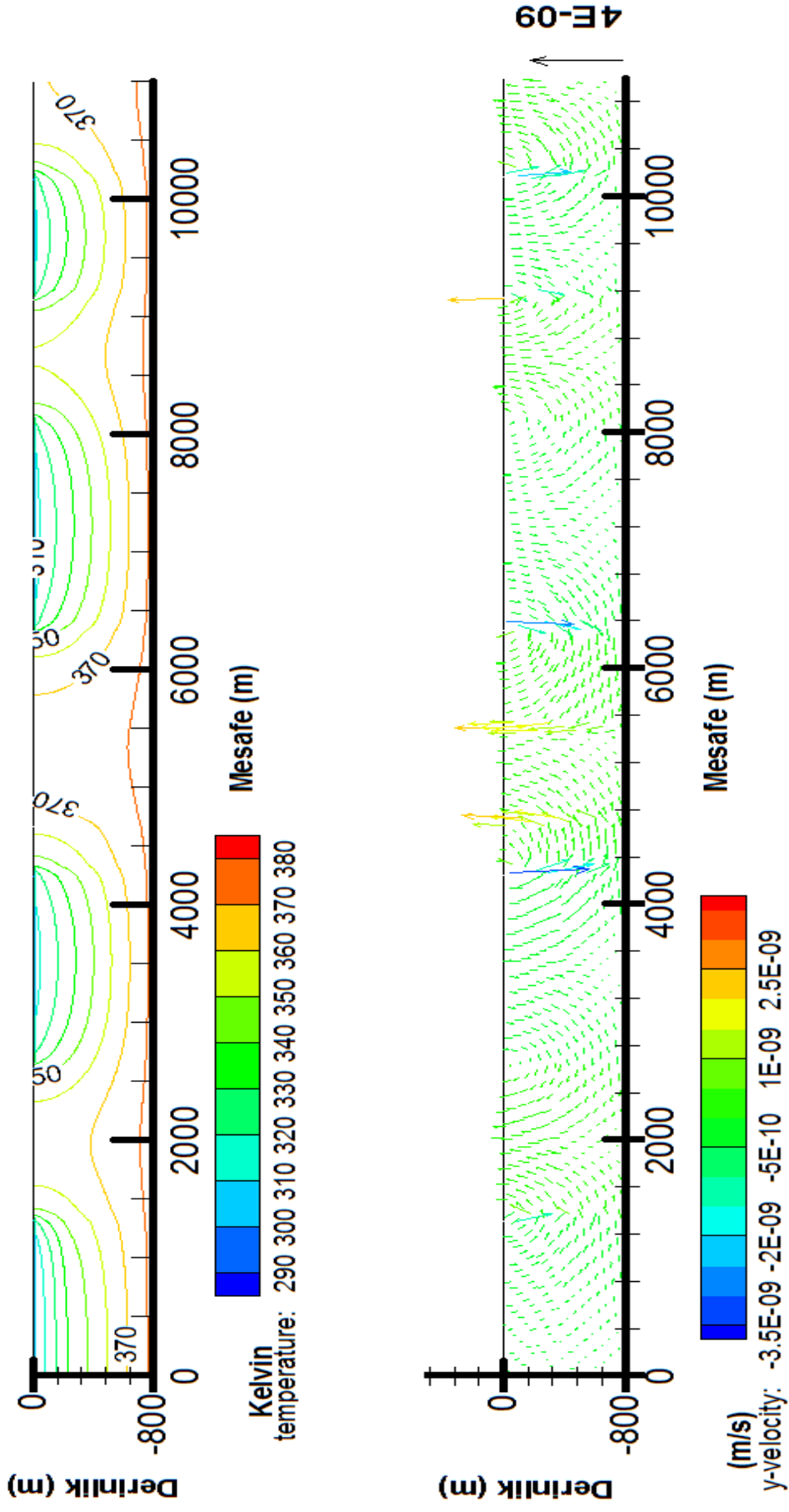
Gülbahçe Körfezi'nin kuzeyinde bulunan D-B uzanımlı bu model üstü açık (open-top) bir modeldir. Bu sebeple deniz suyu basıncı bir başlangıç koşulu olarak modele tanıtılmıştır. Sismik hatlardan deniz suyu kolonu 38 m olarak hesaplanmıştır. Basıncı koşulu deniz tabanından akışkan giriş ve çıkışlarını kontrol eden önemli bir parametredir. Aynı zamanda, üstten uygulanan basınç jeotermal akışkanın akış rejimini ve dolayısıyla eş sıcaklık eğrilerini de etkilemektedir.

Şekil 4.5'te hat-2'ye ait kararlı haldeki (steady-state) sıcaklık ve hız modeli görülmektedir. Yumuşak bir sıcaklık dağılımı gösteren modelde, belli başlı yerlerde görece olarak hızlı akışkan çıkışları gözlenmiştir. Akışkanın hızı m/s cinsinden $10^{-9} - 10^{-10}$ mertebesinde. Bu değer literatürde yer alan benzer çalışmalarla uyumluluk göstermektedir (örn. McKenna ve diğ., 2004). Sismik kesitte, havza çökelleri içerisinde olası çamur diapiri olarak yorumlanan kısımda hem diapiri sınırlayan faylar boyunca hem de bölgede var olan diğer faylar boyunca deniz tabanına doğru çıkan çamur ve olası gaz/su çıkışları kırmızı oklarla gösterilmiştir. Akışkan çıkışının görüldüğü bölgeler, Altan'ın (2014) stratigrafik yorumunda gaz/su çıkışı olarak yorumladığı bölgeyle uyum içerisinde görünmektedir.

Pekçetinöz (2010), Gülbahçe Körfezi içerisinde yaptığı çalışmada, Gülbahçe Körfezi'nin en önemli batimetrik yapısının körfezin orta kesiminde yer alan ve 'Morfolojik Yükselti' olarak adlandırılan bir takım yükselimlerin oluşturduğunu belirtmiştir. Bu yükselimleri belirleyen eş derinlik eğrilerinin körfezin orta kesiminde, doğu-batı eksenini boyunca konik şekilli bir görünüm verdiği net bir şekilde izlenebilmektedir (Şekil 4.4). Aynı çalışmada, yükselti yapılarının körfezin civarında yer alan sıcak ve soğuk çıkışların olduğu alanda izlenmesi dikkat çekici bir özellik olarak verilmiştir (Pekçetinöz, 2010) .



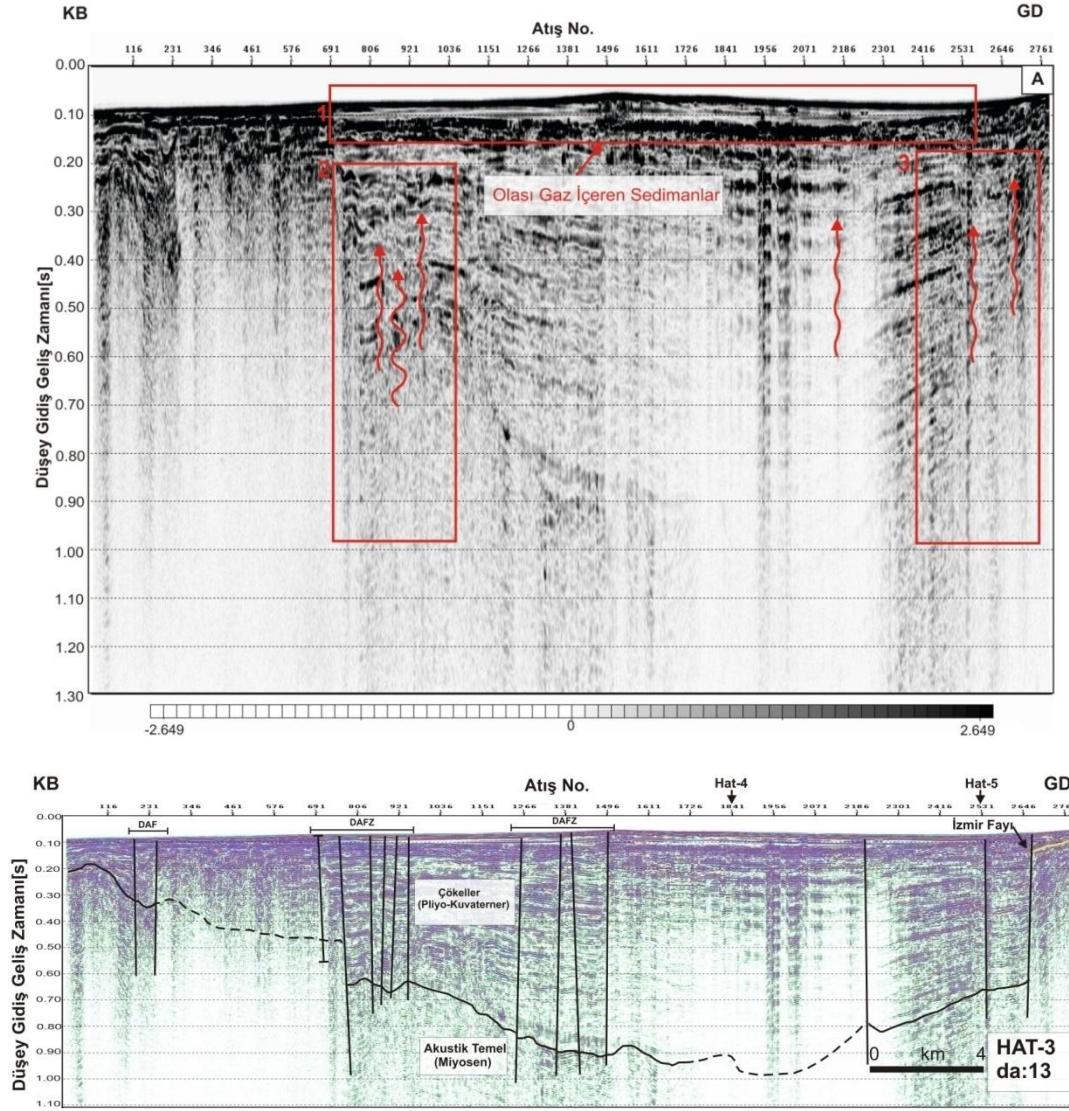
Şekil 4.4 : Gülbahçe Körfezi'nin üç boyutlu görünümü (Pekçetinöz, 2010).



Şekil 4.5 : Hat-2'ye ait (a) sıcaklık ve (b) Darcy hızı modelleri.

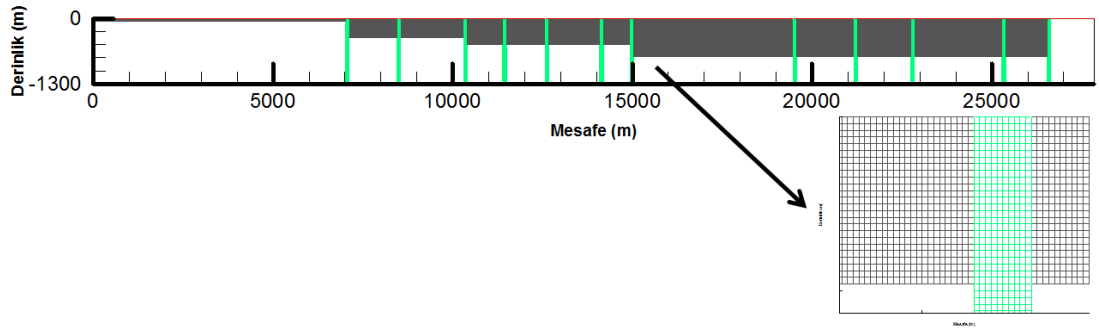
4.1.2 Hat-3'e ait sıcaklık ve akış modelleri

Hat-3 İzmir Körfezi içerisinde KB-GD uzanımlı bir hattır. Bu hatta ait yansıma gücü kesiti ile yapısal ve stratigrafik yorum Şekil 4.6'de verilmiştir.



Şekil 4.6 : A)Hat-3'e ait yansıma gücü kesiti B)Hat-3'ye ait yapısal ve stratigrafik yorum (Altan, 2014).

