





# **PARÇALI KALDERA ÇÖKMELERİNİN ANALOG VE NÜMERİK MODELLEMESİ**

## **ANALOGUE AND NUMERIC MODELLING OF PIECEMEAL CALDERA COLLAPSES**

**EDA AYDIN**

**DR. ÖĞRETİM ÜYESİ İNAN ULUSOY**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.







## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

31/01/2020



EDA AYDIN



## YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren .... ay ertelenmiştir.
- ☐ Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

31/01/2020



EDA AYDIN



## ÖZET

# PARÇALI KALDERA ÇÖKMELERİNİN ANALOG VE NÜMERİK MODELLEMESİ

**Eda AYDIN**

**Yüksek Lisans, Jeoloji Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğretim Üyesi İnan ULUSOY**

**Ocak 2020, 160 sayfa**

Volkanların yapısal ve tektonik evrimini araştırmak amacıyla volkanolojide çeşitli analog deneyler yapılmaktadır. Analog kaldera deneyleri, kalderaların yapısal ve morfolojik evrimini incelemek için önem taşımaktadır. Bu çalışmaya, analog kaldera modelleri oluşturmak için gerekli düzeneğin kurulması gibi önemli bir adımla başlanmıştır. Magma odasının yatay bileşenli genişleme hareketine bağlı olarak, kalderaların oluşum evreleri tekrarlanmış kum havuzu deneyleriyle incelenmiştir. Oluşturulan modellerin Hareketten Yapı - Çok Bakılı Stereofotogrametri (HY-ÇBS) yöntemiyle yüksek hassasiyetli yüzey modellemesi gerçekleştirilmiş ve sayısal yükseklik modelleri oluşturulmuştur. Model üzerindeki yüzey yer değiştirmeleri ve yüzey deformasyonlarını incelemek amacıyla Parçacık Takibi (PT) yöntemi kullanılmıştır. Böylece parçalı kalderaların yapısal unsurlarının model yüzeyindeki evrimi iki farklı yöntemle incelenmiştir. Analog kaldera modellerinin iç yapısını incelemek amacıyla modeller sabitlenerek X-ışını tomografisi ve X-ışını Mikro-CT

yöntemleri ile taranmıştır ve sabitlenen kaldera modellerin iç-yapısal unsurları üç boyutta haritalanmıştır. Magma odasının yanal genişlemesinin çatı bloğunda oluşturduğu deformasyonu incelemek amacıyla sonlu elemanlar yöntemiyle nümerik modeller yapılmıştır. Çatı bloğunda oluşan gerilme ve yer değiştirme miktarı sayısal olarak incelenmiştir. Sonuçlar, magma odasının yanal genişlemesine bağlı olarak, çatı bloğunda eşit olmayan bir deformasyon oluşturduğunu göstermektedir. Çökme esnasında bu çatı bloğunun farklı derinliklerde ve ayrı bloklar halinde çöktüğü ve yarı-doğrusal bir yapısal sınırla birbirinden ayrıldığı belirlenmiştir. Bu çökme yapısı, çift pistonlu parçalı kaldera çökmesi olarak adlandırılmıştır. Volkanik yapının kabarması ve peşi sıra kaldera çökmesiyle oluşan yapısal unsurların; dışa doğru dalımlı ters faylar, içe doğru dalımlı normal faylar, ışınsal faylar ve kalderayı çevreleyen sınır faylarından (çember fayı) oluştuğu belirlenmiştir. Oluşturulan modeller doğada parçalı çökme ile oluşan kalderalar ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kaldera, Kaldera deneyi, Volkanoloji, X-ışınları tomografisi, Mikro-CT, Stereofotogrametri, Sonlu elemanlar yöntemi.

## **ABSTRACT**

# **ANALOGUE AND NUMERIC MODELLING OF PIECEMEAL CALDERA COLLAPSES**

**Eda AYDIN**

**Master of Science, Department of Geological Engineering**

**Supervisor: Assistant Professor İnan ULUSOY**

**January 2020, 160 pages**

Analogue experiments are carried out to investigate the structural and tectonic evolution of volcanoes in volcanology. Analogue caldera experiments are important to examine the structural and morphological evolution of calderas. This work has been started with the main step of establishing the necessary experimental apparatus to create analogue caldera models. The formation stages of calderas were investigated by repeated sand box experiments due to the lateral expansional movement of the magma chamber. High precision surface modeling and digital elevation model of the analogue models were created by Structure from Motion - Multi-View Stereophotogrammetry (SfM-MVS) method. Particle Tracking (PT) method was used to investigate surface displacements and surface deformations on the model. Thus, the evolution of the structural elements of the piecemeal calderas on the model surface was examined in two different methods. In order to examine the internal structure of analogue caldera models, the models were fixated and scanned by X-ray tomography and X-ray Micro-CT methods, and the



internal-structural elements of the fixated caldera models were investigated in three dimensions. Numerical modeling was carried out using finite element method to investigate the deformation of the lateral expansion of the magma chamber in the roof block. Stress and displacement of the roof block were investigated numerically. The results show that, an inequivalent deformation on the roof block have been formed due to the lateral expansion of the magma chamber. It was determined that during the collapse, this roof block collapsed at different depths, as two discrete blocks and separated from each other with a sub-linear structural boundary. This collapse is called as double-piston piecemeal caldera. Structural elements formed by tumescence and the following collapse of the caldera; outward-dipping reverse faults, inward-dipping normal faults, radial faults and boundary faults surrounding the caldera (ring fault) have been observed. The models were interpreted by comparing them with the calderas formed by piecemeal collapse in the nature.

**Keywords:** Caldera, Caldera experiment, Volcanology, X-ray tomography, Micro-CT, Stereophotogrammetry, Finite element method.

## TEŞEKKÜR

Üniversite hayatım boyunca ve tezimin her aşamasında, engin bilgi birikimi ile yardımlarını ve desteğini benden esirgemeyerek her zaman yanımda olan, bana yol gösteren değerli hocam, tez danışmanım Dr. Öğretim Üyesi İnan ULUSOY'a,

Sabitlenmiş modellerin, Hacettepe Üniversitesi İleri Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (HÜNİTEK) X-ışını Mikro-CT ile görüntülenmesini sağlayan ve düşünceleriyle katkıda bulunan Doç. Dr. H. Evren ÇUBUKÇU'ya ve Araş. Gör. Efe AKKAŞ'a, İstanbul'da Teknogem'de X-ışını Tomografisi ile görüntülenmesini sağlayan Sayın Asım HORASAN'a,

Nümerik modellemeler için laboratuvarlarının Comsol Multiphysics yazılımını kullanmamıza olanak sağlayan Dr. Öğretim Üyesi Levent TEZCAN'a,

Deney malzemesi olarak kullanılan unun tane boyunun Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda ölçülmesini sağlayan Doç. Dr. Orkun ERSOY'a,

Tez çalışmam boyunca bana her zaman destek olan ve yardımlarını esirgemeyen Araş. Gör. Caner DİKER'e,

Bugünlere gelmemde büyük katkıları olan, beni her koşulda destekleyen ve her daim yanımda olduklarını hissettiren aileme ve çalışma süresince beni destekleyen, motive eden ve yanımda olan arkadaşlarıma,

Teşekkür ederim.

Eda AYDIN

Ocak 2020, Ankara

# İÇİNDEKİLER

|                                                  |       |
|--------------------------------------------------|-------|
| ÖZET.....                                        | i     |
| ABSTRACT.....                                    | iii   |
| TEŞEKKÜR.....                                    | v     |
| İÇİNDEKİLER.....                                 | vi    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                             | viii  |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....                           | xvi   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                     | xviii |
| 1. GİRİŞ.....                                    | 1     |
| 1.1. Kalderalar.....                             | 1     |
| 1.1.1. Kaldera Geometrisi: Yapısal Unsurlar..... | 3     |
| <i>Topoğrafik kaldera sınırı</i> .....           | 3     |
| <i>Kaldera duvarı</i> .....                      | 3     |
| <i>Çökme yakası</i> .....                        | 4     |
| <i>Sınır fayları</i> .....                       | 4     |
| <i>Kaldera içi dolgusu</i> .....                 | 4     |
| <i>Yapısal kaldera tabanı</i> .....              | 5     |
| <i>Kaldera-altı magma odası</i> .....            | 5     |
| 1.1.2. Kaldera Çökme Süreçleri.....              | 5     |
| <i>Plaka (Piston) tipi çökme</i> .....           | 6     |
| <i>Parçalı (Piecemeal) çökme</i> .....           | 6     |
| <i>Kapak (Trap-door) tipi çökme</i> .....        | 6     |
| <i>Göçük (Downsag) tipi çökme</i> .....          | 8     |
| <i>Huni tipi çökme</i> .....                     | 8     |
| 1.2. Kaldera Deneyleri.....                      | 8     |
| 1.2.1. Sentez.....                               | 20    |
| 1.3. Motivasyon.....                             | 22    |
| 2. METODOLOJİ.....                               | 24    |
| 2.1. Analog Kaldera Modelleri.....               | 24    |

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1.1. Kum Havuzu Modelleri.....                                                       | 24  |
| 2.1.1.1. Kullanılan Ekipman ve Malzeme.....                                            | 24  |
| 2.1.1.2. Deney Süreci.....                                                             | 26  |
| 2.1.1.3. Kum Havuzu Deneyleri Gözlem Yöntemleri.....                                   | 28  |
| 2.1.1.3.1. Hareketten-Yapı/Çok-Bakılı Stereofotogrametri (HY-ÇBS)...                   | 29  |
| 2.1.1.3.2. Stereofotogrametrik Yüzey Modellerinin Hassasiyeti.....                     | 38  |
| 2.1.1.3.3. Parçacık Takibi Yöntemi.....                                                | 41  |
| 2.1.2. Sabitlenmiş (Fixed) Kum Havuzu Modelleri ve Onların Mikro-CT<br>Analizleri..... | 45  |
| 2.1.2.1. Kullanılan Ekipman ve Malzeme.....                                            | 45  |
| 2.1.2.2. Deney Süreci.....                                                             | 47  |
| 2.1.2.3. Gözlem.....                                                                   | 51  |
| 2.1.2.3.1. X-ışını Tomografisi / X-ışını Mikrotomografisi (Mikro-CT)...                | 51  |
| 2.2. Nümerik Modeller .....                                                            | 56  |
| 3. BULGULAR.....                                                                       | 64  |
| 3.1. Analog Modeller.....                                                              | 64  |
| 3.1.1. Kum Havuzu Modelleri.....                                                       | 64  |
| 3.1.2. Sabitlenmiş Kum Havuzu Modelleri.....                                           | 72  |
| 3.2. Nümerik Modeller.....                                                             | 77  |
| 4. TARTIŞMA VE YORUM.....                                                              | 96  |
| 5. SONUÇLAR.....                                                                       | 112 |
| 6. KAYNAKLAR.....                                                                      | 115 |
| EKLER.....                                                                             | 125 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                          | 160 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 1.1.</b> | Basitleştirilmiş kaldera modeli: kalderaların yapısal unsurları (Lipman (1997)'den Ulusoy (2002)'nin Türkçeleştirdiği haliyle)...                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 3  |
| <b>Şekil 1.2.</b> | Magma odasının geometrisi ve derinliğine bağlı olarak gelişen kaldera çökme tipleri (Lipman (1997)'den Ulusoy (2002)'nin Türkçeleştirdiği haliyle alınmıştır).....                                                                                                                                                                                                                                                                               | 7  |
| <b>Şekil 1.3.</b> | Komuro ve ark. (1984)'ün analog kaldera çökme deneyleri: <b>(a)</b> deney düzeneği, <b>(b)</b> farklı yarıçapa (R) sahip magma odalarıyla yapılan iki deney sonucunun harita ve kesit görünümü. <b>(c)</b> Komuro (1987)'nin analog kaldera çökme deneyi sonuçları; soldaki model yükselme ve çökme, sağdaki model yalnızca çökme (Acocella (2007)'den Türkçeleştirilerek alınmıştır).....                                                       | 9  |
| <b>Şekil 1.4.</b> | <b>(a)</b> Marti ve ark. (1994)'ün deneyleri: <b>(a)</b> deney düzeneği, <b>(b)</b> magma odasının şişmesi ve çökmesine bağlı olarak gelişen fayların kesit görünümü. Roche ve ark. (2000)'in kaldera çökme deneyleri: <b>(c)</b> deney düzeneği, <b>(d)</b> huni tipi (üstteki) ve plaka tipi (alttaki) kalderaların deformasyon modeli (Acocella (2007)'den Türkçeleştirilerek alınmıştır).....                                                | 11 |
| <b>Şekil 1.5.</b> | Acocella ve ark. (2000)'in kaldera çökme ve resürjans deneyleri: <b>(a)</b> deney düzeneği, <b>(b)</b> çökme ve resürjansa bağlı olarak oluşan fayların kesit görünümü (Acocella ve ark. (2000)'den Türkçeleştirilerek ve renklendirilerek alınmıştır). Acocella ve ark. (2001)'in çökme deneyleri: <b>(c)</b> deney düzeneği, <b>(d)</b> simetrik ve asimetrik çökmenin kesit görünümü (Acocella (2007)'den Türkçeleştirilerek alınmıştır)..... | 12 |
| <b>Şekil 1.6.</b> | Walter ve Troll (2001)'in deneyleri: <b>(a)</b> deney düzeneği, <b>(b)</b> magma odasının çökme ve yükselmesine bağlı olarak gelişen fayların kesit görünümü (Acocella (2007)'den Türkçeleştirilerek alınmıştır). Troll ve ark. (2002)'nin kaldera çökme deneyleri: <b>(c)</b>                                                                                                                                                                   |    |