Şekil 4.7'da ise Hat-3'den elde edilen derinlik, fay konumları, havza çökellerinin kalınlığı, akustik temel ve su kolonu kalınlığı dikkate alınarak oluşturulmuş model geometrisi görülmektedir. Şekildeki gri alanlar havza çökellerini, parlak yeşil renkli kısımlar ise yüksek geçirimli fayları göstermektedir. Model geometrisi 362180 adet dikdörtgensel sonlu hacim elemanı (cell) ve bu elemanları birbirine bağlayan 365097 adet düğüm noktasından (node) oluşmaktadır. Geometri ağının rezolüsyonu 10 m'dir.



Şekil 4.7 : Hat-3'e ait modelin ağ (mesh) geometrisi.

Model geometrisinde parlak yeşil renkte görülen fay zonları 100 m kalınlıktır. Geçirgenlik parametresiyle ortamdan ayrılan fay zonlarının permeabilite değeri $10^{-14} m^2$ iken, ortam permeabilitesi $10^{-15} m^2$ olarak alınmıştır.

Çizelge 4.3'de ise hat-3'e ait modelde kullanılmış başlangıç ve sınır koşulları verilmiştir. Modelin yer içi parametreleri ise önceki bölümlerde Çizelge 3.1'te verilmiştir. Şekil 4.7'da verilmiş model geometrisinde gri renk ile temsil edilen kısım havza çökeklerini temsil etmekte ve porozite değeri ana kayaya göre 10 kat fazla alınmıştır.

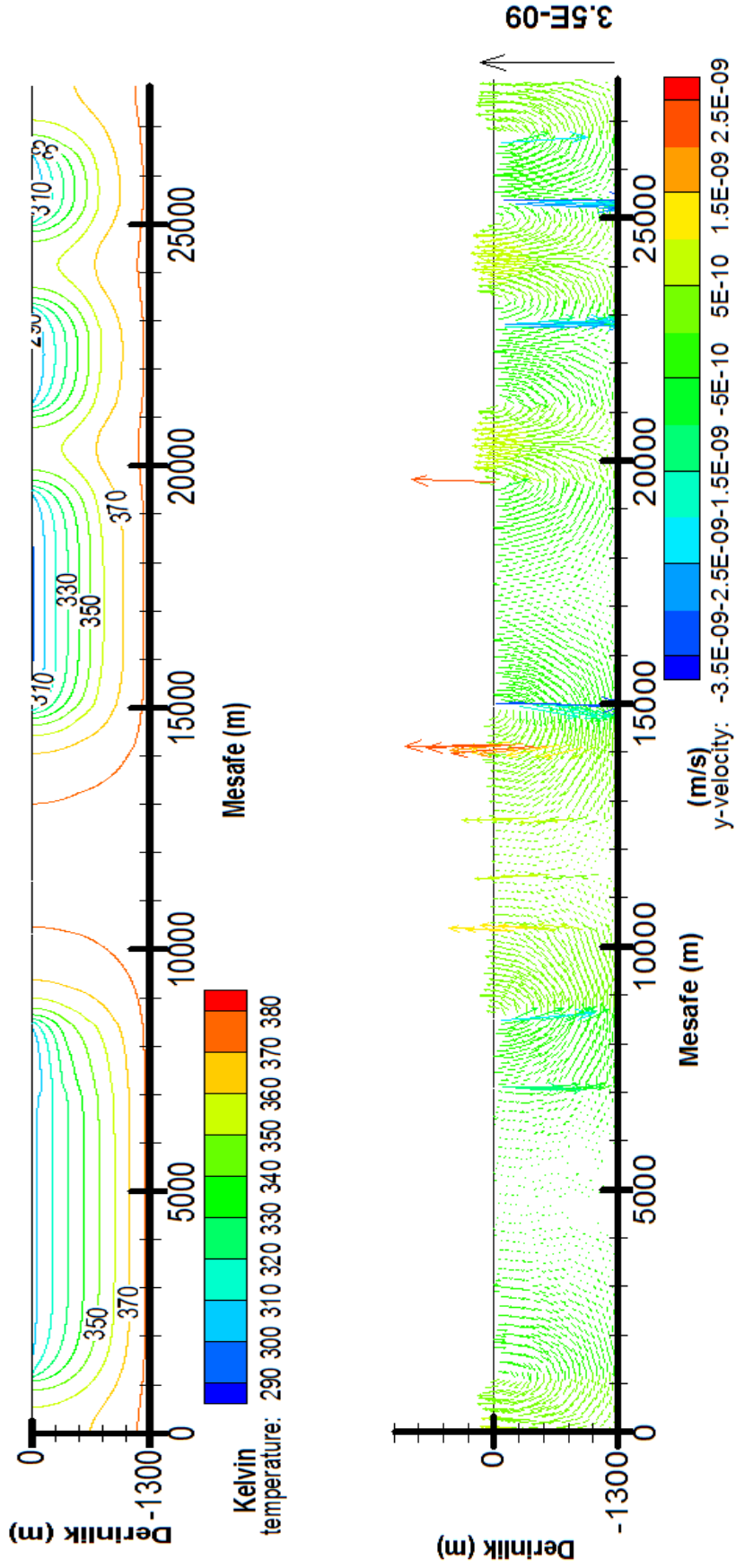
Çizelge 4.3 : Hat-3 modeline ait başlangıç ve sınır koşulları.

Başlangıç ve sınır koşulları	Değerler
Taban duvarı sıcaklığı ($^{\circ}C$)	110
Tavan sıcaklığı ($^{\circ}C$)	10
Su kolonu basıncı (Pa)	604087
Sağ duvar koşulu	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$
Sol duvar koşulu	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$

İzmir Körfezi içerisinde bulunan KB-GD uzanımlı bu modelimiz de üstü açık (open-top) bir modeldir. Bu sebeple deniz suyu basıncı bir başlangıç koşulu olarak modele

tanıtılmıştır. Sismik hatlardan deniz suyu kolonu 50 m olarak hesaplanmıştır.

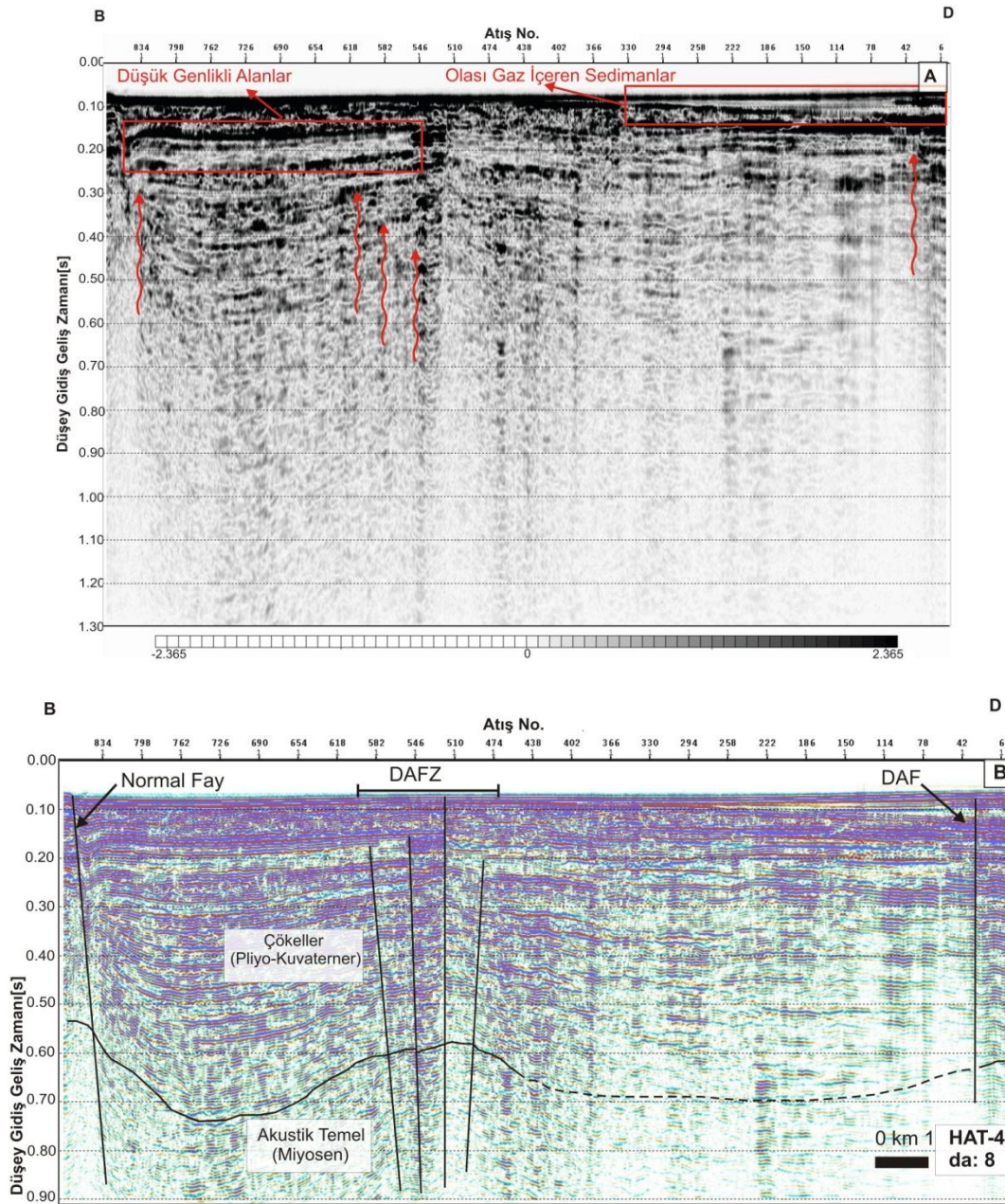
Şekil 4.8'te hat-3'e ait kararlı haldeki (steady-state) sıcaklık ve Darcy hızı modeli görülmektedir. Yumuşak bir sıcaklık dağılımı gösteren modelde, belli başlı yerlerde görece olarak hızlı akışkan çıkışları gözlenmiştir. Bu hızlar hızı m/s cinsinden $10^{-9} - 10^{-10}$ mertebesindedir. Hat-3'e ait yansıma gücü kesitinde derin kısımlarda deniz tabanına doğru kırmızı oklarla ifade edilen gaz ya da su olabilecek bir akışkanın faylar boyunca yol aldığı düşünülmektedir. Elde edilmiş modellerde bu çıkışların, Altan'ın (2014) yansıma gücü kesitlerinde olası akışkan içeren sedimanlar olarak tanımladığı bölgeyle iyi bir uyum içerisinde dir. Özellikle doğrultu altımlı fay zonları (DAFZ) olarak tanımlanan bölgelerde dikkat çekici bir çıkış görülmektedir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 : Hat-3'e ait (a) sıcaklık ve (b) Darcy hızı modelleri.