|                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|                    | deney düzeneği, <b>(d)</b> balonun şişmesi ve sönmesiyle oluşan fayların kesit görünümü (Troll ve ark. (2002)'den Türkçeleştirilerek alınmıştır).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 14 |
| <b>Şekil 1.7.</b>  | Cailleau ve ark. (2003)'ün kaldera çökme deneyleri: <b>(a)</b> deney düzeneği, <b>(b)</b> analog ve nümerik model sonuçları (Cailleau ve ark. (2003)'ten Türkçeleştirilerek alınmıştır). Kennedy ve ark. (2004)'ün deneyleri: <b>(c)</b> deney düzeneği, <b>(d)</b> farklı tip magma odalarının çökmesi sonucu gelişen çember fayların kesit görünümü (Kennedy ve ark. (2004)'ten Türkçeleştirilerek alınmıştır).....                                                                | 15 |
| <b>Şekil 1.8.</b>  | Lavallée ve ark. (2004)'ün deneyleri: <b>(a)</b> deney düzeneği, <b>(b)</b> farklı topoğrafik rölyef şekillerinin kaldera çökmesine etkisini gösteren deney sonucu (Lavallée ve ark. (2004)'ten Türkçeleştirilerek alınmıştır). Acocella ve ark. (2004)'ün kaldera çökme deneyleri: <b>(c)</b> deney düzeneği, <b>(d)</b> çöküntü tiplerinin faylanmaya etkisi kesit görünümü olarak sunulmuştur (Acocella ve ark. (2004)'ten Türkçeleştirilerek ve renklendirilerek alınmıştır).... | 17 |
| <b>Şekil 1.9.</b>  | Holohan ve ark. (2005)'in kaldera çökme deneyleri: <b>(a)</b> deney düzeneği, <b>(b)</b> bölgesel gerilmenin faylanmaya etkisi kesit görünümü şeklinde sunulmuştur (Acocella (2007)'den Türkçeleştirilerek alınmıştır). Geyer ve ark. (2006)'nın deneyleri: <b>(c)</b> deney düzeneği, <b>(d)</b> çökme süreçlerinin yapısal evrimi (Geyer ve ark. (2006)'dan Türkçeleştirilerek alınmıştır).....                                                                                    | 19 |
| <b>Şekil 1.10.</b> | <b>(a)</b> Kabarma sonucu topoğrafyada oluşan ışınal (radyal) çatlaklar, (kabarma sonucu topoğrafyanın zirve kısmında oluşan bölgesel çöküntü alanı kırmızı renkte gösterilmiştir), <b>(b)</b> Kabarma sonucu topoğrafyanın zirve kısmında oluşan bölgesel çöküntü alanı, <b>(c)</b> Çökme esnasında oluşan dışa ve içe dalımlı sınır fayları.....                                                                                                                                   | 22 |
| <b>Şekil 2.1.</b>  | Deney düzeneği taslağı <b>(a)</b> üstten görünüm, <b>(b)</b> yandan görünüm.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 25 |
| <b>Şekil 2.2.</b>  | Deney düzeneği.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 26 |

|                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.3.</b>  | Deney aşaması. T0: referans aşaması, T1, T2, T3: kabarma (tumescence), T4: kaldera çökmesi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 27 |
| <b>Şekil 2.4.</b>  | Temsili magma odalarının (su balonları) boyutlarının deneylere göre karşılaştırılması.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 28 |
| <b>Şekil 2.5.</b>  | Fotoğrafa dayalı 3B yeniden yapılanma (reconstruction) için basitleştirilmiş görüntü elde etme gösterimi (Bemis ve ark., (2014)’ten Türkçeleştirilerek alınmıştır).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 30 |
| <b>Şekil 2.6.</b>  | 3B yeniden yapılanmada (reconstruction) fotogrametrinin temel prensipleri (Bemis ve ark., (2014)’ten Türkçeleştirilerek alınmıştır).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 31 |
| <b>Şekil 2.7.</b>  | Fotoğrafa dayalı 3B yeniden yapılanma (reconstruction) işlemini gösteren genel iş-akış şeması (Bemis ve ark., (2014)’ten Türkçeleştirilerek alınmıştır).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 32 |
| <b>Şekil 2.8.</b>  | Deneyin HY-ÇBS ile 3B modellenmesi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 34 |
| <b>Şekil 2.9.</b>  | (a) Farklı açı ve yüksekliklerden çekilen fotoğrafların kum havuzuna göre konumu, (b) referans noktalarının konumu.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 35 |
| <b>Şekil 2.10.</b> | (a) Seyrek nokta bulutu, (b) yoğun nokta bulutu, (c) ağ oluşumu, (d, e, f) doku yapılanması.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 36 |
| <b>Şekil 2.11.</b> | Modelleme sonucu oluşturulan sayısal modellere örnekler: (a) ortofoto görüntüsü, (b) SYM görüntüsü, (c) gölgeli kabartı görüntüsü, (d) gölgeli kabartı görüntüsü üzerine oturtulmuş renkli sayısal yükseklik modeli.....                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 38 |
| <b>Şekil 2.12.</b> | Stereofotogrametrik kaldera modellerinin hassasiyetini ölçmek için tasarlanan kontrol deneyi düzeneği. (a) Referanslı şablon üzerine yapıştırılan, su bazlı yapıştırıcı ile sabitlenen kum-un karışımı tepeciği, (b) Sabit tepeciğin Mikro-CT ile görüntülenmiş yüzey görüntüsü, (c) HY-ÇB stereofotogrametri ile oluşturulan yüzey modeli ve (d) her iki yöntemle modellenen/görüntülenmiş sabit tepeciğin referans noktaları yardımı ile referanslanarak üstüste oturtulmuş görüntüsü (bordo renkler Mikro-CT |    |

|                    |                                                                                                                                                                                              |    |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|                    | görüntüsünü, sarı yüzey de HY-ÇBS modelini göstermekte).....                                                                                                                                 | 39 |
| <b>Şekil 2.13.</b> | Stereofotogrametrik kaldera modellerinin hassasiyetini ölçmek için tasarlanan kontrol deneyi düzeneğinin stereofotogrametrik modeli ve modeli oluşturmak için alınan fotoğraf konumları..... | 40 |
| <b>Şekil 2.14.</b> | Parçacık Görüntüleme Velosimetrisi'nin temel gösterimi (Boutelier (2016)'dan Türkçeleştirilerek alınmıştır).....                                                                             | 43 |
| <b>Şekil 2.15.</b> | Model 12'nin T0 ve T1 aşamalarında çekilen ardışık iki fotoğrafı arasındaki yer değiştirmenin şematik gösterimi.....                                                                         | 44 |
| <b>Şekil 2.16.</b> | Deney düzeneği <b>(a)</b> üstten görünüm, <b>(b)</b> yandan görünüm.....                                                                                                                     | 46 |
| <b>Şekil 2.17.</b> | Deney düzeneği.....                                                                                                                                                                          | 47 |
| <b>Şekil 2.18.</b> | Deney sürecini nadir bakış açısıyla gösteren temsili deney süreci fotoğrafları.....                                                                                                          | 49 |
| <b>Şekil 2.19.</b> | Modele yerleştirilen 10,5 cm çaplı silindir şekilli asetatin yerleştirilmesi.....                                                                                                            | 50 |
| <b>Şekil 2.20.</b> | İlk oluşturulan sabitlenmiş modelin farklı açılardan fotoğrafları.....                                                                                                                       | 50 |
| <b>Şekil 2.21.</b> | İkinci sabitlenmiş modelin enine kesit fotoğrafları: <b>(a, b)</b> modelin yarı-dairesel kesit fotoğrafı, <b>(c, d)</b> modelin çeyrek dairesel kesit fotoğrafı.....                         | 51 |
| <b>Şekil 2.22.</b> | Sabitlenmiş modelin X-ışını tomografisi ile elde edilen (aşağıdan yukarıya doğru sunulmuş) üstten görüntüsü.....                                                                             | 54 |
| <b>Şekil 2.23.</b> | Sabitlenmiş modelin X-ışını tomografisi ile elde edilen kesitler halinde görüntüsü (kırmızı çizgiler, fayları temsil etmektedir).....                                                        | 55 |
| <b>Şekil 2.24.</b> | Kaldera modelleri için bir baz model olan Mogi modeli.....                                                                                                                                   | 57 |
| <b>Şekil 2.25.</b> | İki boyutta oluşturan modelin kesit görüntüsü (Charco ve del Sastre (2014)'ten alınmıştır).....                                                                                              | 59 |
| <b>Şekil 2.26.</b> | Nümerik modellerin oluşum aşamalarını gösteren iş akış şeması....                                                                                                                            | 60 |
| <b>Şekil 2.27.</b> | Tez çalışması kapsamında oluşturulan iki boyutlu modellerin sınır koşulları.....                                                                                                             | 62 |



|                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.28.</b> | Dörtgen kafes ağının iki boyutlu modelde gösterimi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 63 |
| <b>Şekil 3.1.</b>  | Model 01'in sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 66 |
| <b>Şekil 3.2.</b>  | Kalderaların çökme miktarının şematik gösterimi ( $K_1$ üst plakanın, $K_2$ orta plakanın ve $K_3$ alt plakanın ortalama yüksekliğini belirtirken; $T_0$ referans aşamasının ortalama yüksekliğini, $T_1$ volkan domunun (tumescene) en yüksek noktasını, $T_2$ çökmenin maksimum olduğu noktayı ve $T_3$ kaldera sınırının maksimum yüksekliğini belirtmektedir)..... | 67 |
| <b>Şekil 3.3.</b>  | Blok fayı içeren (Model 01) ve içermeyen (Model 13) kaldera modellerini gösteren şekil.....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 67 |
| <b>Şekil 3.4.</b>  | Model 04 (eliptik) ve Model 14 (dairese)l'ün uzunluk/genişlik ( $L/g$ ) oranlarını gösteren şekil.....                                                                                                                                                                                                                                                                 | 68 |
| <b>Şekil 3.5.</b>  | Model 12'nin sayısal parçacık takip algoritmasıyla analiz edilmesi sonucunda gözlenen yüzey deformasyonunu gösteren şekil.....                                                                                                                                                                                                                                         | 71 |
| <b>Şekil 3.6.</b>  | Kesit fotoğrafı üzerinde dışa doğru dalımlı sınır faylarının açılarının aşamalı olarak gösterimi (BF: blok fayı).....                                                                                                                                                                                                                                                  | 73 |
| <b>Şekil 3.7.</b>  | Sabitlenmiş kum havuzu modeli ve fayların üç boyutlu gösterimi...                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 74 |
| <b>Şekil 3.8.</b>  | Dışa doğru dalımlı ters fayların <b>(a)</b> magma odasına paralel kesitte (z eksenı boyunca) alınan görüntüsü üzerinde açıların gösterimi, <b>(b)</b> magma odasına dik kesitte (x eksenı boyunca) alınan görüntüsü üzerinde açıların gösterimi.....                                                                                                                   | 75 |
| <b>Şekil 3.9.</b>  | Sabitlenmiş modelin; <b>(a)</b> kesit görüntüsü, <b>(b)</b> kesit görüntüsü üzerinde belirtilen yapısal unsurlar, <b>(c)</b> yer değıştirme miktarı.....                                                                                                                                                                                                               | 75 |
| <b>Şekil 3.10.</b> | Model üzerinde gözlenen; <b>(a)</b> kaldera oluşumundan önceki tabaka düzlemlerinin durumunun farklı renklerle (kırmızı, sarı, mavi, yeşil) gösterimi, <b>(b)</b> yer değıştirme miktarını gösteren şekil, <b>(c)</b> yer değıştirme vektörlerini gösteren şekil.....                                                                                                  | 76 |
| <b>Şekil 3.11.</b> | Oluşturulan nümerik modellerin işleyişini anlatan şekil; <b>(a)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |