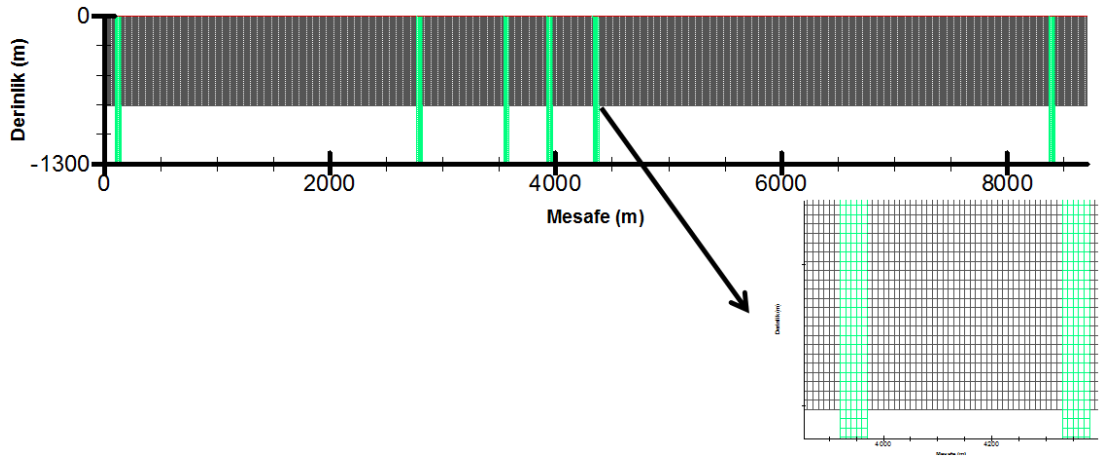
4.1.3 Hat-4'e ait sıcaklık ve akış modelleri

Hat-4, İzmir Körfezi içerisinde konumlanmış KB-GD uzanımlı hat-3'ü kesen D-B uzanımlı bir sismik hattır. Bu hatta ait yansıma gücü kesiti ile yapısal ve stratigrafik yorum Şekil 4.9'de verilmiştir. Önceki hatlara benzer şekilde, yapısal ve stratigrafik yorumlamada fay olarak görülen bölgeler, model geometrisinde 100 m kalınlıklı geçirgen zonlar olarak tanımlanmıştır. Fay permeabilitesi $10^{-14} m^2$ iken dış ortam permeabilitesi $10^{-15} m^2$ 'dir.



Şekil 4.9 : A)Hat-4'e ait anlık yansıma kesiti B)Yapısal ve stratigrafik yorum (Altan, 2014).

Şekil 4.10’da ise hat-4’den elde edilen derinlik, fay konumları, havza çökellerinin kalınlığı, akustik temel ve su kolonu kalınlığı dikkate alınarak oluşturulmuş model geometrisi (mesh) görülmektedir. Şekildeki gri alanlar havza çökellerini, parlak yeşil renkli kısımlar ise yüksek geçirimli fayları göstermektedir. Model geometrisi 66196 adet dikdörtgensel sonlu hacim elemanı (cell) ve bu elemanları birbirine bağlayan 133339 adet düğüm noktasından (node) oluşmaktadır. Geometri ağının rezolüsyonu 10 m’dir.



Şekil 4.10 : Hat-4’e ait modelin ağ (mesh) geometrisi.

Havza çökellerinin bulunduğu kısımda daha gevşek bir zemin tanımlamak için porozite değeri dış ortama göre yükseltilmiştir. Şekil 4.10’da beyaz olarak görünen dış ortamın porozitesi 0.01 alınmışken, havza çökellerinin olduğu kısımlarda porozite 0.1 olarak alınmıştır. Bu değerler literatürde yayınlanmış çalışmalarla da uyum içerisindedir (örn. Magri, 2010).

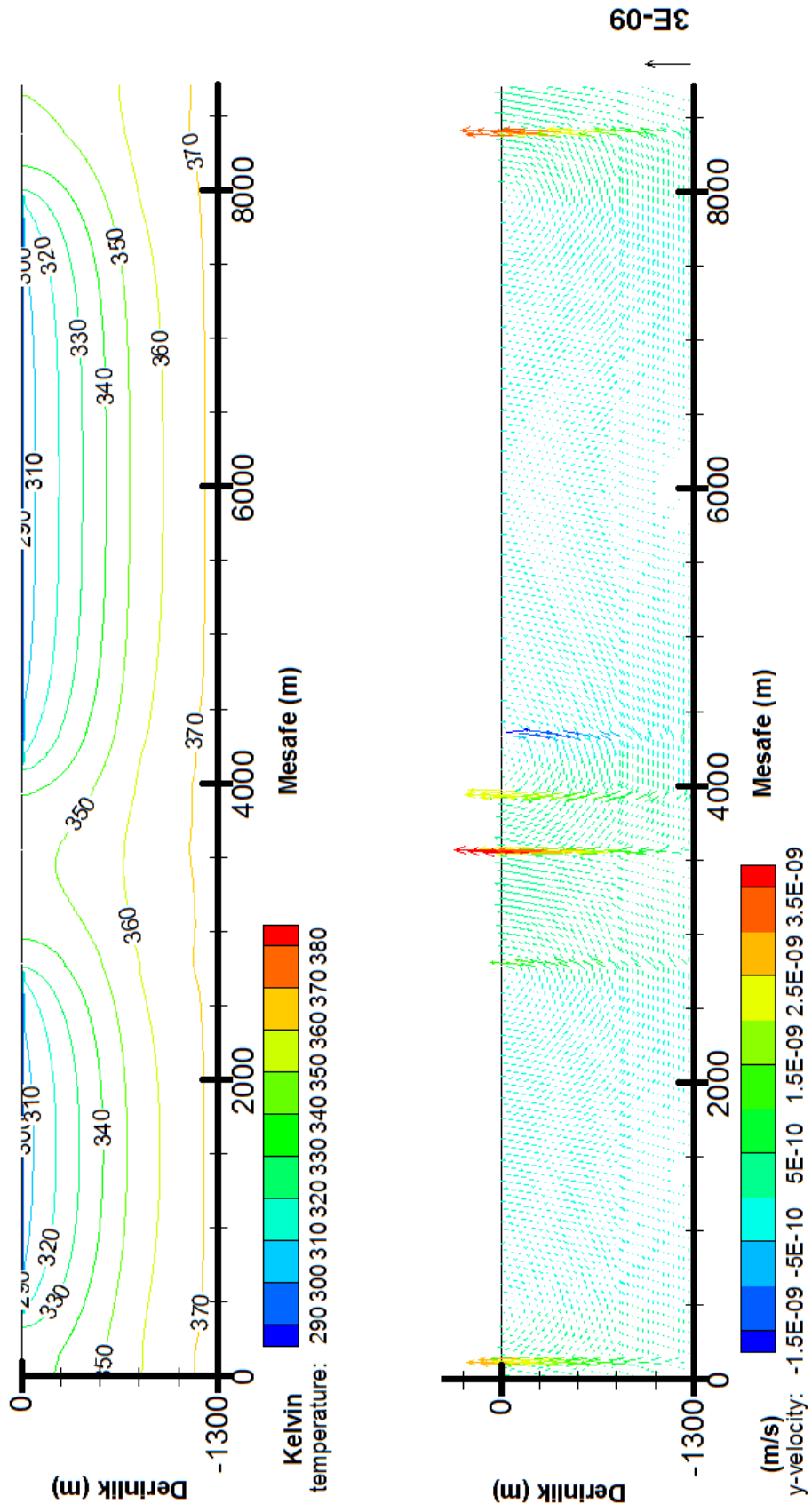
Çizelge 4.4’te hat-4’e ait modelde kullanılmış başlangıç ve sınır koşulları verilmiştir. Modelin yer içi parametreleri ise önceki bölümlerde Çizelge 3.1’te verilmiştir.

İzmir Körfezi içerisinde bulunan D-B uzanımlı bu modelimiz önceki modeller gibi üstü açık (open-top) bir modeldir. Bu sebeple deniz suyu basıncı bir başlangıç koşulu olarak modele tanıtılmıştır. Modele ait sismik kesitten deniz suyu kolonu 52.5 m olarak hesaplanmış olup düşey basınç, sıcaklıkla birlikte üst duvar koşulu olarak modele eklenmiştir.

Çizelge 4.4 : Hat-4 modeline ait başlangıç ve sınır koşulları.

Başlangıç ve sınır koşulları	Değerler
Taban duvarı sıcaklığı (°C)	110
Tavan sıcaklığı (°C)	10
Su kolonu basıncı (Pa)	624198
Sağ duvar koşulu	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$
Sol duvar koşulu	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$

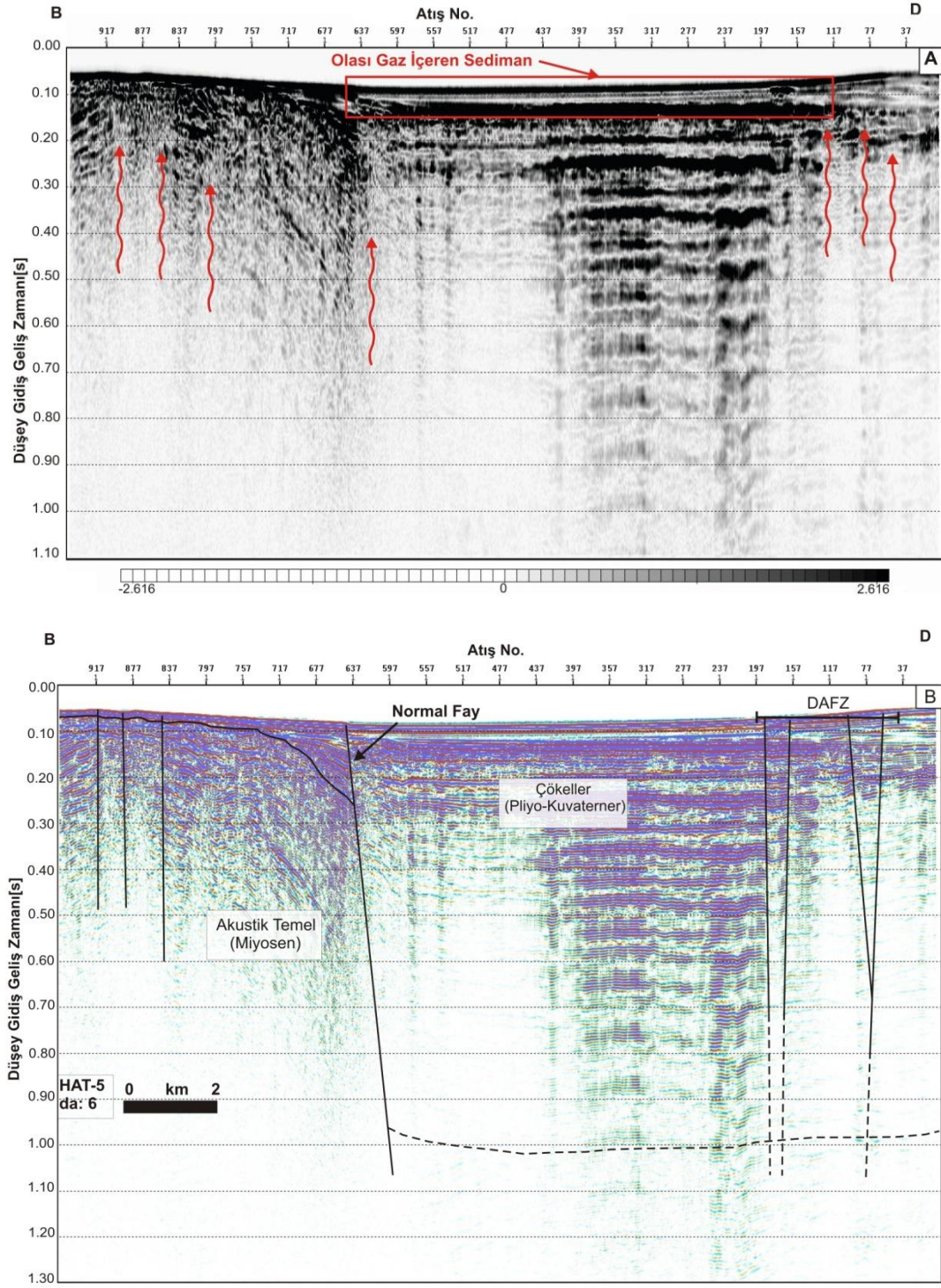
Şekil 4.11’da hat-4’e ait kararlı haldeki (steady-state) sıcaklık ve Darcy hızları modeli görülmektedir. Yumuşak bir sıcaklık dağılımı gösteren modelde, belli başlı yerlerde görece olarak hızlı akışkan çıkışları ve girişleri gözlenmiştir. Bu hızlar diğer modellerle benzer değerlerde olup $10^{-9} - 10^{-10}$ mertebesinde. Modellemede göze çarpan akışkan çıkışları, Altan’ın (2014) anlık genlik kesitlerinde olası gaz içeren sedimanlar olarak tanımladığı bölgeyle uyumlu görünmektedir. Bu çıkışlar, DAFZ olarak tanımlanan kısımda en belirgin halini almaktadır. Modelde muhtemel akışkan çıkışlarının yanı sıra bazı faylar boyunca deniz suyu girişi olarak tanımlanabilecek negatif yönlü hızlı girişler de (downflow) tespit edilmiştir. Jeotermal kaynağı olarak nitelenen “ısı”nın yanında, ikinci önemli bileşen ısı taşıyan akışkanda yüklü *basınç*tır. Isı yüklü akışkan çoğu durumda bu basınç sayesinde yeryüzüne ulaşabilmektedir. Basınç, sistemin dengesinin, rezervuarın ne düzeyde beslenebildiğinin; sistemin tükenme sürecine girip girmediğinin göstergesidir (Öngür, 2005). Bu sebeple modellere girilen basınç değerleri akış yönü ve hızını etkileyen önemli bir parametre olarak devreye girmektedir.