|                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|                    | topoğrafyanın 0. saniyedeki konumu, <b>(b)</b> topoğrafyanın 10. saniyedeki konumu, <b>(c)</b> yüzeyden itibaren 3 km derinden alınan yatay yer değiştirme profili, <b>(d)</b> yüzeyden itibaren 3 km derinden alınan yatay stres profili, <b>(e)</b> yer değiştirme grafiği, <b>(f)</b> gerilme grafiği..... | 79 |
| <b>Şekil 3.12.</b> | Farklı şekil ve boyutlardaki magma odalarının farklı topoğrafyalardaki 0. s’de gösterimi.....                                                                                                                                                                                                                 | 80 |
| <b>Şekil 3.13.</b> | Farklı boyutlardaki sil tipi magma odasının 5 km derinliğindeki farklı topoğraflarda 0. s’de gösterimi.....                                                                                                                                                                                                   | 81 |
| <b>Şekil 3.14.</b> | 4 km - 10 km derinlikteki eliptik şekilli magma odasının 10. s’deki Von mises gerilme grafikleri.....                                                                                                                                                                                                         | 82 |
| <b>Şekil 3.15.</b> | 5 km derinlikteki eliptik şekilli magma odasının 0 – 10 s aralığındaki Von mises gerilmesini gösteren şekil.....                                                                                                                                                                                              | 83 |
| <b>Şekil 3.16.</b> | 5 km derinlikteki eliptik şekilli magma odasının 0 – 10 s aralığında yer değiştirmesini gösteren şekil.....                                                                                                                                                                                                   | 84 |
| <b>Şekil 3.17.</b> | 5 km derinlikteki eliptik şekilli magma odasının yüzeyden 1 km – 4 km derinlikte kesit alınarak Von mises gerilmesini gösteren grafikler.....                                                                                                                                                                 | 85 |
| <b>Şekil 3.18.</b> | 5 km derinlikteki eliptik şekilli magma odasının yüzeyden 1 km – 4 km derinlikte kesit alınarak yatay yer değiştirmesini gösteren grafikler.....                                                                                                                                                              | 85 |
| <b>Şekil 3.19.</b> | Yüzeyden 5 km derindeki dairesel ve eliptik şekilli magma odası modellerinin yüzeyden 2 km derindeki Von Mises gerilmesini gösteren şekil.....                                                                                                                                                                | 86 |
| <b>Şekil 3.20.</b> | Yüzeyden 5 km derindeki dairesel ve eliptik şekilli magma odası modellerinin yüzeyden 2 km derindeki yatay yer değiştirmesini gösteren şekil.....                                                                                                                                                             | 87 |
| <b>Şekil 3.21.</b> | Yüzeyden 5 km derindeki farklı boyutlarda sil şekilli intrüzyon yapan magma odası modellerinin yüzeyden 2 km derindeki Von                                                                                                                                                                                    |    |

|                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                    | Mises gerilmesini gösteren şekil.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 88  |
| <b>Şekil 3.22.</b> | Yüzeyden 5 km derindeki farklı boyutlarda sil şekilli intrüzyon yapan magma odası modellerinin yüzeyden 2 km derindeki yatay yer değiştirmesini gösteren şekil.....                                                                                                                                                                                                                                    | 90  |
| <b>Şekil 3.23.</b> | Yüzeyden 4 km - 10 km derindeki eliptik şekilli magma odasının yüzeyden 3 km derindeki Von mises gerilmesini gösteren şekil.....                                                                                                                                                                                                                                                                       | 91  |
| <b>Şekil 3.24.</b> | Yüzeyden 4 km – 10 km derindeki eliptik şekilli magma odasının yüzeyden 3 km derindeki yatay yer değiştirmesini gösteren şekil...                                                                                                                                                                                                                                                                      | 92  |
| <b>Şekil 3.25.</b> | 4 km derindeki eliptik magma odasının <b>(a)</b> düz topoğrafya, <b>(b)</b> Muş basenini simüle eden topoğrafya üzerinde <b>(c, d)</b> yüzeyden itibaren 3 km derindeki yatay yer değiştirmesini gösteren şekil.....                                                                                                                                                                                   | 94  |
| <b>Şekil 3.26.</b> | 4 km derindeki eliptik magma odasının <b>(a)</b> düz topoğrafya, <b>(b)</b> Muş basenini simüle eden topoğrafya üzerinde <b>(c, d)</b> yüzeyden itibaren 3 km derindeki Von mises gerilmesini gösteren şekil.....                                                                                                                                                                                      | 95  |
| <b>Şekil 4.1.</b>  | Analog kaldera deneylerinde oluşan faylar: <b>(a)</b> Kabarma sırasında oluşan ışınsal çatlaklar (kırmızı) ve blok yapısı (mavi), <b>(b)</b> Kabarmanın ilerleyen aşamalarında gözlenen ışınsal çatlaklar (kırmızı) ve blok fayı (koyu mavi), <b>(c)</b> Çökme esnasında oluşan sınır fayları (yeşil, sarı), <b>(d)</b> Çökme sonrası oluşan blok fayı (koyu mavi) ve ışınsal çatlaklar (kırmızı)..... | 97  |
| <b>Şekil 4.2.</b>  | Sabitlenmiş dairesel kaldera modelinin z ekseni boyunca alınan <b>(a)</b> X-ışını tomografisi görüntüsü, <b>(b)</b> çizilmiş kesit görüntüsü.....                                                                                                                                                                                                                                                      | 98  |
| <b>Şekil 4.3.</b>  | Sabitlenmiş dairesel modelin X-ışını tomografisi ile elde edilen üstten görüntüsü (yeşil: sınır fayı (çember fay), kırmızı: ışınsal fay, mavi: blok fayı).....                                                                                                                                                                                                                                         | 100 |
| <b>Şekil 4.4.</b>  | Sabitlenmiş dairesel kaldera modelinin x ekseni boyunca alınan <b>(a)</b> X-ışını tomografisi görüntüsü, <b>(b)</b> çizilmiş kesit görüntüsü.....                                                                                                                                                                                                                                                      | 101 |
| <b>Şekil 4.5.</b>  | Sabitlenmiş çeyrek dairesel kaldera modelinin <b>(a)</b> X-ışını Mikro-CT görüntüsü, <b>(b)</b> çizilmiş kesit görüntüsü.....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 102 |

|                    |                                                                                                                                                                                                                         |     |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.6.</b>  | Parçalı kaldera çökmelerine Dünya'dan örnekler.....                                                                                                                                                                     | 104 |
| <b>Şekil 4.7.</b>  | Doğadaki kaldera örneklerinin yapısal unsurlarını gösteren şekil (Acıgöl kalderasının topoğrafik kaldera sınırı Ulusoy ve ark. (2009)'dan alınarak belirlenmiştir).....                                                 | 106 |
| <b>Şekil 4.8.</b>  | Çeyranuçan çamur volkanının iki farklı deformasyon alanının yapısal bir sınır tarafından ayrıldığını gösteren şekil (Fotoğraf: Doç. Dr Orhan Abbasov).....                                                              | 107 |
| <b>Şekil 4.9.</b>  | Kaldera aspekt oranına göre $K_1$ ve $K_2$ bloklarının bağıl çökme ilişkisini gösteren grafik (kırmızı renkli noktalar doğadaki kalderaları, mavi renkli noktalar kaldera modellerini göstermektedir).....              | 108 |
| <b>Şekil 4.10.</b> | Kaldera modelleri ile doğadaki kalderaların çökme miktarlarını karşılaştıran şekil (kırmızı renkli noktalar doğadaki kalderaları, mavi renkli noktalar kaldera modellerini göstermektedir, TK: topoğrafik kaldera)..... | 109 |
| <b>Şekil 4.11.</b> | Kalderaların $K_1$ ve $K_2$ bloklarının çökme miktarı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (kırmızı renkli noktalar doğadaki kalderaları, mavi renkli noktalar kaldera modellerini göstermektedir).....                  | 111 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                     |                                                                                                                                                                  |     |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Çizelge 2.1.</b> | Deneyde kullanılan kum-un karışımı ve magma odası yükseklikleri.....                                                                                             | 27  |
| <b>Çizelge 2.2.</b> | 3B model oluşumunda her bir aşamada ortaya çıkan nokta sayısı...                                                                                                 | 36  |
| <b>Çizelge 2.3.</b> | Referanslama sonucunda referans noktalarında oluşan yaklaşım hataları.....                                                                                       | 37  |
| <b>Çizelge 2.4.</b> | Modeller için tanımlanan malzeme özellikleri.....                                                                                                                | 61  |
| <b>Çizelge 3.1.</b> | Kaldera modellerinin uzunluk/genişlik ( $L/g$ ) oranlarını gösteren çizelge.....                                                                                 | 69  |
| <b>Çizelge 3.2.</b> | Kaldera modellerinin topoğrafik çökme miktarlarını gösteren çizelge.....                                                                                         | 69  |
| <b>Çizelge 3.3.</b> | Kaldera modellerinin plakalarının çökme miktarları gösteren çizelge. $K_1$ , $K_2$ ve $K_3$ çöken plakaların ortalama yüksekliğini ifade ediyor (Şekil 3.2)..... | 70  |
| <b>Çizelge 3.4.</b> | Plakaların maksimum topoğrafik çökme yüksekliklerini gösteren çizelge.....                                                                                       | 70  |
| <b>Çizelge 3.5.</b> | 4-6 km derindeki eliptik magma odasının düz topoğrafya üzerinde yüzeyden itibaren 3 km derindeki yer değiştirme ve gerilme değerleri.....                        | 94  |
| <b>Çizelge 3.6.</b> | 4-6 km derindeki eliptik magma odasının Muş basenini simüle eden topoğrafya üzerinde yüzeyden itibaren 3 km derindeki yer değiştirme ve gerilme değerleri.....   | 95  |
| <b>Çizelge 4.1.</b> | Doğadaki kalderaların uzunluk/genişlik ( $L/g$ ) oranlarını gösteren çizelge.....                                                                                | 103 |
| <b>Çizelge 4.2.</b> | Doğadaki kaldera örneklerinin plakaları arasındaki çökme miktarını gösteren çizelge.....                                                                         | 108 |
| <b>Çizelge 4.3.</b> | Doğadaki kaldera örneklerinin topoğrafik çökme miktarlarını                                                                                                      |     |

|                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| gösteren çizelge.....                                                                                                             | 110 |
| <b>Çizelge 4.4.</b> Doğadaki kaldera örneklerinin plakalarının maksimum topoğrafik<br>çökme yüksekliklerini gösteren çizelge..... | 111 |



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|               |                                                              |
|---------------|--------------------------------------------------------------|
| cm            | Santimetre                                                   |
| mm            | Milimetre                                                    |
| km            | Kilometre                                                    |
| m             | Metre                                                        |
| $\mu\text{m}$ | Mikrometre                                                   |
| nm            | Nanometre                                                    |
| ml            | Mililitre                                                    |
| kg            | Kilogram                                                     |
| MP            | Megapiksel                                                   |
| Ma            | Miliamper                                                    |
| Pa            | Pascal                                                       |
| MPa           | Megapascal                                                   |
| N             | Newton                                                       |
| s             | Saniye                                                       |
| $\sigma$      | Gerilme                                                      |
| E             | Elastisite modülü                                            |
| V             | Poisson oranı                                                |
| $\epsilon$    | Birim deformasyon                                            |
| u             | Yer değiştirme                                               |
| n             | Düzleme dik yöndeki vektör (düzlem normal)                   |
| $\Delta P$    | Basınç değişimi                                              |
| rad           | Radyan                                                       |
| T0            | Analog kaldera modellerinin deney aşaması (referans aşaması) |

|                |                                                                  |
|----------------|------------------------------------------------------------------|
| T1, T2, T3     | Analog kaldera modellerinin deney aşaması (kabarma (tumescence)) |
| T4             | Analog kaldera modellerinin deney aşaması (kaldera çökmesi)      |
| K <sub>1</sub> | Kaldera modellerinin üst plakası                                 |
| K <sub>2</sub> | Kaldera modellerinin orta plakası                                |
| K <sub>3</sub> | Kaldera modellerinin alt plakası                                 |
| T <sub>0</sub> | Referans aşamasının ortalama yüksekliği                          |
| T <sub>1</sub> | Kabarmanın (tumescence) en yüksek noktası                        |
| T <sub>2</sub> | Çökmenin maksimum olduğu noktanın yüksekliği                     |
| T <sub>3</sub> | Topoğrafik kaldera sınırının maksimum yüksekliği                 |
| L              | Uzunluk                                                          |
| g              | Genişlik                                                         |