Şekil 4.11 : Hat-4' e ait (a) sıcaklık ve (b) Darcy hızı modelleri.

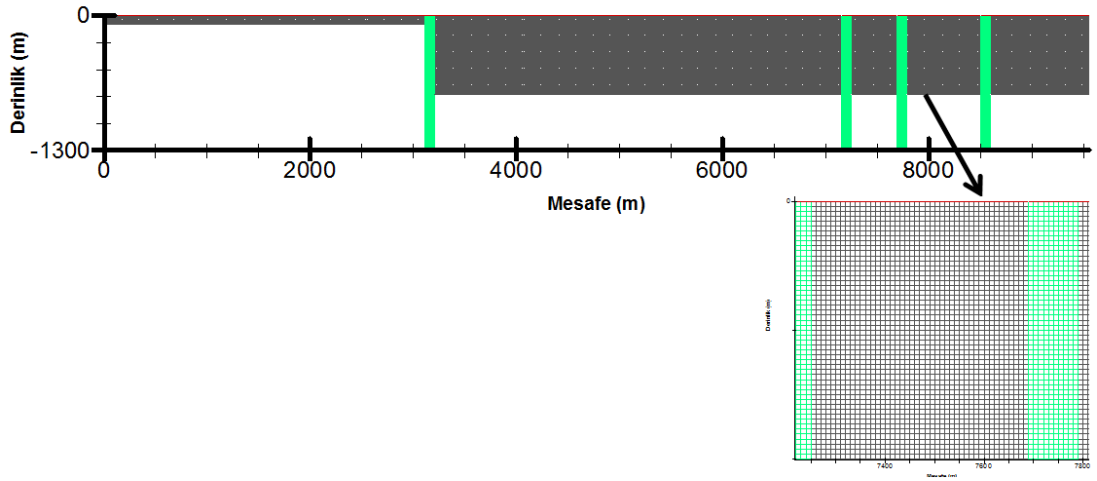
4.1.4 Hat-5'e ait sıcaklık ve hız modelleri

Hat-5 İzmir Körfezi içerisinde, hat-4'e paralel şekilde hat-3'ü kesen D-B uzanımlı bir sismik hattır. Bu hatta ait anlık yansıma kesiti ile stratigrafik yorum Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12 : Hat-5'e ait A)Anlık genlik kesiti B) Yapısal ve stratigrafik yorum.

Şekil 4.13’de ise hat-5’ten elde edilen derinlik, fay konumları, havza çökellerinin kalınlığı, akustik temel ve su kolonu kalınlığı dikkate alınarak oluşturulmuş model geometrisi (mesh) görülmektedir. Şekildeki gri alanlar havza çökellerini, parlak yeşil renkli kısımlar ise yüksek geçirimli fayları göstermektedir. Faylar, önceki modellerdeki gibi yüksek geçirimli alanlar olarak çevre ortamdan ayrıştırılmıştır. Fay permeabiliteleri çevre ortama göre 10 kat fazla olarak alınmıştır. Faylar bir zon olarak tanımlanmıştır ve 100 m genişlikte temsil edilmektedir. Model geometrisi 124280 adet dikdörtgensel sonlu hacim elemanı (cell) ve bu elemanları birbirine bağlayan 125367 adet düğüm noktasından (node) oluşmaktadır. Geometri ağının çözünürlüğü 10 m’dir.



Şekil 4.13 : Hat-5’e ait modelin ağ (mesh) geometrisi.

Havza çökellerinin bulunduğu kısımda daha gevşek bir zemin tanımlamak için porozite değeri dış ortama göre yükseltilmiştir. Şekil 4.13’de beyaz olarak görünen dış ortamın porozitesi 0.01 alınmışken, havza çökellerinin olduğu kısımlarda porozite 0.1 olarak alınmıştır. Bu değerler literatürde var olan yapılmış çalışmalar ile uyumludur. (örn. Magri, 2010).

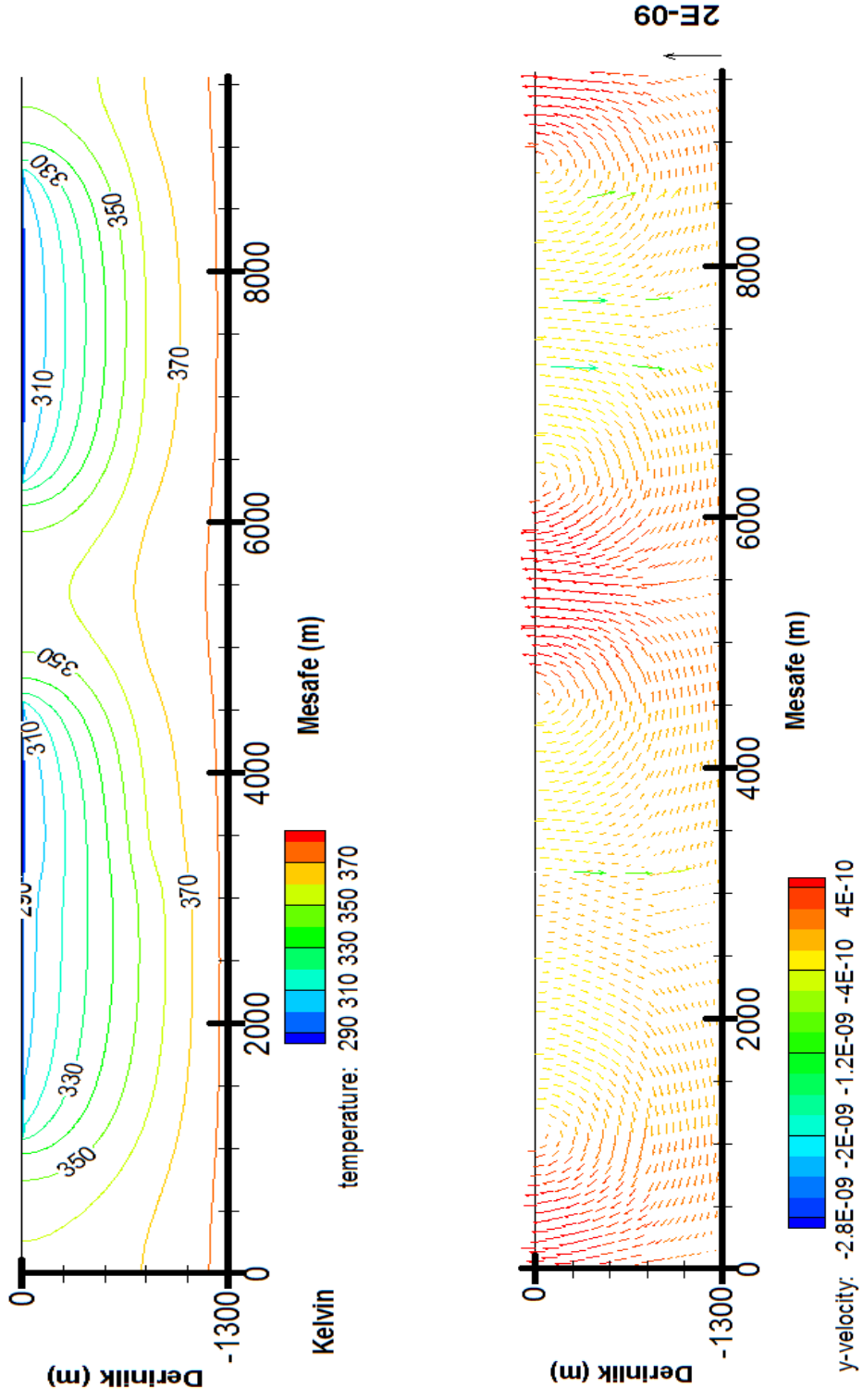
Çizelge 4.5’de hat-5’e ait modelde kullanılmış başlangıç ve sınır koşulları verilmiştir. Modelin yer içi parametreleri ise önceki bölümlerde Çizelge 3.1’te verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Hat-5 modeline ait başlangıç ve sınır koşulları.

Başlangıç ve sınır koşulları	Değerler
Taban duvarı sıcaklığı (°C)	110
Tavan sıcaklığı (°C)	10
Su kolonu basıncı (Pa)	604087
Sağ duvar koşulu	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$
Sol duvar koşulu	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$

İzmir Körfezi içerisinde bulunan D-B uzanımlı ve hat-4'e paralel olan bu modelimiz önceki modeller gibi üstü açık (open-top) bir modeldir. Bu sebeple deniz suyu basıncı bir başlangıç koşulu olarak modele tanıtılmıştır. Modelin geometrisi ve fay konumlarının elde edildiği sismik kesitten faydalanılarak 50 m'lik bir su kolonu hesaplanmıştır.

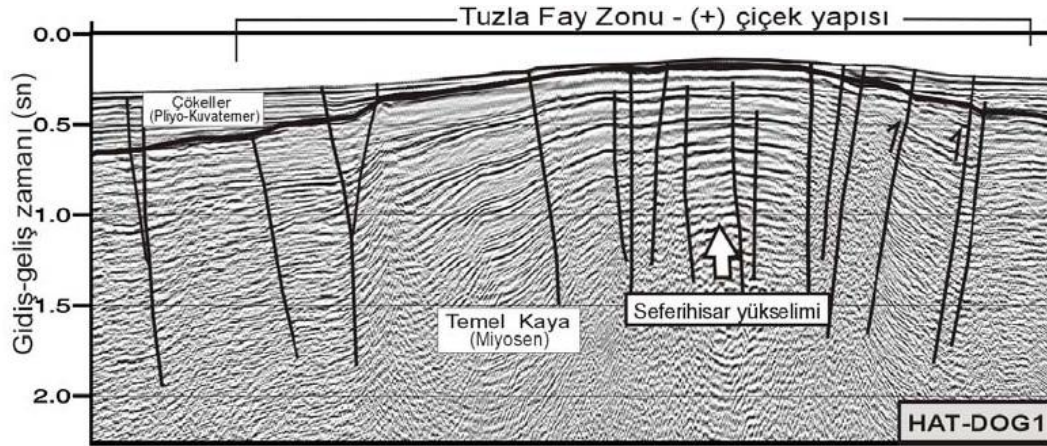
Şekil 4.14'te hat-5'e ait kararlı haldeki (steady-state) sıcaklık ve Darcy hızları modeli görülmektedir. Yumuşak bir sıcaklık dağılımı gösteren modelde, belli başlı yerlerde görece olarak hızlı, 10^{-9} ile 10^{-10} m/s mertebelerinde akışkan çıkışları ve girişleri gözlenmiştir. Model geometrisinde görülen kalın sediman katmanının etkisiyle daha geniş alanları kapsayacak şekilde akışkan çıkışları görülmektedir. Bir önceki hatta görüldüğü gibi bazı faylar boyunca soğuk deniz suyu girişleri de gözlenmiştir. Akışkan çıkışlarının olduğu yerler, Altan'ın (2014) anlık genlik kesitlerinde olası gaz/su içeren sedimanlar olarak tanımladığı bölgeyle büyük ölçüde uyumluluk göstermektedir.