#### **Kısaltmalar**

|          |                                                          |
|----------|----------------------------------------------------------|
| HY-ÇBS   | Hareketten Yapı-Çok Bakılı Stereofotogrametri            |
| PT       | Parçacık Takibi                                          |
| Mikro-CT | Mikro-Bilgisayarlı Tomografi (Micro-Computed Tomography) |
| TK       | Topoğrafik Kaldera                                       |
| BF       | Blok Fayı                                                |
| 3B       | Üç boyutlu                                               |
| SYM      | Sayısal Yükseklik Modeli                                 |



# 1. GİRİŞ

## 1.1. Kalderalar

Kalderalar, magma odasının üst zonlarının volkanik patlamalar ile hızla boşalması sonucu volkan çatısının, boşalan magma odası üzerine çökmesiyle oluşan dairesel/yarı dairesel çöküntülerdir (Lipman, 1997). Birkaç kilometreküpten daha büyük hacimli magmatik patlamaların kaldera oluşumuna eşlik ettiği bilinmektedir (Lipman, 1997). Genelde kalderaların çapı, ilgili patlamaların hacmiyle orantılı olarak artmaktadır (Lipman, 1997). Çapları birkaç km'den birkaç on km'ye kadar ulaşabilmektedir.

“Kaldera” kelimesi, Latince “caldaria” sözcüğünden türetilmiştir ve ‘kazan’ (boiling pot) anlamına gelmektedir (Cole ve ark., 2005). İspanyolca'da da ‘kazan’ anlamına gelen kaldera kelimesi ilk olarak von Buch (1820) tarafından ortaya atılmıştır ve Kanarya Adaları'ndaki La Palma adasında bulunan volkanik çöküntü (La Caldera de Taburiente) için bu terimi kullanmıştır (Lockwood ve Hazlett, 2010). 19. yüzyılın ortalarına doğru, Lyell (1855) Kanarya Adaları'ndaki La Palma'da, Fouqué (1879) Ege'deki Santorini'de, Dutton (1884) Hawaii'deki Kilauea'da ve özellikle Verbeek (1885) Endonezya'daki 1883 Krakatau patlaması ile oluşmuş kalderalar hakkında çalışmışlardır (Sigurdsson, 2000). 20. yüzyılın ortalarında ise Oregon, Crater Lake'de çalışan Williams (1941), “Calderas and Their Origin” kitabı ile kalderalar ile ilgili yeni bakış açıları geliştirmiş (Lockwood ve Hazlett, 2010) ve 20. yüzyılın başlarında kullanılan çeşitli sınıflandırmaları özetlemiştir (Cole ve ark., 2005). Williams ve McBirney (1979) kalderaları yeniden tanımlamıştır ve Lipman (1995, 1997) ‘uç-üye’ (end-member) sınıflandırmasıyla kaldera çökme süreçlerini ve tiplerini ele almıştır.

Cole ve ark. (2005), patlayan magmanın kimyasal bileşimine göre kalderaları bazaltik, peralkali, andezitik-dasitik ve riyolitik olarak dört farklı grupta tanımlamıştır:

Bazaltik kalderalar patlamalı (explosive) veya akıntılı (effusive) karakterli olabilmektedir. Yayılımlı bazaltik kalderalar Hawaii ve Galapagos Adaları gibi sıcak noktadaki kalkan volkanlar ile ilişkilendirilmektedir (Cole ve ark., 2005). Patlayıcı (explosive) bazaltik kalderalara ise Nikaragua'daki Masaya Volkanı örnek olarak

verilebilir (Cole ve ark., 2005). Peralkali kalderalar tipik olarak, bir dalma-batma sistemine bağılı olmayan, riftleşme zonlarıyla ilişkilidir ve Doğu Afrika Rifti'nde yaygındırlar (Cole ve ark., 2005). Buna karşın, Çubukçu ve ark. (2012), yine bir kaldera oluşturan Nemrut peralkali volkanizmasının oluşumunu, dalma-batma ile ilişkili kısmen farklılaşmış astenosferik eriyiklerin üst kabuksal seviyelere yükselmesi ve Muş ramp basenindeki lokal genişleme gerilimi etkisindeki rezervuarlara yerleşmesiyle ilişkilendirmektedir.

Andezitik-dasitik kalderalar tipik olarak ada yayları ve kıta kenarı yaylarındaki volkanlarda meydana gelen yaklaşan (convergent) plaka sınırları ile ilişkilendirilmektedir (Cole ve ark., 2005). Crater Lake kalderası bunlara örnek olarak verilebilir (Cole ve ark., 2005). Riyolitik kalderalar ise genellikle büyük çöküntü depresyonlarıdır ve oluşan kalderaların çapı genellikle 10 km'den büyüktür (Cole ve ark., 2005).

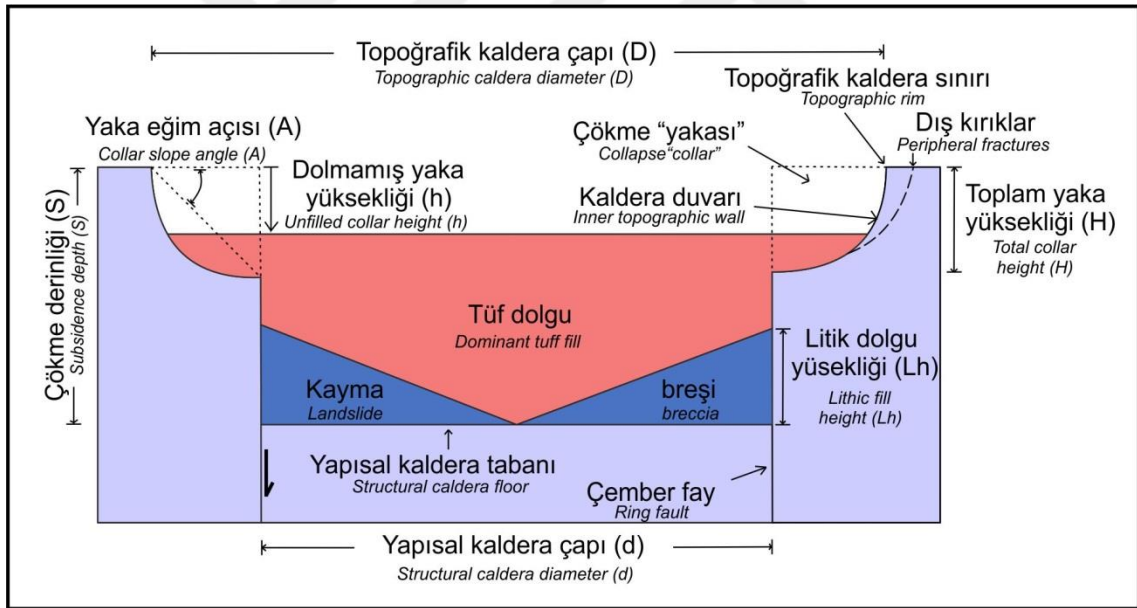
İyi korunmuş morfolojileriyle, az aşınmış genç kalderalar; gömülü yapılar, çökme derinliği veya magma odası ile ilgili çok az düzeyde bilgi sağlarlar (Lipman, 1997). Bunun aksine, erozyonun katılaşmış magma odasının subvolkanik yapılarını ortaya çıkarmak için yeterince ilerlediği durumlarda, bu tür yapıların ve intrüzyonların püskürmelerle ve yüzeysel volkanik morfolojiyle olan ilişkileri çoğunlukla anlaşılması güç hale gelmiştir (Lipman, 1997; Ulusoy ve ark., 2004). Geyer ve Martí (2008), kaldera çökme süreçlerinin çalışılmasını ve anlaşılmasını erişilebilir ve daha kullanışlı hale getirmek amacıyla bir Kaldera veritabanı (Collapse Caldera Database-CCDB) oluşturmuşlardır. Bu veritabanı Dünya'daki bütün kalderaları içermemektedir, fakat 200'den fazla referans içeren kalderaların yayınlanmış saha çalışmalarının kapsamlı bir derlemesini içermekte ve Coğrafi Bilgi Sistemi (GIS) uygulamasına bağılı bir veritabanındaki bilgiler özetlenmektedir. CCDB'ye kaydedilen bilgiler başlıca yedi sınıfta gruplandırılmıştır. Bunlar: kaldera özellikleri, kaldera oluşturan çökellerinin özellikleri, magmatik sistem, jeodinamik ortam, kaldera öncesi volkanizma, kaldera oluşturan patlama sekansı ve kaldera sonrası faaliyetlerden oluşmaktadır.

### 1.1.1. Kaldera Geometrisi: Yapısal Unsurlar

Basitleştirilmiş bir kaldera modelinin (Şekil 1.1) ana yapısal ve morfolojik unsurları; topoğrafik kaldera sınırı, kaldera duvarı, sınır fayları (eğer mevcutsa), yapısal kaldera tabanı, kaldera içi dolgusu ve altta kalan magma odası veya katılaşmış plütondan oluşmaktadır (Lipman, 1984). Bu yapısal-morfolojik tanımlar şöyle özetlenebilir:

#### Topoğrafik kaldera sınırı

Topoğrafik sınır, kalderanın çöküntü alanını sınırlayan ve genellikle dışta kalan konumlarını koruyan volkanik yamaçlarca tanımlanan dairesel sırttır (Lipman, 1997). Genç kalderalar için topoğrafik sınır çökmenin bölgesel uzanımını tanımlarken, erozyona uğramış kalderalar için ise toprak kaymaları, ilksel topoğrafik sınırı büyütme eğilimindedir (Lipman, 1997).



Şekil 1.1. Basitleştirilmiş kaldera modeli: kalderaların yapısal unsurları (Lipman (1997)'den Ulusoy (2002)'nin Türkçeleştirdiği haliyle).

#### Kaldera duvarı

Kaldera duvarı, genellikle genç kalderaların üst kısımlarında dik, ancak taban kısımlarında düzleşen bir içbükey profile sahip olma eğilimindedir (Lipman, 1997).

Topoğrafik olarak genişlemiş kaldera duvarının tabanındaki kaldera içi dolgusu, yerçekimine bağlı çökmeler, kaymalar ile doğrudan depolanabilmektedir (Lipman, 1997). Devam eden çökmeler nedeniyle bu tür yapıların mevcut morfolojilerini korumaları pek mümkün değildir (Lipman, 1997).

#### *Çökme yakası*

Topoğrafik kaldera sınırı ile yapısal kaldera sınırı arasında kalan kayaç hacmi çökme yakası olarak tanımlanır (Lipman, 1997). Kaldera duvarlarının ortalama eğimi (yaka eğim açısı) genellikle  $25^{\circ}$  ve olası bir üst sınırı  $45^{\circ}$ 'dir. Erode olmuş kalderalarda çökme yakası boyunca  $10-15^{\circ}$  kadar düşük eğimler genellikle korunan tek kısımdır (Lipman, 1997).

#### *Sınır fayları*

Derinlemesine erode olmuş bazı kalderalarda, yay şeklindeki sınır fayları (çember faylar), plaka (piston) tipi çökmeyi yansıtmaktadır (Lipman, 1997). Bu faylar, yüzeye yakın kesimlerde içe doğru dalımlı çember faylar şeklinde gözlenirken, magma odasına yakın seviyelerde dışa doğru dalımlı oldukları gözlenmektedir (Lipman, 1997). İçe ve dışa eğimli fayların bu durumu kaldera deneylerinde de gözlenmektedir (Marti ve ark., 1994; Roche ve ark., 2000; Acocella ve ark., 2000; Walter ve Troll, 2001; Kennedy ve ark., 2004).

#### *Kaldera içi dolgusu*

Kaldera içi dolgusu, kaldera süreçleri için önemli kanıtlar sunmaktadır, çünkü ilgili patlamalar sırasında volkan çatısının büyük bir kısmı veya tamamı çökmektedir ve çökmeyi oluşturan patlama ürünleri ve çökme nedenli kayma breşleri çöküntü alanı içinde kilometrelerce kalınlıkta depolanabilmektedir (Lipman, 1976). Kayma breşi ve kaldera içi tufünün hacmi ve dağılımı, çökme geometrisi ve zamanlaması hakkında önemli kanıtlar sağlamaktadır (Lipman, 1997). Kaldera sonrası volkanizma da kaldera içi dolgunun kaynaklarından biridir.

### *Yapısal kaldera tabanı*

Çöküntü alanındaki yapısal kaldera tabanının geometrisi, çökme sırasında topoğrafyada meydana gelen bozulmadan dolayı genellikle belirsizliğini korumaktadır. Yapısal kaldera tabanı, kaldera çöküntüsü öncesindeki yer yüzeyidir (Lipman, 1997).

Bazı kalderaların, yapısal tabanlarını açığa çıkaran derinliklere kadar erode olduğu gözlenebilir, bunlar volkanik evrimin net bir kaydını bize sunmaktadır; birçoğunda magma, tabanın tahrip olan sığ derinliklerine kadar yükselmiştir (Lipman, 1997). Derin seviyelerine kadar erode olmuş birçok kalderadaki çökme yapıları, art arda püskürmeler veya sonrasında gelişen bölgesel tektonizma çökme olayları ile ilgili karmaşık yapılar sunar (Lipman, 1997).

### *Kaldera-altı magma odası*

Derin seviyelere kadar erode olmuş birçok kalderada magma odalarının, katılmış plütonlar veya batolitler olarak açığa çıktığı görülmektedir (Lipman, 1997). Bu yüzeylenme püskürmüş volkaniklerle yapılan yaş korelasyonları ve petrolojik ilişkilerle de desteklenmektedir (Lipman, 1997).

#### **1.1.2. Kaldera Çökme Süreçleri**

Kalderaların çökme geometrilerine, magma odasının boyut, geometri ve derinliğinin, bölgesel tektonik rejimin, mevcut tektonik yapıların ve çöken örtüdeki kayaçların doğası ve dayanıklılığının etki ettiği bilinmektedir (Roche ve ark., 2000; Lockwood ve Hazlett, 2010). Kalderaların geniş çeşitlilikteki çökme süreçleri ve geometrileri, magma odalarının farklı boyutlarının, farklı derinliklerinin, çatı geometrilerinin ve bütün bunların önceki volkanik ve tektonik etkiler altındaki durumlarının sonucunu yansıtmaktadır (Lipman, 1997). Literatürde çok sayıda kaldera çökme süreci önerilmiştir (Cole ve ark., 2005). Ancak Lipman (1997), önceki çalışmalardan (Smith ve Bailey, 1968; Aramaki, 1984; Lipman, 1984; Walker, 1984; Yokoyama ve Mena, 1991; Branney ve Kokelaar, 1994; Branney, 1995) esinlenerek beş farklı kaldera çökme süreci tanımlamıştır (Şekil 1.2); bu çökme tiplerinin ara elemanları olabileceğini de not etmektedir:

### *Plaka (piston) tipi çökme*

Plaka tipi çökme (Şekil 1.2), dik dalımlı çember faylar boyunca, boşalan magma odasına uyumlu bir bloğun çökmesini ifade eder (Cole ve ark., 2005). Sığ magma odalarına sahip, tek bir geniş hacimli püskürme ile oluştukları ifade edilir (Lipman, 1997).

### *Parçalı (Piecemeal) çökme*

Parçalı çökme (Şekil 1.2), hem yüksek oranda parçalanmış kaldera tabanına sahip morfolojiyi hem de farklı parçaların farklı zamanlarda veya farklı oranlarda yer aldığı çökme tipini tanımlamaktadır (Branney ve Kokelaar, 1994). Tek çökme ve püskürme olayından kaynaklanmak yerine, parçalı kalderaların birleşik veya iç içe kaldera özellikleri ile çoklu çökmeler ve püskürmeler sonucu oluştukları düşünülmektedir (Lockwood ve Hazlett, 2010).

### *Kapak (Trap-door) tipi çökme*

Kapak tipi çökme (Şekil 1.2), asimetrik bir magma odasına sahip daha küçük püskürmelerle veya bölgesel tektonik etkilerle oluşmaktadır (Lipman, 1997). Bir çember fayının oluşumunun tamamlanmadığı durumlarda kapak tipi çökmenin gerçekleşmesi beklenmektedir (Cole ve ark., 2005). Çökme, asimetrik magma odasından dolayı, bir tarafa doğru en derin hali almaktadır (Cole ve ark., 2005). Bathke ve ark. (2015), Tendürek volkanındaki çalışmasında, sayısal olarak modellenen çember-fayın geometrisinin, doğu yamaçlarında içe doğru eğimli normal fay ve volkanın batı yamaçlarında ise dışarı doğru eğimli ters fay içeren bir "kapak-tipi" çökme yapısı sunduğunu belirtmiştir. Kapak-tipi fay yapısının, asimetrik bir çöküntüden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, modellenen çember-fayın sırasıyla kuzey ve güney bölümlerinde sağ ve sol doğrultu atım bileşenlerine sahip olduğu öne sürülmektedir (Bathke ve ark., 2015).



**Şekil 1.2.** Magma odasının geometrisi ve derinliğine bağlı olarak gelişen kaldera çökme tipleri (Lipman (1997)'den Ulusoy (2002)'nin Türkçeleştirdiği haliyle alınmıştır).

### *Göçük (Downsag) tipi çökme*

Göçük tipi çökme (Şekil 1.2), çökmenin tamamlanmamış olduğu ve göreceli olarak sığ olduğu veya daha derin magma odaları ve daha küçük patlama hacimleri tarafından desteklendiği durumlarda oluşmaktadır (Lipman, 1997). Topoğrafya parçalanmadan çökmektedir (Lockwood ve Hazlett, 2010). Göçük tipi kalderaların, diğer çökme tiplerine göre daha az yaygın olduğu söylenebilir (Lockwood ve Hazlett, 2010).

### *Huni tipi çökme*

Huni tipi çöken kalderaların (Şekil 1.2) genellikle geniş bir 'V' veya 'huni' şeklindeki çöküntüler oluşturduğu bilinmektedir (Cole ve ark., 2005). Küçük kalderalar genellikle bir huni geometrisine sahiptir (Lipman, 1997). Bu tür kalderalar, merkezi bir volkan bacasından gelen püskürmeler ile oluşmaktadır (Lipman, 1997). Çember fayı veya uyumlu bir çökmüş blok içermezler ve nispeten küçük (ve derin ?) magma odalarının üzerine gelmektedirler (Lipman, 1997).

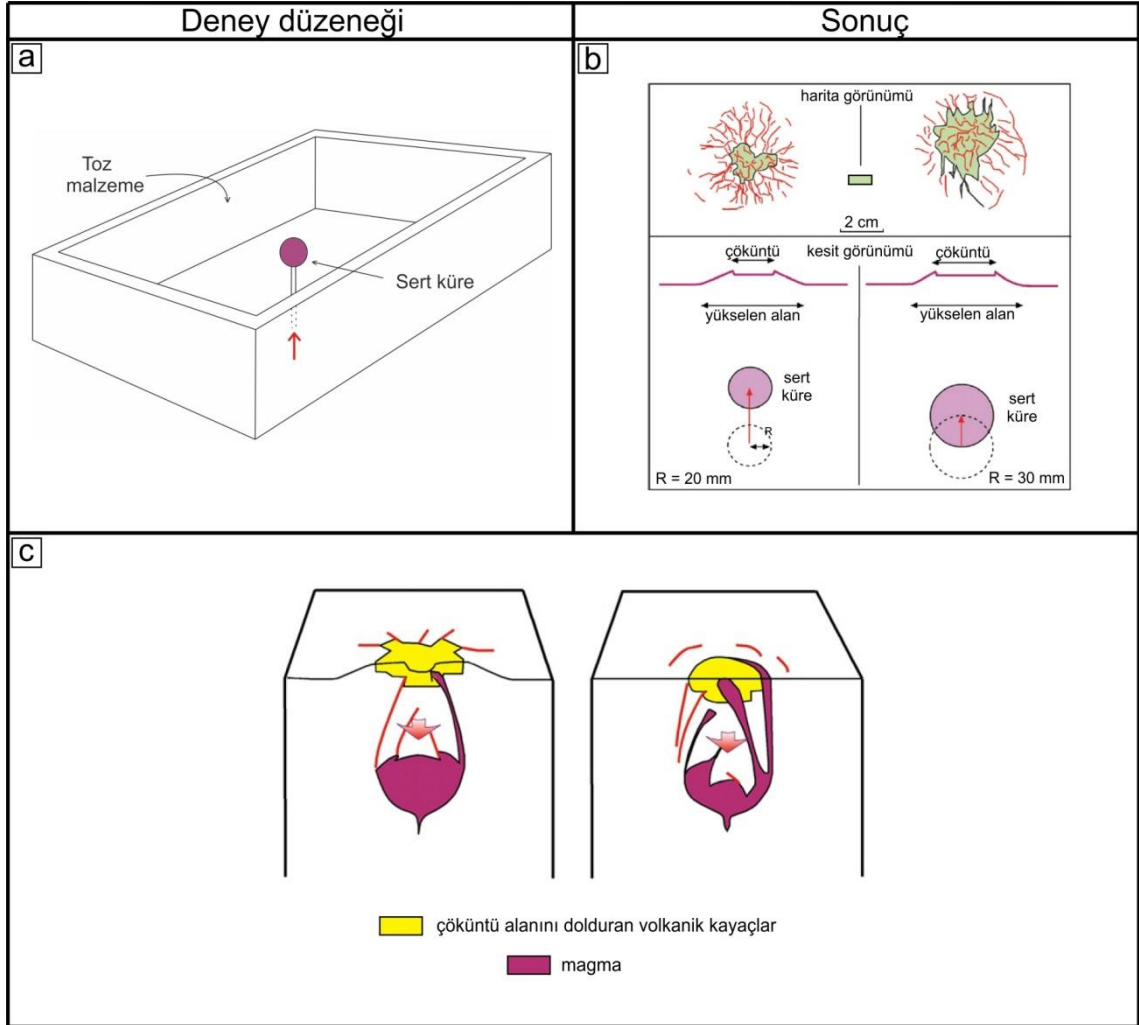
## **1.2. Kaldera Deneyleri**

Kaldera çökmeleri ile oluşan yapısal unsurları incelemek amacıyla yaklaşık 35 yıldır çeşitli deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Magma odasının derinliğinin ve şeklinin kaldera çökme tipleri üzerindeki etkileri, çökme esnasında oluşan faylar ve tektonik etki altında kalan kalderaların yüzeyde oluşturduğu deformasyon yapıları deneylerle incelenmiştir. Bu deneysel çalışmalar kısaca şöyle özetlenebilir:

Komuro ve ark. (1984), deneylerinde kırılğan kabuğun davranışını temsil eden kuru kum ve toz kil, magma odasını temsil eden sert bir küre kullanmışlardır (Şekil 1.3a). Kuru kum ve kil kullanılarak yapılan ölçekli deneylerle çöküntü alanı modellenmiştir. Deneylerin sonuçları ışınsal (radyal) ve konsantrik çatlakların domun üzerinde oluştuğunu ve tepede konsantrik çatlaklarla çevrelenmiş merkezi bir alanın çöktüğünü göstermektedir. Ayrıca sonlu elemanlar analiziyle, volkanik domun çapının magma odasının derinliğiyle orantılı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 1.3b).



**Komuro (1987)**, deneylerinde üst kabuğu temsil eden kum ve kil karışımı altında, magma odasını temsil eden uçucu kuru buz kullanmıştır. Buzun buharlaşması üstünde kalan çatıda çökmeye neden olduğundan, yüzeyde çember kırıklarını oluşturmuştur. Ayrıca çöküntünün çevresinde dışa doğru dalımlı ters faylar gözlemiştir (**Şekil 1.3c**).