Şekil 4.14 : Hat-5'e ait (a) sıcaklık ve (b) Darcy hızı modelleri.

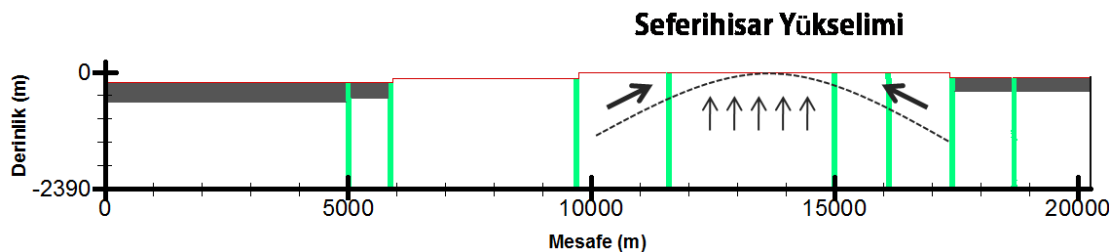
4.1.5 DOG1 hattına ait sıcaklık ve hız modelleri

DOG1 hattı Doğanbey Burnu'nun açıklarında KB-GD uzanımlı bir hattır. DOĞ1 hattına ait sismik stratigrafi şekil 4.15'te verilmiştir (Ocakoğlu ve Demirbağ, 2005).



Şekil 4.15 : DOG1 hattına ait sismik stratigrafi(Ocakoğlu ve Demirbağ, 2005).

Şekil 4.16'da ise DOG1'den elde edilen derinlik, fay konumları, havza çökellerinin kalınlığı, akustik temel ve su kolonu kalınlığı dikkate alınarak oluşturulmuş model geometrisi (mesh) görülmektedir. Şekildeki gri alanlar havza çökellerini, parlak yeşil renkli kısımlar ise yüksek geçirimli fayları göstermektedir. Deniz tabanına ulaşmayan faylar modele dahil edilmemiştir. Birbirine yakın faylar ise bir fay zone olarak geometriye eklenmiştir. Model geometrisi 465663 adet dikdörtgensel sonlu hacim elemanı (cell) ve bu elemanları birbirine bağlayan 467930 adet düğüm noktasından (node) oluşmaktadır. Geometri ağının rezolüsyonu 10 m'dir.



Şekil 4.16 : DOG1 hattına ait ağ (mesh) geometrisi. Parlak yeşil alanlar yüksek geçirimli fay zonlarını, gri bölgeler ise havza çökellerini temsil etmektedir.

Bu modeli oluşturmanın bir başka amacı da, DOG1 hattı gibi yükseltili geometrilere sıcaklık ve akış rejimlerini görebilmektir. Seferihisar Horstu bölgede yer alan belli başlı yükselti unsurlarından birisidir.

Havza çökellerinin bulunduğu kısımda daha gevşek bir zemin tanımlamak için porozite değeri dış ortama göre yükseltilmiştir. şekil 4.16’de beyaz olarak görünen dış ortamın porozitesi 0.01 alınmışken, havza çökellerinin olduğu kısımlarda porozite 0.1 olarak alınmıştır. Bu değerler daha önce yapılmış çalışmalar ile uyumludur. (örn. Magri, 2010).

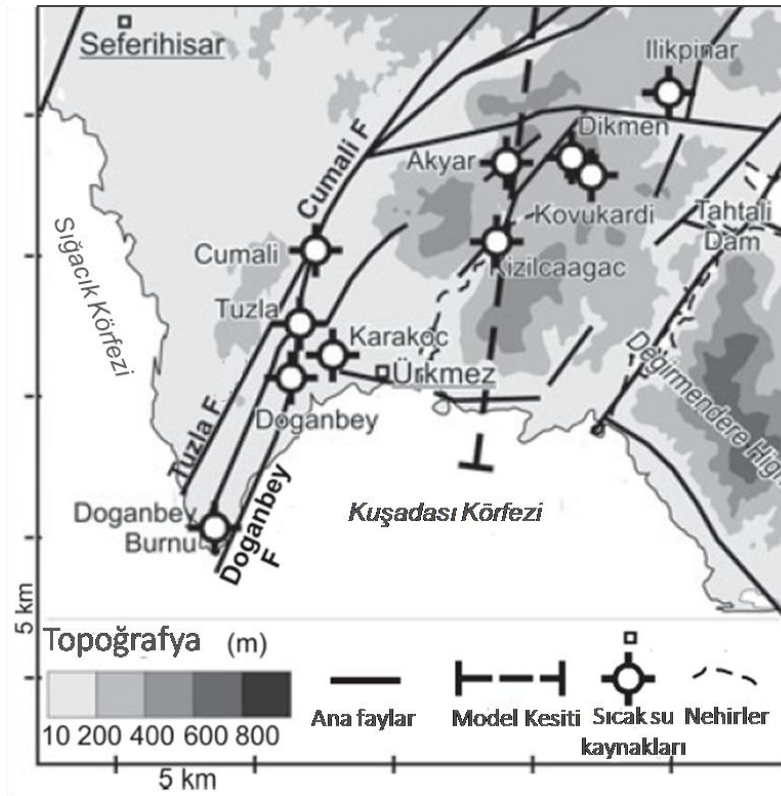
Çizelge 4.6’da DOG1 hatına ait modelde kullanılmış başlangıç ve sınır koşulları verilmiştir. Modelin yer içi parametreleri ise önceki bölümlerde Çizelge 3.1’te verilmiştir.

Çizelge 4.6 : DOG1 modeline ait başlangıç ve sınır koşulları.

Başlangıç ve sınır koşulları	Değerler
Taban duvarı sıcaklığı (°C)	120
Tavan sıcaklığı (°C)	10
Su kolonu basıncı (Pa)	750000
Sağ duvar koşulu	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$
Sol duvar koşulu	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$

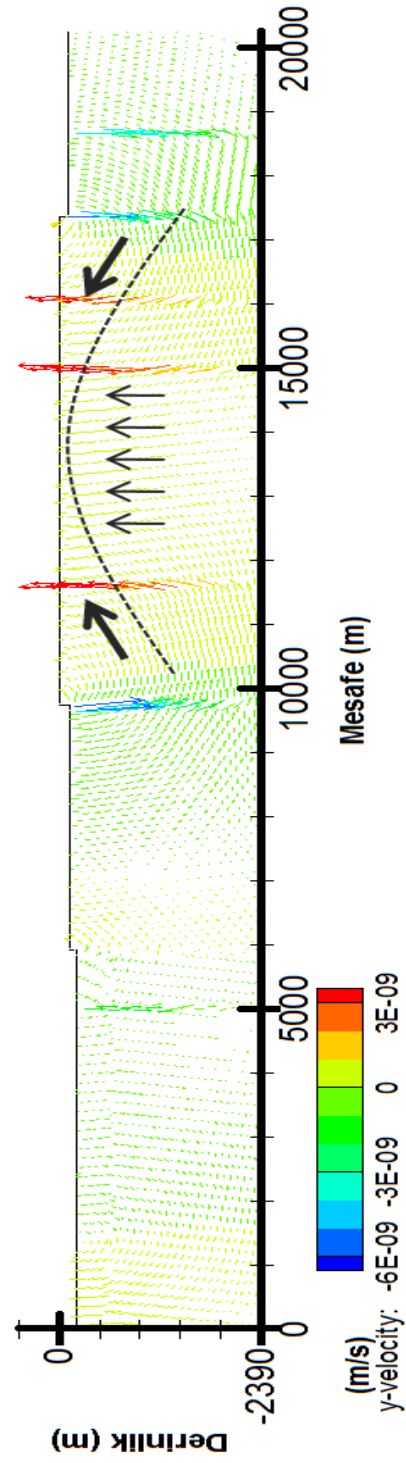
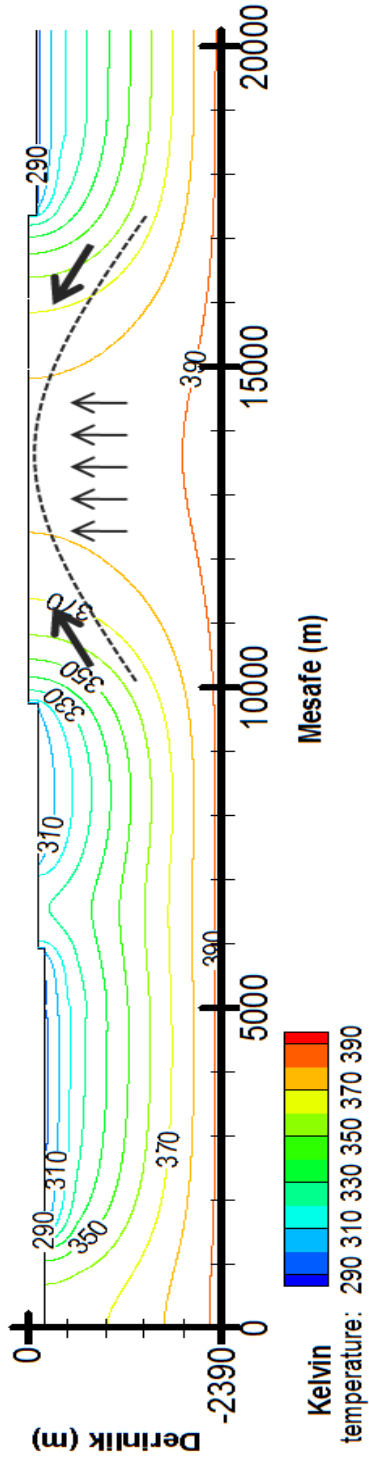
DOG1 modeli diğer modellere göre daha derin bir modeldir. Bu sebeple jeotermal gradyan dikkate alınarak taban sıcaklığı 10 °C kadar arttırılmıştır. Doğanbey Burnu açıklarında bulunan D-B uzanımlı bu modelimiz önceki modeller gibi üstü açık (open-top) bir modeldir. Bu sebeple deniz suyu basıncı bir başlangıç koşulu olarak modele tanıtılmıştır. Sismik kesitte Tuzla Fay Zonu olarak yorumlanmış faylar Seferihisar yükselimi üzerinde görölmektedir. Deniz tabanında meydana gelmiş bu yükselim model geometrisini de yansıtarak basamaklı bir model oluşturulmuş ve yüksek geçirimli faylar modele eklenmiştir. Fay zonlarının genişlikleri 100 m’dir. şekil 4.17’de DOG1 hattı civarında bulunan sıcak su kaynakları görölmektedir.

Doğanbey Burnu’nu KD-GB doğrultusunda kesen Tuzla ve Doğanbey fayları üzerinde pek çok jeotermal alan bulunmaktadır. Doğanbey Burnu’nun hemen önünde KB-GD doğrultusunda uzanan DOG1 kesiti üzerinde görülen bu fayların lokal bölgedeki yer altı sularının akışını kontrol ettiği düşünülmektedir. Şekil 4.18’de DOG1 hattına ait kararlı haldeki (steady-state) sıcaklık ve Darcy hızları modeli görülmektedir. Yumuşak bir sıcaklık dağılımı gösteren modelde, Seferihisar yükselimini sınırlayan faylarda görece olarak hızlı akışkan girişleri gözlenirken, yükselim üzerindeki faylarda akışkan çıkışları görülmektedir. Bu durum, Seferihisar yükselimini sınırlayan fayların bir sıkışma rejimi oluşturması ve akışkanın akış yönelimini etkilemesi olarak yorumlanabilir. Bilindiği gibi, tektonik hareketler yer altı sularının akışına etki eden önemli bir unsurdur.



Şekil 4.17 : DOG1 hattı civarında, karadaki jeotermal alanlar (Magri, 2010’dan yeniden düzenlenmiştir.).