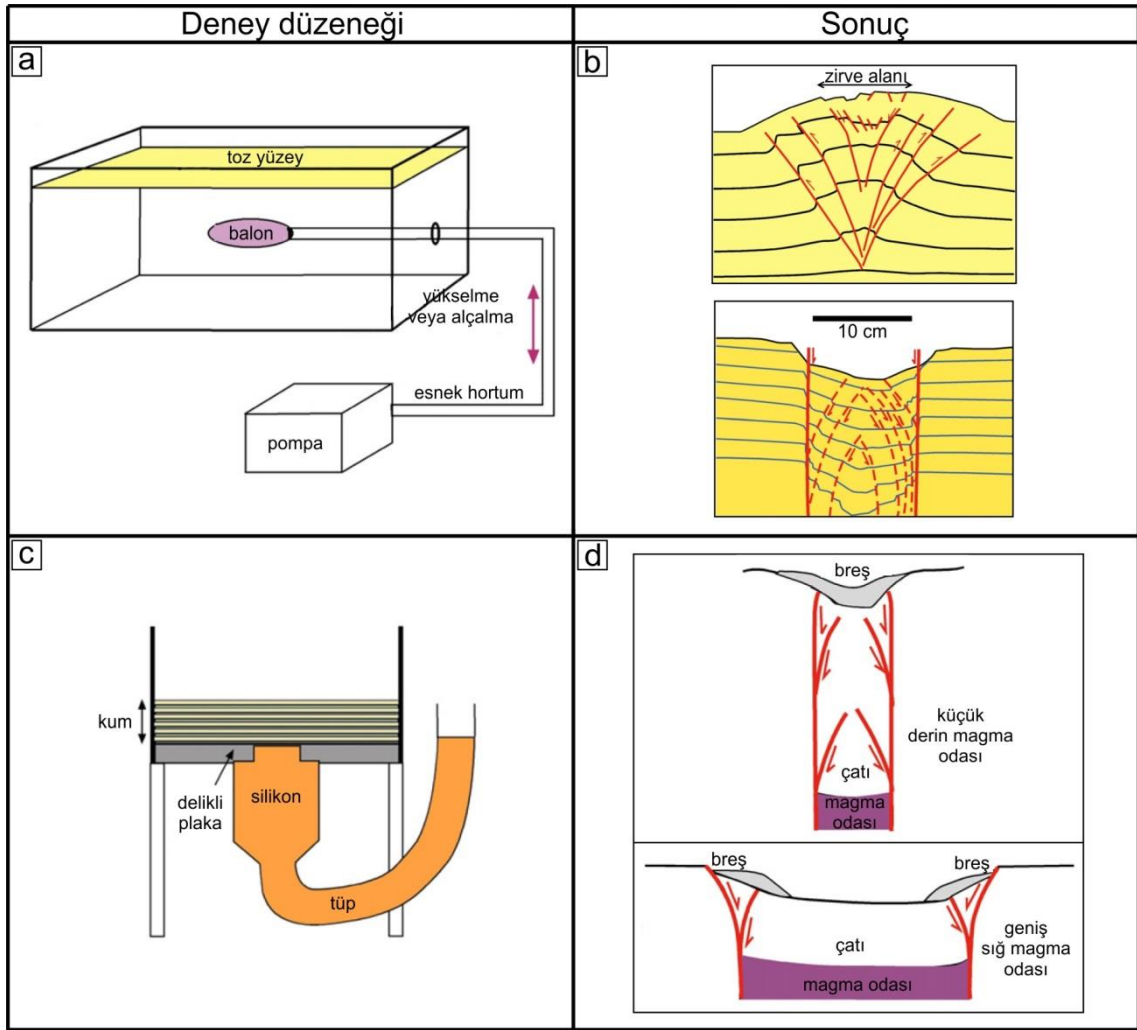
**Şekil 1.3.** **Komuro ve ark. (1984)**'ün analog kaldera çökme deneyleri: **(a)** deney düzeneği, **(b)** farklı yarıçapa (R) sahip magma odalarıyla yapılan iki deney sonucunun harita ve kesit görünümü. **(c)** **Komuro (1987)**'nin analog kaldera çökme deneyi sonuçları; soldaki model yükselme ve çökme, sağdaki model yalnızca çökme (**Acocella (2007)**'den Türkçeleştirilerek alınmıştır).

**Marti ve ark. (1994)**, deneylerinde üst kabuğu temsil eden alümina tozu altında, magma odasını temsil eden elastik bir balon kullanılmıştır (**Şekil 1.4a**). Küresel, silindirik, düz ve yassı olarak kullanılan farklı balon şekilleri, farklı magma odalarını temsil

etmektedir. Balonun hava ile şişirilmesiyle oluşan kabarma ve söndürülmesiyle oluşan kaldera çökme yapıları modellenmiştir. Deney sonuçlarına göre; kabarma ile yüksek açılı içe doğru dalımlı ters fayların oluştuğu gözlenmiştir ve domun tepesinde de içe doğru dalımlı normal faylar ile küçük bir çökme alanı oluşmaktadır. Çökme ile dışa doğru dalımlı ters fayların oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 1.4b).

**Roche ve ark. (2000)**, deneylerinde magma odasını temsil eden silikon ve kırılğan kabuğu temsil eden kuru kum kullanarak, kaldera çökme mekanizmaları üzerinde deneyler yapmışlardır (Şekil 1.4c). Çeşitli çatı boy/en oranları kullanılarak, deneyler iki ve üç boyutta gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu düzenek, temel çöküntü mekanizmalarını anlamak için; üç boyutlu düzenek, fay dağılımı ve yüzey deformasyonunun üç boyutta detaylarını incelemek için kullanılmıştır. Kaldera çökme mekanizmalarına göre, düşük çatı boy/en oranının büyük, sığ bir magma odasını; yüksek çatı boy/en oranının küçük, derin bir magma odasını temsil ettiği belirlenmiştir. Buna göre; düşük çatı boy/en oranları için, çöküntü, dışa doğru dalımlı ters çember faylarının oluşmasıyla başlamaktadır ve bunu içe doğru dalımlı normal çember faylar takip etmektedir. Düşük çatı boy/en oranları, ters faylarla sınırlandırılmış plaka tipi çöken kalderaları yansıtmaktadır. Yüksek boy/en oranları için, birçok ters fay çatıyı büyük parçalara ayırmaktadır ve çökme bir dizi iç içe (nested) yapı olarak ortaya çıkmaktadır. Yüksek çatı boy/en oranları, huni tipi çöken kalderaları yansıtmaktadır (Şekil 1.4d).

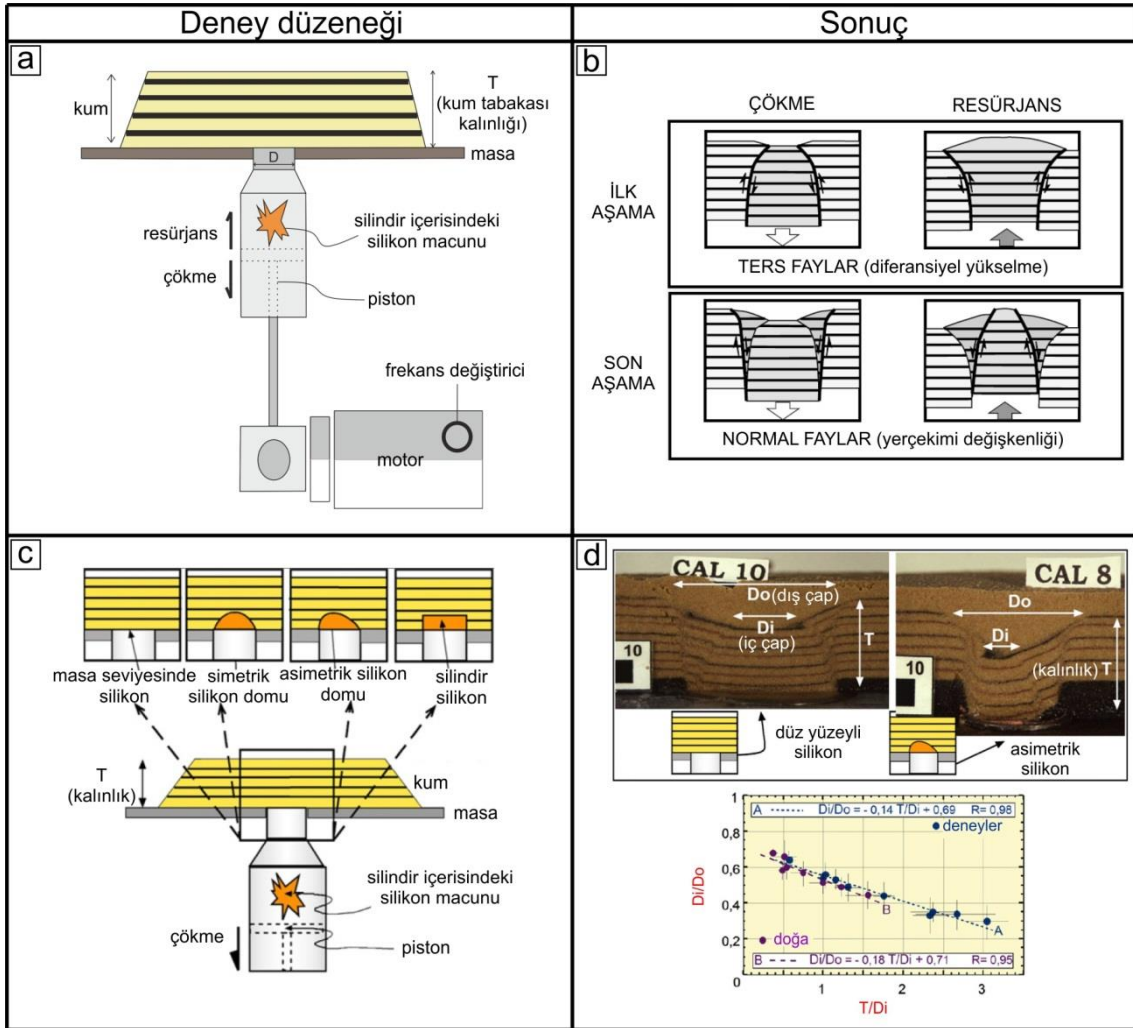
**Acocella ve ark. (2000)**, deneylerinde kırılğan kabuğu temsil eden kuru kuvars kumu kullanılırken, kum yığınının tabanında magma odasını temsil eden Newtonian silikon macun kullanmışlardır (Şekil 1.5a). Kaldera çökmelerini ve resürjans yapılarını incelemek için çeşitli deney setleri oluşturulmuştur ve boşluk problemine dikkat çekmek için birçok analog model yapılmıştır. **Acocella ve ark. (2000)**, boşluk problemini çökme veya resürjans esnasında birbirine bağıl olarak hareket eden kabuksal blok parçalarının hareketlerine izin veren veya bu hareketleri sınırlayan kuvvetler olarak tanımlamaktadır. Çökme, ilk olarak dışa doğru dalımlı ters çember faylar ve sonraki içe doğru dalımlı normal çember faylar olmak üzere iki konsantrik çember fayı tarafından sınırlandırılmıştır. Ayrıca deneysel sonuçlar, ters ve normal fayların aktivitesinin, büyük çökmeler sırasında boşluk problemine olası bir çözüm teşkil ettiğini göstermektedir (Şekil 1.5b).



**Şekil 1.4.** (a) Marti ve ark. (1994)'ün deneyleri: (a) deney düzeneği, (b) magma odasının şişmesi ve çökmesine bağlı olarak gelişen fayların kesit görünümü. Roche ve ark. (2000)'in kaldera çökme deneyleri: (c) deney düzeneği, (d) huni tipi (üstteki) ve plaka tipi (alttaki) kalderaların deformasyon modeli (Acocella (2007)'den Türkçeleştirilerek alınmıştır).

Acocella ve ark. (2001), deneylerinde kuru kuvars kumu ve Newtonian silikon macun kullanmışlardır (Şekil 1.5c). Çökme, ilk olarak dışa doğru dalımlı ters çember faylarla sınırlanan iç çöküntü ve daha sonra içe doğru dalımlı normal çember faylarla sınırlanan dış çöküntü olmak üzere, iki konsantrik depresyon tarafından sınırlandırılmıştır (Şekil 1.5d: Di ve Do). İki depresyonun çapları ile çember faylarının derinliği arasında doğrusal bir ilişki olduğu tespit edilmiştir (Şekil 1.5d). Deneylerin doğadaki iç içe (nested) kaldera çiftleriyle benzer oranlara ve mimariye sahip oldukları belirlenmiştir.

Bu durum, iç içe (nested) kaldera çiftlerinin tek bir çökme olayından kaynaklanabileceğini göstermektedir (Şekil 1.5d).