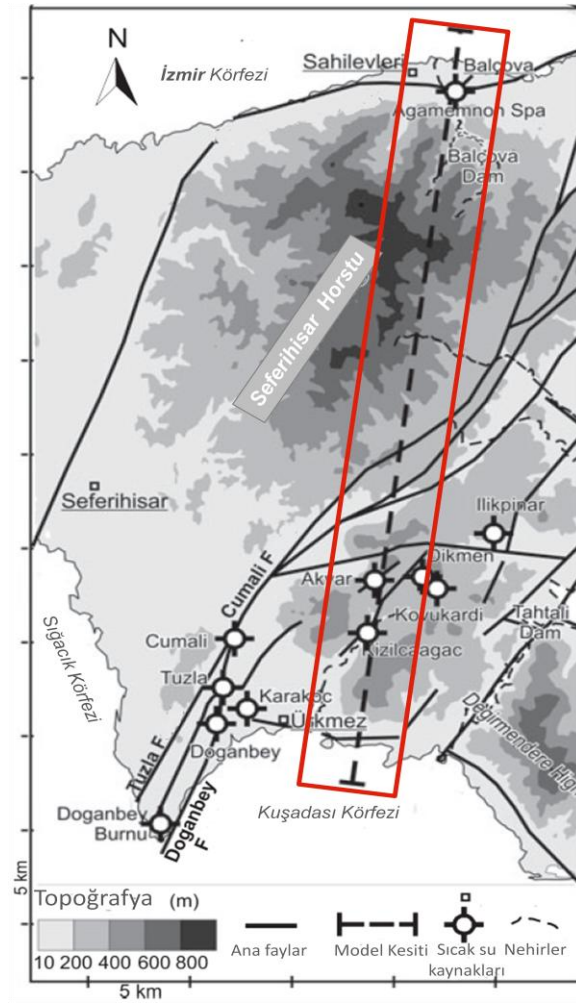
Faylar üzerinde yoğunlaşmış sıcak su çıkışları da bunu destekler niteliktedir. Bu durum Seferihisar yükselimini de içeren DOG1 modelinde görülen akışkan giriş-çıkışlarını göz önüne alarak (Şekil 4.18), karada var olan sistemin Ege Denizi içerisine doğru devam edebileceği şeklinde yorumlanabilir.



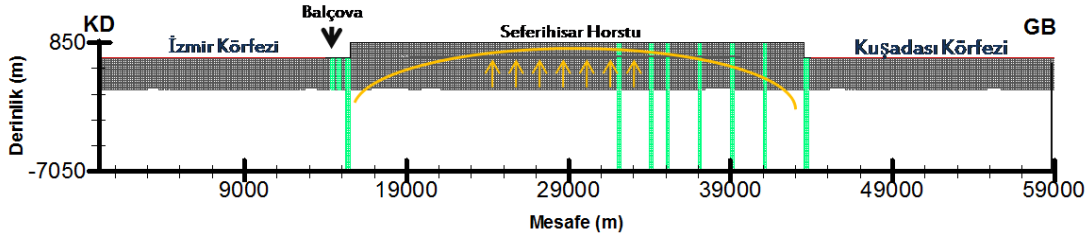
Şekil 4.18 : DOG1 hattına ait (a) sıcaklık ve (b) Darcy hızı modelleri.

4.2 Balçova ve Seferihisar Grabeni'ni İçine Alan Bölgede Yapılmış Sıcaklık ve Akış Modeli

Çalışmanın bu kısmında karada yapılmış sıcaklık ve akış modelleri ele alınacaktır. Bir önceki bölümde ele alınan modellerden farklı olarak modelleme, sismik stratigrafik yorumlardan elde edilen geometrilerle değil, Seferihisar grabenini sınırlayan ana faylar ve Balçova bölgesinden geçen İzmir Fayı ile gerçekleştirilmiştir. Modellemenin yapıldığı alan aşağıdaki şekilde gösterilmektedir (Şekil 4.19). Bahsi geçen İzmir Fayı daha önceki çalışmalarda Balçova jeotermal alanını oluşumunu denetleyen en önemli fay olarak yer almaktadır (Serpen, 2004).



Şekil 4.19 : Çalışma alanı olan Seferihisar-Balçova jeotermal sistemi, faylar ve jeotermal alanlar (Eşder ve Şimşek, 1975; Genç ve diğ., 2001; Drahor ve Berge, 2006 ve Uzel ve Sözbilir, 2008). Topography derived from SRTM data (Reuter ve diğ., 2007) (Magri, 2010'dan yeniden düzenlenmiştir.).



Şekil 4.21 : Seferihisar kesitine ait ağ (mesh) geometrisi.

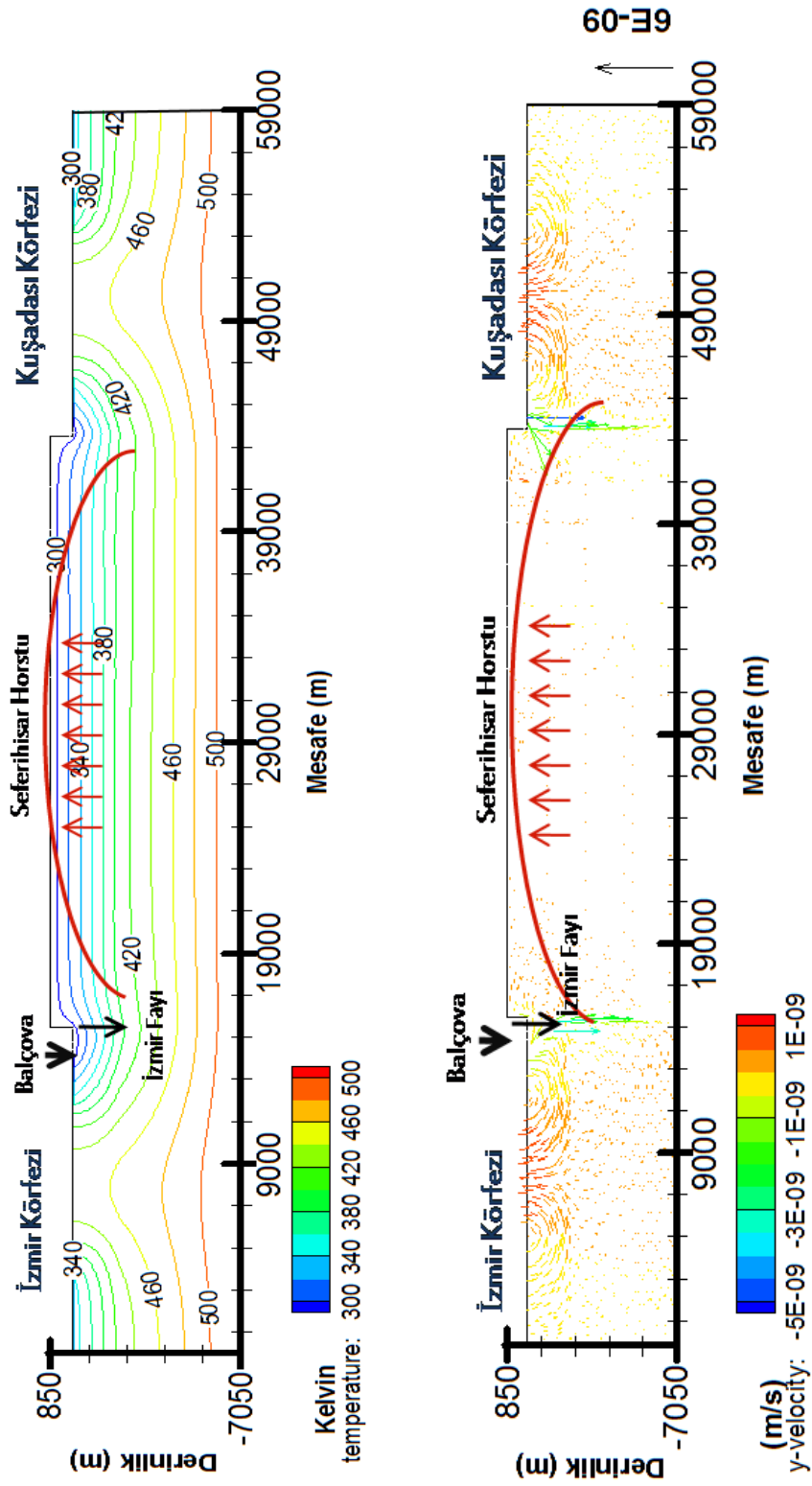
Bu kara modelinde kesit alınan bölgede bulunan Seferihisar Horstu geometriye basamak şeklinde bir yükselti olarak eklenmiştir. Magri'nin (2010) bölgede yaptığı çalışmada yer alan faylar geometriye yerleştirilmiştir. Modele yerleştirilen iki ana fay Seferihisar Horstu'nu sınırlayan büyük faylardır. Şekil 4.19'de görüleceği gibi horstu Balçova tarafından sıkıştıran ana fay İzmir Fayı'dır. Yine Balçova bölgesinde bulunan ve Şekil 4.20'da görülen önemli faylar da modele eklenmiştir.

Bu modeli oluşturmanın amacı, sismik kesitlerden faydalanılarak gerçekleştirilmiş olan deniz modelleriyle bir kıyaslama yapmak ve bölgeyi boydan boya kesen bir hat üzerinde sıcaklık rejimini görebilmektir. Çizelge 4.7'de modele ait başlangıç ve sınır koşulları verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Seferihisar modeline ait başlangıç ve sınır koşulları.

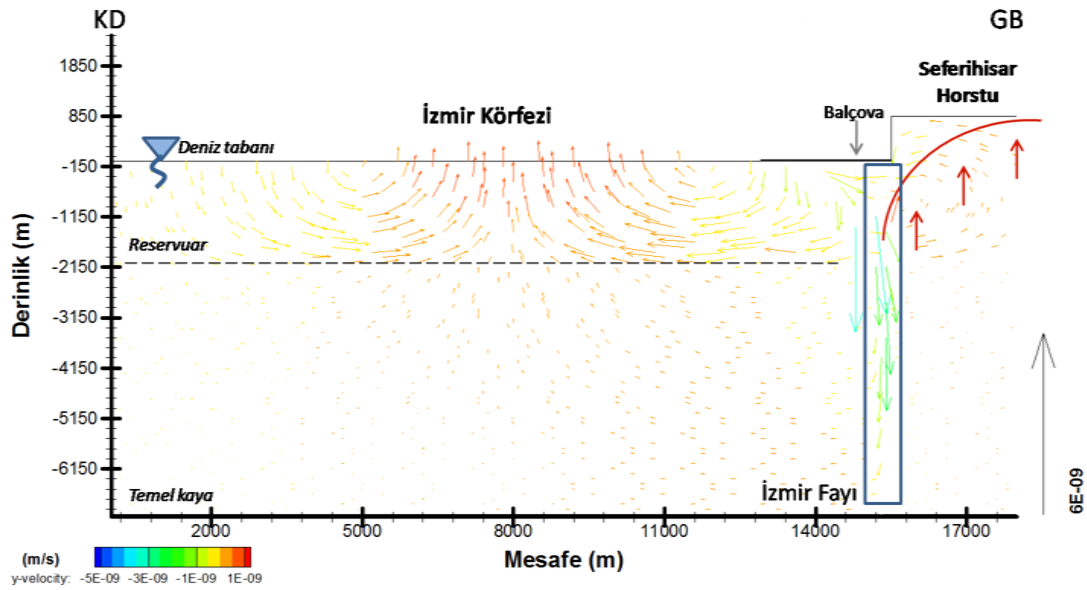
Başlangıç ve sınır koşulları	Değerler
Taban duvarı sıcaklığı (°C)	250
Tavan sıcaklığı (°C)	10/15
Su kolonu basıncı (Pa)	604000
Sağ duvar koşulu	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$
Sol duvar koşulu	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$

Verilen parametreler doğrultusunda Şekil 4.22'de Seferihisar modeline ait kararlı haldeki (steady-state) sıcaklık ve Darcy hızları modeli görülmektedir.



Şekil 4.22 : Seferihisar modeline ait (a) sıcaklık ve (b) Darcy hızı.