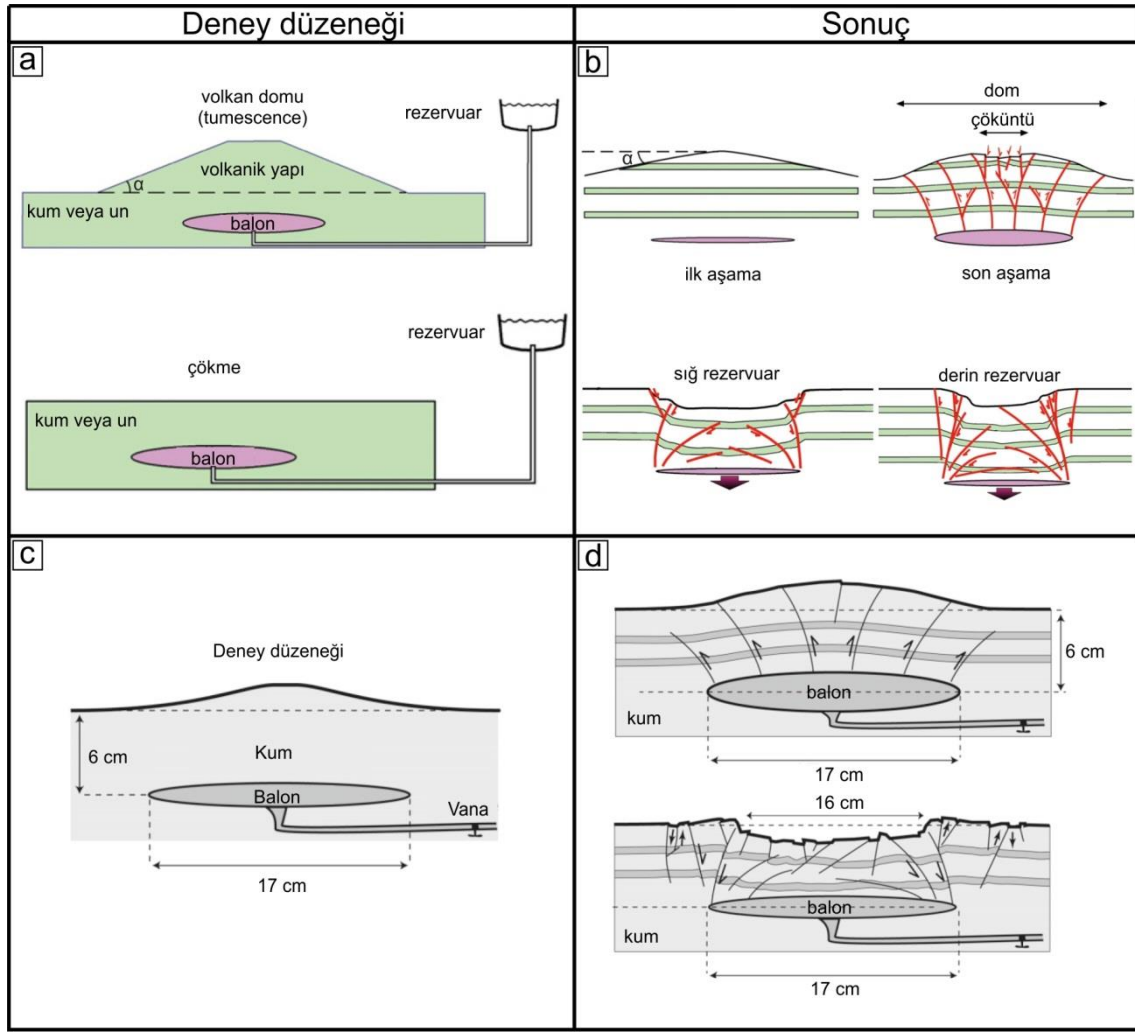
**Şekil 1.5.** Acocella ve ark. (2000)'in kaldera çökme ve resürjans deneyleri: **(a)** deney düzeneği, **(b)** çökme ve resürjansa bağlı olarak oluşan fayların kesit görünümü (Acocella ve ark. (2000)'den Türkçeleştirilerek ve renklendirilerek alınmıştır). Acocella ve ark. (2001)'in çökme deneyleri: **(c)** deney düzeneği, **(d)** simetrik ve asimetrik çökmenin kesit görünümü (Acocella (2007)'den Türkçeleştirilerek alınmıştır).

Walter ve Troll (2001), deneylerinde üst kabuğu temsil eden kum veya un, magma odasını temsil eden hava veya su ile doldurulmuş yassı (veya sil şeklinde) bir balon kullanmışlardır (Şekil 1.6a). Magma odasının şeklinin etkisini test etmek için, oval şekilli balonlar kullanılarak deneyler tekrar edilmiştir. Magma odasının şişirilmesi

(kabarma), sönmesi (çökme) ve tekrarlanan resürjanstan (tekrar şişme ve sönme) kaynaklanan karakteristik yapıları değerlendirmek ve kaldera faylarını ve bunların magma odası ile ilişkilerini daha iyi anlamak için çeşitli deneyler yapılmıştır. Magma odasının şişirilmesiyle ııınsal kırıkların oluştuğu, zirvenin genişlediği ve en tepede çöküntüye uğradığı gözlemlenmiştir. Çökme, çember faylar dahil olmak üzere, yay şekilli dışa doğru dalımlı ters faylar ve içe doğru dalımlı normal faylar tarafından sınırlandırılmıştır (Şekil 1.6b).

**Troll ve ark. (2002)**, deneylerinde üst kabuğu temsil eden kum ve magma odasını temsil eden lastik bir balon kullanmışlardır (Şekil 1.6c). Balonun şişirilmesi, bir dom yapısı ve ııınsal bir fay modeli oluşmasına neden olurken, balonun sönmesi parçalı kaldera çökmesine ve yapının üzerinde konsantrik bir periferik fay sistemine neden olmuştur. Deneysel sonuçlar Gran Canaria'daki Tejada kalderasıyla karşılaştırılmıştır. Buna göre; deneysel magma odasının tekrarlanan şişirilme ve sönme döngüleri, Tejada kalderasının periferik fay sistemini ve kaldera tabanının parçalı yapısını açıklamaktadır. Böylece Tejada kalderası gibi birçok patlamayla oluşan kalderaların, basit bir plaka tipi çökmeye uğrama olasılığının düşük olduğu ve bu kaldera sistemlerinde parçalı çökmenin ana çöküntü mekanizması olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 1.6d).

**Cailleau ve ark. (2003)**, deneylerinde magma odasını temsil eden hava ile doldurulmuş sil şeklindeki lastik bir balon ve küçük ölçekli yapıları gözlemlemek için yerkabuğunu temsil eden kumun yüzeyini örten un tabakası kullanmışlardır (Şekil 1.7a). Bölgesel bir çekme gerilimi (extension) ile birlikte çökme ile tetiklenen deformasyon ve gerilme alanları sonlu elemanlar ve analog modellerde yeniden oluşturulmuştur. Bu deneylerle, bölgesel volkano-tektmik süreçlerden kaynaklanan gerilme alanları test edilmektedir. Bir magma odasının derinlik ve boyut değişiminin etkisi açıklanmaktadır. Bölgesel çökmenin neden olduğu yüzey gerilimlerinin topoğrafik yük ile nasıl etkileşime girdiğini göstermektedir (Şekil 1.7b).

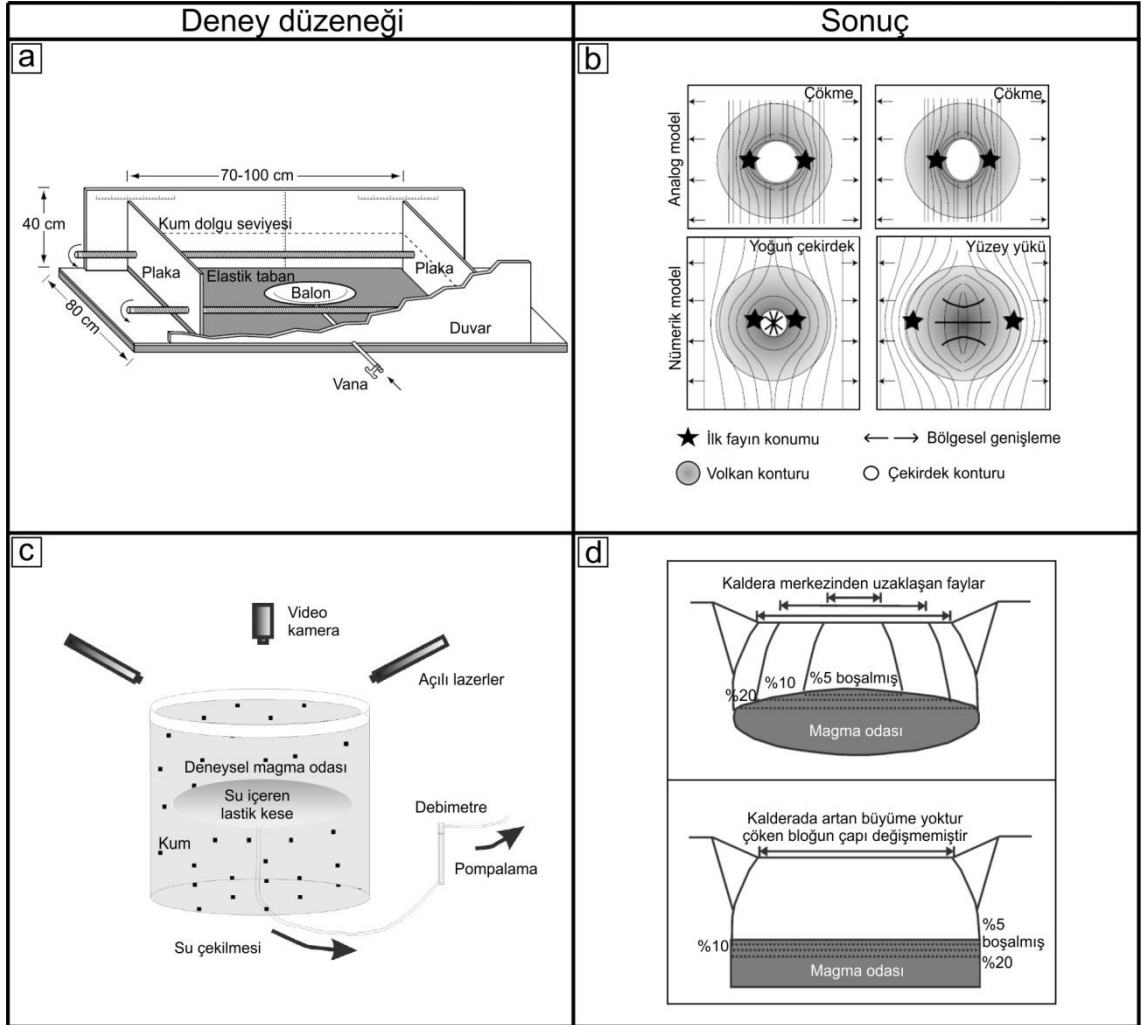


**Şekil 1.6.** Walter ve Troll (2001)'in deneyleri: **(a)** deney düzeneği, **(b)** magma odasının çökme ve yükselmesine bağlı olarak gelişen fayların kesit görünümü (Acocella (2007)'den Türkçeleştirilerek alınmıştır). Troll ve ark. (2002)'nin kaldera çökme deneyleri: **(c)** deney düzeneği, **(d)** balonun şişmesi ve sönmesiyle oluşan fayların kesit görünümü (Troll ve ark. (2002)'den Türkçeleştirilerek alınmıştır).

Kennedy ve ark. (2004), deneylerinde kırılğan kabuğu temsil eden kuru kum ve magma odasını temsil eden su dolu bir lastik kese kullanmışlardır (Şekil 1.7c). Magma odası derinliği ve yöneliminin kalderaların gelişimi üzerindeki etkilerini incelemek için kum havuzu modelleri oluşturulmuştur. Deneylerde çökme ile kalderanın bir tarafında oluşan yay şekilli veya doğrusal dışa doğru dalımlı faylar gözlenmiştir. Bu fayların kaldera çevresinde yanal olarak ilerlemesi ve birleşmesiyle poligonal bir yapı oluşmaktadır. Çökmenin devam etmesiyle, kalderanın giderek dışa doğru büyüdüğü gözlenmiştir ve



böylece dışa doğru dalımlı konsantrik faylar oluştuğu belirlenmiştir. Daha sonra, yüzeyde periferik genişleme ile ilgili olarak içe doğru dalımlı normal faylar ortaya çıkmıştır. Deney sonuçlarına göre, odanın derinliği arttıkça, faylanma alanının azaldığı, kalderanın simetrisinin etkilendiği gözlenmiştir (Şekil 1.7d).