Seferihisar modeli hem deniz tabanı hem de karasal bölge içeren karma bir modeldir. Modele tanıtılan porozite, permeabilite gibi yer içi fiziksel parametreleri diğer modellerle aynıdır. Ancak modelde Seferihisar Horstu'nu sınırlayan, Balçova yakınlarındaki İzmir Fayı'nda ortama göre hızlı akışkan akışını görmek mümkündür. Bunun yanı sıra, akışkanın dolaşımının 2 km kalınlıklı rezervuar içerisinde olmakta, daha derinlerde ise çok yavaş bir akış rejimi gözlenmektedir. Şekil 4.23'de söz konusu modele ait hız modeli Balçova kısmı daha detaylı olarak görülebilir. Modeldeki Balçova bölgesinden görülen İzmir Fayı üzerinde karmaşık bir akış rejimi görülmektedir. Oldukça geçirimli bir yapıya sahip bu fay, sıcak jeotermal akışkanı yüzeye taşıdığı gibi, soğuyan akışkanı da derinlere iletir. Şekil 4.23'de açıkça görülen bu durum daha önceki çalışmalarda çalışmalarda önerilen ve İzmir Fayı'nın Balçova jeotermal alanı için aşağıya doğru bir akış (downflow) sağlama özelliğini yansıtmaktadır (Magri, 2012).



Şekil 4.23 : Seferihisar modeli Darcy hızı modeli (İzmir Fayı kısmı).

5. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada denizde İzmir, Gülbahçe ve Sığacık Körfezleri içinde yer alan bazı bölgelerde ve karada Balçova jeotermal alanı ve Seferihisar grabeninden geçen bir kesit üzerinde sıcaklık dağılımı ve akışkan hızı modellenmesi yapılmıştır. Çalışma kapsamında toplam 6 adet model oluşturulmuştur. Modelleme çalışmasının ilk aşamalarından biri olan ‘model geometrisi oluşturma’ bu çalışma için bölgede yapılan sığ sismik yansıma çalışmalarından yararlanılarak tamamlanmıştır.

Çalışma bölgesi olan Batı Anadolu’da gerek horst–graben yapılarının varlığı gerekse de aktif volkanizmanın etkisinden dolayı, jeotermal ve hidrotermal aktivitelerin varlığının araştırılması oldukça önemlidir. Dikkate değer bir sorgulama konusu olarak karada mevcut olan jeotermal sistemlerin deniz içerisindeki devamlılığı ve bu sistemlerin ne tür yapısal unsurlar ile kontrol edildiği bu tez çalışmanın da tartışma içeriğini oluşturmaktadır.

Deniz içerisinde yapılan modellemeler sonucunda, deniz tabanına kadar ulaşan fayların bir kısmında akışkan çıkışları olabileceği tespit edilmiştir. Gülbahçe Körfezi içerisinde yapılmış olan modele ait sismik yansıma gücü kesitlerinde 200-300 m genişliğinde muhtemel bir çamur diapiri göze çarpmaktadır. İki adet doğrultu atımlı fayın arasında uzanan bu olası diapirin yüzeye çamur su ve gaz taşıma özelliği hat-2’ye ait akışkan hızı modelinde açıkça görülmektedir. Bu durum karada var olan jeotermal akışkan çıkışlarının deniz içerisinde de devam ettiği şeklinde yorumlanabilir. Nitekim Pekçetinöz’ün (2010) literatürde yer alan çalışmasında Gülbahçe Körfezi içerisinde yüksek sıcaklarda çoğalabilen bir mercan türüne rastlaması önemli bir kanıttır.

İzmir Körfezi içerisinde bulunan hat-3’e ait modelde ise sediman havza içerisindeki fay zonunun olduğu bölgede akışkan girişi ve çıkışı olabilecek bölgeler göze çarpmaktadır. Sismik kesitte gaz çıkışı olarak yorumlanan bu yerler soğuk deniz suyu ve sıcak akışkanın giriş çıkış yapabileceği bölgeler olarak göze çarpmaktadır.

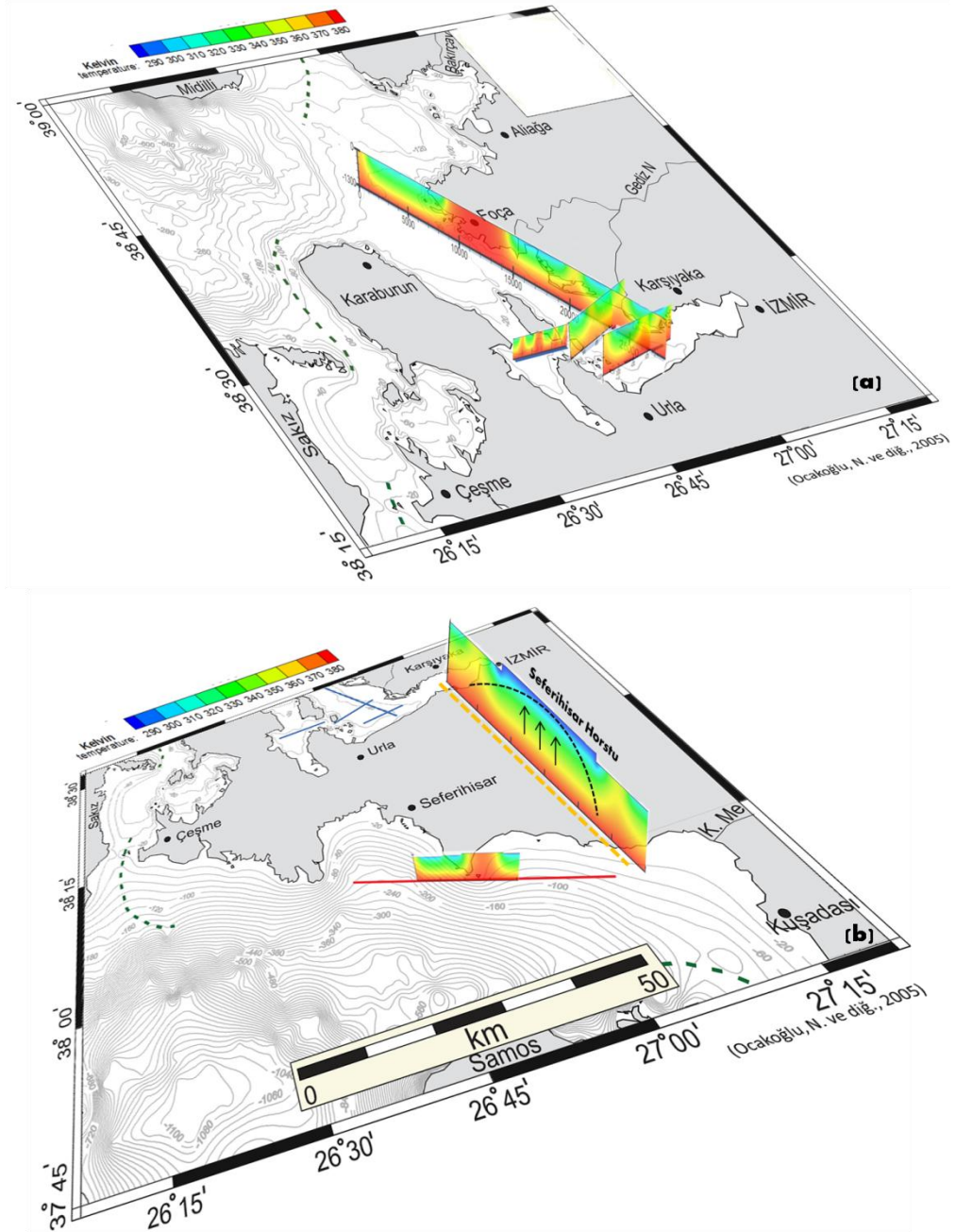
Hat-3 modelini kesen hat-4 ve hat-5 modeli benzer yapısal özellikler göstermektedir. İki hatta da modelleme açısından önemli bir etki yaratabilecek özellik kalın sediman çökellerin varlığıdır.

Yer altı modellerinde, tabaka ve formasyonlar farklı fiziksel yer içi parametreleri ile temsil edildiğinden, ortama göre daha gevşek olduğu kabul edilen havza çökellerinin varlığı, yoğun akışkan giriş-çıkışlarını da beraberinde getirecektir. Nitekim hat-4 ve hat-5 modellerinde önceki iki modele göre biraz daha farklı bir rejim görülmüştür. Gerek hatların kısa oluşu gerekse fay yoğunluğunun az oluşu ve kalın sediman tabakanın varlığı ile birlikte ortaya 10^{-9} m/s mertebesinde daha hızlı akışkan girişleri ve 10^{-10} m/s mertebesinde daha yavaş akışkan çıkışları tespit edilmiştir.

Doğanbey Burnu açıklarında yer alan DOG1 hattında Seferihisar yükselimini görmek mümkündür. Bu yükselim model geometrisine de yansıtılmıştır. DOG1 hattında yükselim üzerinde kümelenmiş Tuzla Fay zone üzerinde 10^{-9} m/s mertebelerinde çıkışlar görülmektedir. Yükselimi sınırlayan faylarda ise aynı mertebelerde soğuk su girişleri göze çarpmaktadır.

Çalışmanın kara kısmında Balçova jeotermal alanını ve Seferihisar Horst'unu içine alan bir bölgede sıcaklık dağılımı ve akış modellemesi yapılmıştır. 59 km lik bir uzunluğa ve 7.9 km'lik bir derinliğe sahip Seferihisar hız modelinde göze çarpan ilk özellik akışlarının 2 km'lik bir rezervuar içerisinde gerçekleşiyor olmasıdır. Bunun bir sebebi ana kayanın geçirimsizliğinin diğer katmanlara göre çok daha az oluşudur. Diğer bir sebep ise fay zonlarının yüksek geçirimsizliğine rağmen ana kaya katmanının modeli domine etmesidir. Modelin büyük bir kısmı karada olmasına rağmen sağ ve sol tarafları deniz tabanıdır. Bu durum modelin üst duvarının hem kapalı hem de açık (close-top, open-top) olmasına sebep olmuştur. Bu durum sıcaklık modeline yansırken horst kısmında hemen hemen birbirine paralel olan eş sıcaklık eğrilerinin deniz tabanına doğru kıvrılması ile sonuçlanmıştır. Bu sebeple deniz tabanı içerisinde de akış görmek mümkündür. Modelin KD tarafından geçen İzmir fayı üzerinde ise bir giriş gözlenmiştir. Balçova jeotermal sistemini kontrol eden yapıların başında gelen İzmir Fayı üzerinde hem yoğunluğu azalan sıcak akışkanın yukarı yönlü hareketi hem de soğuyarak ağırlaşan akışkanın aşağı yönlü hareketi görülebilmektedir (Magri, 2011).

Tüm modellere ait sıcaklık dağılımı modelleri tutarlılık göstermektedir. Yumuşak sıcaklık geçişleri görülen modellerde, eş sıcaklık eğrilerinin fay zonları olan bölgelere doğru yaslandığı görülmüştür. Bu durum literatürdeki çalışmalarla uyumludur (örn. Magri, 2010). Tüm modellere ait sıcaklık modelleri Şekil 5.1’de haritalar üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.1: (a) İzmir ve Gülbahçe sıcaklık modellerinin (b) Sığacık Körfezi ve Seferihisar sıcaklık modellerinin harita üzerinde gösterimi (Ocakoğlu, N. Ve diğ. 2005’ten değiştirilerek, ölçeksiz).

Şekilde özellikle hat-3 ve üzerindeki hat-4 ile hat-5 sıcaklık dağılımı açısından iyi bir uyumluluk göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında, çalışma bölgesi içerisinde pek çok akışkan çıkış ve girişi olduğu düşünülen bölge saptanmıştır. Bölgede deniz tabanındaki sıcak su ya da gaz gibi akışkan çıkışlarını daha iyi saptayabilmek amacıyla batimetrik çalışmalar yapılabileceği gibi daha yoğun ve sık sığ sismik yansıma çalışmaları yapılarak da morfolojik yapılar ortaya koyulmalıdır.

KAYNAKLAR

- Aksu, A., Pipper, D., Konuk, T.** (1987). Late Quaternary Tectonic and Sedimentary History of Quter İzmir and Çandarlı Bays, Western Turkey. *Marine Geology*, 76, 89-104.
- Altan, Z.,** (2014). İzmir, Gülbahçe ve Sığacık Körfezleri'nin sığ sismik yansıma verileri ile araştırılması. *Yüksel lisans tezi*.
- Barka, A., Reilinger, R.** (1997). Active tectonics of the eastern Mediterranean region: deduced from GPS, neotectonic and seismicity data. *Ann. Geofis. XL* (3), 587– 610.
- Bozkurt, E.** (2001). Neotectonics of Turkey—a synthesis. *Geodinamica Acta*, 14(1), 3-30.
- Bozkurt, E.** (2003). Origin of NE-trending basins in western Turkey. *Geodinamica Acta*, 16(2), 61-81.
- Bozkurt, E. & Park, R.G.,** (1994). *J. Geol. Soc. London*, 151: pp. 213-216.
- Bozkurt, E., & Satir, M.** (2000). The southern Menderes Massif (western Turkey): geochronology and exhumation history. *Geological Journal*, 35(3-4), 285-296.
- Bozkurt, E., & Sözbilir, H.** (2004). Tectonic evolution of the Gediz Graben: field evidence for an episodic, two-stage extension in western Turkey. *Geological Magazine*, 141(01), 63-79.
- Bozkurt, E., & Sözbilir, H.** (2006). Evolution of the large-scale active Manisa Fault, Southwest Turkey: implications on fault development and regional tectonics. *Geodinamica Acta*, 19(6), 427-453.
- Boztepe, G. A., Yılmaz, Y., Demirbağ, E., Ecevitoglu, B., Arzuman, S., ve Kuşçu, İ.** (2001). Reflection seismic study across the continental shelf of Baba Burnu promontory of Biga Peninsula, Northwest Turkey, *Marine Geology*, 176, 75-85.
- Dewey, J.F., Şengör, A.M.C.** (1979). Aegean and surrounding regions. Complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 90, 84– 92.
- Drahor MG, Berge MA** (2006). Geophysical investigations of the Seferihisar geothermal area, western Anatolia, Turkey. *Geothermics* 35:302–320
- Drakopoulos, J., Delibasis, N.,** (1982). The focal mechanism of earthquakes in the major area of Greece for the period 1947–1981. *Seismol. Lab. Univ. Athens Publ.* 2, 1 – 72.
- Emre, T.** (1996). Gediz Grabeninin jeolojisi ve tektoniği, *Turkish Journ. of Earth Sciences*, 5, 171-186 s.

- Emre, O., & Barka, A.** (2000). Active faults between Gediz graben and Aegean Sea (Izmir region). In *Proceedings of International Symposia on Seismicity of Western Anatolia* (pp. 24-27).
- Emre, T., & Sözbilir, H.** (1997). Field evidence for metamorphic core complex, detachment faulting and accommodation faults in the Gediz and Büyük Menderes grabens, western Anatolia. *IESCA Proceedings*, 1, 73-93.
- Esder, T., & Şimşek, S.** (1975). Geology of Izmir-Seferihisar geothermal area, Western Anatolia of Turkey; determination of reservoirs by means of gradient drilling. In *Proceedings of Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco (Vol. 1, pp. 349-361).
- Eymard R., Gallouët T., Herbin R.,** (2000). "Finite Volume Methods". *Handbook of Numerical Analysis*, Vol. VII, 2000, p. 713-1020
- Fluent, ANSYS,** (2006). "6.3 user's guide." *Fluent Inc* .
- Genç S. C, Altunkaynak S., Karacık Z., Yazman M., Yılmaz Y.** (2001). The Çubukludağ graben, south of Izmir: its tectonic significance in the Neogene geological evolution of the western Anatolia.
- Görür, N., Şengör, A.M.C., Sakıncı, M., Tüysüz, O., Akkök, R., Yiğitbaş, E., Oktay, F., Barka, A., Sarıca, N., Ecevitoglu, B., Demirbağ, E., Ersoy, Ş., Algan, O., Güneysu, C., ve Aykol, A.** (1995). *Rift formation in the Gökova Region, Southwest Anatolia: Implications from the opening of the Aegean Sea*, *Geological Magazine*, 132, 637-650.
- Hetzel, R., Ring, U., Akal, C. & Troesch, M.** (1995). Miocene NNEdirected extensional unroofing in the Menderes Massif, southwestern Turkey. *Journal of the Geological Society*, London 152, 639–654.
- Holzbecher E** (1998). *Modelling Density-Driven Flow in Porous Media*. Heidelberg, Germany: Springer.
- Jongsma, D.,** (1974). Heat flow in the Aegean Sea. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, Cilt 37, s. 337-346.
- Kalafat, D.,** (1995). Anadolu'nun tektonik yapılarının deprem mekanizmaları açısından irdelenmesi. Doctora thesis. İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Kaya, O.,** (1979). "Ortadoğu Ege çöküntüsünün (Neojen) stratigrafisi ve tektoniği". *Türk. Jeol. Kurult. Bül.* 22, 35– 58.
- Koçyiğit, A., Bozkurt, E., Cihan, M., Özacar, A., & Teksöz, B.** (1999). Neotectonic frame of Turkey: a special emphasis on the 17 August 1999 Gölcük–Arifiye earthquake (NE Marmara, Turkey). In *International Conference on Earthquake Hazard and Risk in the Mediterranean Region* (pp. 18-22).
- Kurt, H., Demirbağ, E., ve Kuşçu, İ.** (1999). Investigation of the submarine active tectonism in the Gulf of Gökova, Southwest Anatolia-Southeast Aegean Sea, by Multi-Channel Seismic Reflection Data, *Tectonophysics*, 305, 477-496.
- Kocaefe, S., Ataman, G.,** (1976). Actual tectonics of the western Anatolia. *Yerbilimleri* 9, 149 – 162.

- Le Pichon, X., Angelier, J.** (1979). The Hellenic Arc and trench system: a key to the tectonic evolution of the eastern Mediterranean area. *Tectonophysics* 60, 1 –42.
- Lips, A.L.W., Cassard, D., Sözbilir, H., Yılmaz, H. & Wijbrans, J.R.** (2001). Multistage exhumation of the Menderes Massif, western Anatolia (Turkey). *International Journal of Earth Sciences* 89, 781–792.
- Magri F., Akar T., Gemici U., Pekdeger 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* 10:388–405
- Magri, F., Akar, T., Gemici, U., Pekdeger, A.** (2012). Numerical investigations of fault-induced seawater circulation in the Seferihisar-Balçova Geothermal system, western Turkey. *Hydrogeology Journal*, 20(1), 103-118.
- Masclé, J., Martin, L.** (1990). Shallow structure ve recent evolution of the Aegean Sea: A synthesis based on continuous reflection profiles: *Marine Geology*, 97, 271-299.
- McKenzie, D.P.** (1972). Active tectonics of Mediterranean region. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 30, 109– 185.
- McKenzie, D. P., and Yılmaz, Y.,** (1991). “Deformation and volcanismin Western Turkey and the Agean”. *Bulleitein of the Istanbul Technical University*, Cilt 44, s. 345-373.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., et al.** (2000). Global Positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *J. Geophys. Res.* 105, 5695– 5719.
- McKenna, J. R., & Blackwell, D. D.** (2004). Numerical modeling of transient Basin and Range extensional geothermal systems. *Geothermics*, 33(4), 457-476.
- Ocakoğlu, N., Demirbağ, E., Kuşçu, I.** (2005) Neotectonic structures in Izmir Gulf and surrounding regions (western Turkey): Evidences of strike-slip faulting with compression in the Aegean extensional regime. *Mar Geol* 219:155–171
- Okay, A.I., Satır, M.,** (2000). Coeval plutonism and metamorphism in a latest Oligocene metamorphic core complex in the northwest Turkey, *Geol. Mag.*, 137(5), 495-516.
- Öngür, T.** (2005). Jeotermal Sahalarda Jeolojik ve Jeofizik Arama İlke ve Stratejileri. *Jeotermal Enerji, Seminer Kitabı*, s. 22. ISBN 975-395-968-0.
- Pekçetinöz, B.** (2010). İzmir ve civar körfezlerdeki jeotermal alanların araştırılması (Gülbahçe örneğinde). *PhD. Thesis*.
- Reuter, H. I., Nelson, A., Jarvis, A.** (2007). An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data. *Int J Geogr Inf Sci* 21:983–1008
- Saleh, H., Saeid, N. H., Hashim, I., Mustafa, Z.** (2011). Effect of conduction in bottom wall on Darcy-Bénard convection in porous enclosure. *Transp Porous Med* 88: 357–368.
- Serpen, U.** (2004). Hydrogeological investigations on Balçova geothermal system in Turkey. *Geothermics*, 33(3), 309-335.

- Seyitoğlu, G., Scott B. C.** (1992). “The age of the Buyuk Menderes graben (west Turkey) and its tectonic implications”, *Geological Magazine*, 129, 239–242.
- Seyitoğlu, G., Tekeli, O., Çemen, I., Senis., Işık, V.** (2002). The role of the flexural rotation/rolling hinge model in the tectonic evolution of the Alasehir graben, western Turkey. *Geological Magazine*, 139(01), 15-26.
- Sözbilir, H.** (2001). Extensional tectonics and the geometry of related macroscopic structures: Field evidence from the Gedizdetachment, western Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences* 10, 51–67.
- Sözbilir, H.** (2002). Geometry and origin of folding in the Neogene sediments of the Gediz Graben, western Anatolia, Turkey. *Geodinamica Acta* 15, 277–288.
- Şaroğlu, F., Emre, E., ve Kuşçu, İ.** (1992). The East Anatolian fault zone of Turkey, *Annal. Tecn.*, 6, 99-125.
- Şengör, A. M. C.** (1985). Türkiye’nin Jeomorfolojik Evriminde Orta Miyosen’in Önemi, Türkiye 9. Jeomorfoloji Bilimsel ve Teknik Kurultayı (13-15 Mart 1985), Bildiri Özleri, Ankara.
- Taymaz, T., Jackson, J.A., Mckenzie, D.** (1991). Active Tectonics of the north and Central Aegean Sea. *Geophys. J. Int.* 106, 433–490.
- Tan, O., Taymaz, T.** (2003). Seismotectonics of Karaburun Peninsula and Kuşadası Gulf: Source Parameters of April 2, 1996 Kuşadası Gulf and April 10, 2003 Seferihisar (İzmir) Earthquakes. International Workshop on the North Anatolian, East Anatolian and Dead Sea Fault Systems: Recent Progress in Tectonics and Paleoseismology and Field Training Course in Paleoseismology, Middle East Technical University (METU) 31 August–12 September 2003, Ankara, Turkey. Abstract volume, p.147.
- Uzel B, Sözbilir H.,** (2008). A first record of strike-slip basin in western Anatolia and its tectonic implication: the Cumaovası basin as an example. *Turk J Earth Sci* 17:559–591
- Versteeg, H. K., Malalasekera, W.** (1995). An Introduction to computational fluid dynamics. 1995. *Harlow: Pearson Education Limited.*
- Yılmaz, Y., Genç, Ş.C., Gürer, O.F., Bozcu, M., Yılmaz, K., Karacık, Z., Altunkaynak, Ş., Elmas, A.** (2000). When did the western Anatolian grabens begin to develop? In: BOZKURT, E., WINCHESTER, J.A. & PIPER, J.D.A. (eds), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area*. Geological Society, London, Special Publications 173, 353–384.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında İstanbul’da doğdu. İlköğrenimi Hamdullah Suphi Tanrıöver İlköğretim Okulu’nda tamamladı. Lise öğrenimine İstanbul Cağaloğlu Anadolu Lisesi’nde devam etti. 2006 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü’ne girdi ve 2011 yılında buradaki lisans eğitimini 2. lik derecesi ile tamamladı. 2012 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi’nde yüksek lisans öğrenimine başladı.