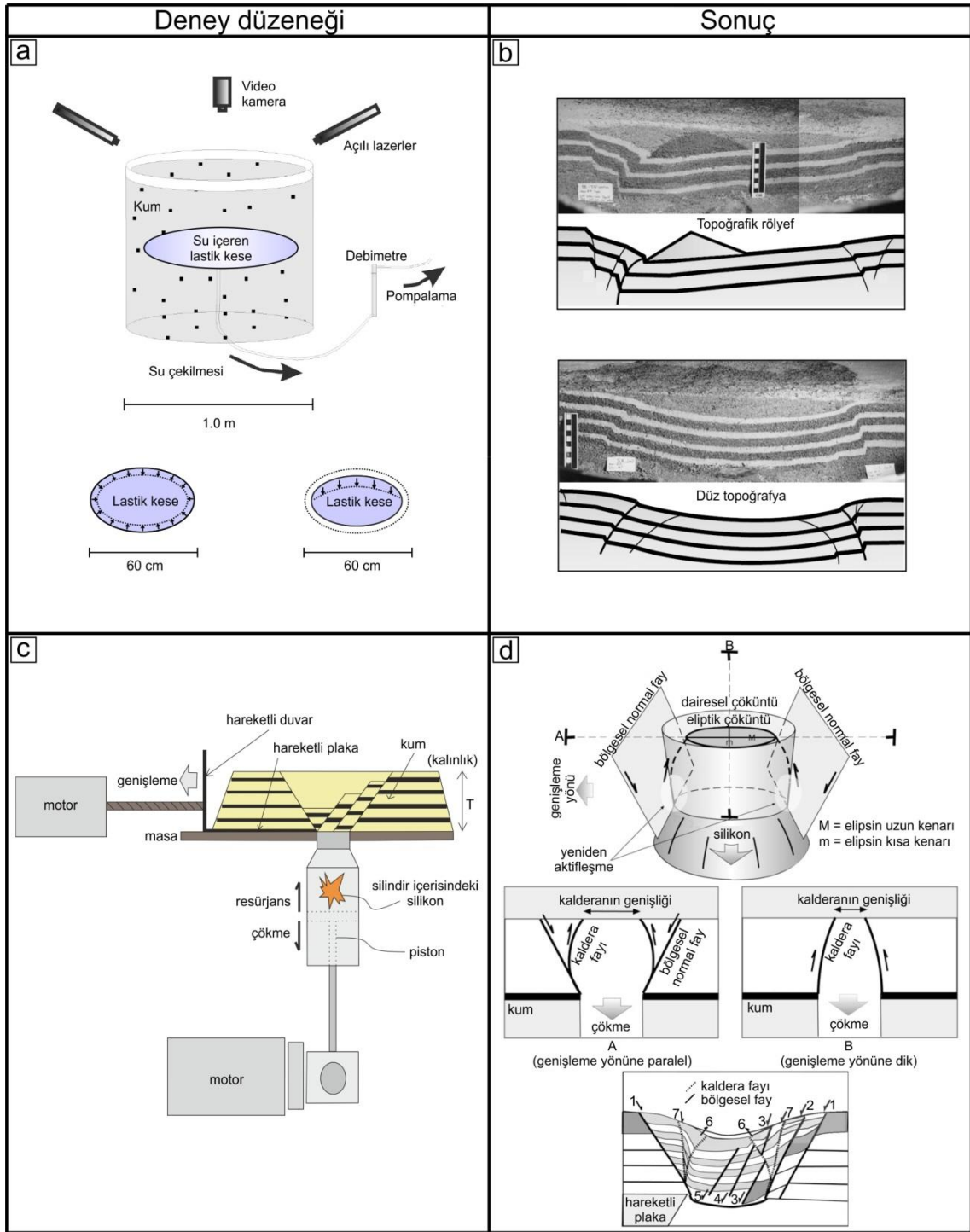


**Şekil 1.7.** Cailleau ve ark. (2003)'ün kaldera çökme deneyleri: **(a)** deney düzeneği, **(b)** analog ve nümerik model sonuçları (Cailleau ve ark. (2003)'ten Türkçeleştirilerek alınmıştır). Kennedy ve ark. (2004)'ün deneyleri: **(c)** deney düzeneği, **(d)** farklı tip magma odalarının çökmesi sonucu gelişen çember fayların kesit görünümü (Kennedy ve ark. (2004)'ten Türkçeleştirilerek alınmıştır).

Lavallée ve ark. (2004), deneylerinde kırılğan kabuk kayaçları temsil eden kum ve magma odasını temsil eden su ile doldurulmuş bir lastik kese kullanmışlardır (Şekil 1.8a). Topoğrafik rölyefin kaldera çökmesi üzerindeki etkisini araştırmak için, topoğrafik kütle, topoğrafik çap ve analog magma odasının merkezine göre konumlanan volkanik yapı gibi üç değişkenin etkisi analog deneyler yapılarak incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, topoğrafik rölyefin, alttaki magma odasının merkezi üzerinde yer alması durumunda kalderaların morfolojisi üzerinde önemli sonuçlara neden olduğu ve magma odasının boyutunun, topoğrafya ve kaldera çöküntüsünün şeklini etkilediği belirlenmiştir (Şekil 1.8b).

Acocella ve ark. (2004), deneylerinde kırılğan kabuğu temsil eden kuru kum ve magma odasını temsil eden silikon kullanmışlardır (Şekil 1.8c). Çekme gerilimi etkisi altındaki yapıların çökme ve resürjans üzerindeki rolünü incelemek amacıyla analog modeller yapılmıştır. Deneylerde ana eksen ile genişleme yönüne paralel olacak şekilde meydana gelen eliptik çökmeler gözlenmiştir. Derinlerdeki mevcut normal faylar, resürjans sırasında oluşan ters faylar tarafından yeniden aktifleşmiştir ve böylece dışa doğru dalımlı normal faylara neden olmuştur. Deney sonuçları, kalderalarda ve resürjansta gözlenen uzamanın (elongation) daha önceki yapısal unsurların farklı yükselmeler sırasında yeniden aktifleşmesinin sonucunda oluştuğunu göstermektedir. Sonuçlar, dairesel magma odalarının, bölgesel gerilmeye maruz kaldıklarında doğadaki eliptik kalderaları ve resürjansları da oluşturabileceğini göstermektedir (Şekil 1.8d).

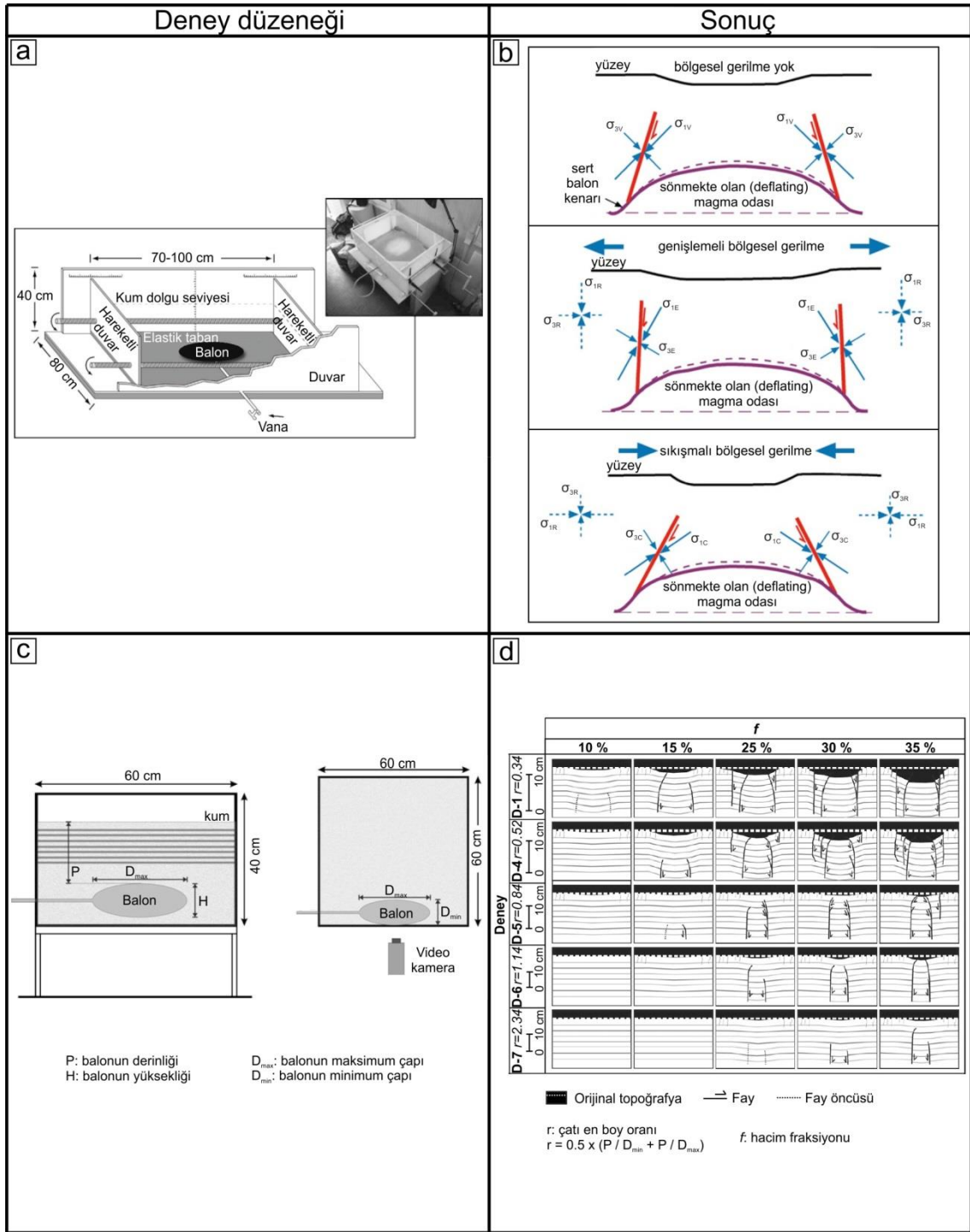




**Şekil 1.8.** Lavallée ve ark. (2004)'ün deneyleri: **(a)** deney düzeneği, **(b)** farklı topoğrafik rölyef şekillerinin kaldera çökmesine etkisini gösteren deney sonucu (Lavallée ve ark. (2004)'ten Türkçeleştirilerek alınmıştır). Acocella ve ark. (2004)'ün kaldera çökme deneyleri: **(c)** deney düzeneği, **(d)** çöküntü tiplerinin faylanmaya etkisi kesit görünümü olarak sunulmuştur (Acocella ve ark. (2004)'ten Türkçeleştirilerek ve renklendirilerek alınmıştır).

Holohan ve ark. (2005) deneylerinde, kırılğan kabuğu temsil eden kum ve magma odasını temsil eden hava ile doldurulmuş dairesel lastik balon kullanmışlardır (Şekil 1.9a). Kalderaların yapısal evrimini, magma odalarının geometrisini ve bölgesel tektonik gerilmeler arasındaki ilişkilerini daha iyi kavramak için analog deneyler yapılmıştır. Deneyler, bölgesel gerilmelerin ve ilgili yapıların, bilinen boyut ve derinlikteki magma odalarının boşalması sırasında oluşan kalderalar üzerindeki etkilerini incelemektedir. Sonuçlar, yapılan sıkışma / çekme deneylerinde, alttaki magma odasının plan görünümünde dairesel olmasına rağmen, minimum yatay sıkışma yönüne paralel olarak genişlediğini göstermektedir (Şekil 1.9b).

Geyer ve ark. (2006), deneylerinde kırılğan kabuğu temsil eden kuru kuvars kumu ve magma odasını temsil eden su ile doldurulmuş bir balon kullanmışlardır (Şekil 1.9c). Magma odasının hacimsel oranı ile kaldera çöküntüsünün yapısal evrimi arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla analog deneyler yapılmıştır. Kalderaların yapısal evrimini incelemek için magma odasının toplam hacmi ve boşalan magma hacmi arasındaki ilişki irdelenmiştir. Deneylerde magma odasının çatı boy/en oranı ve hacim oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. Düşük boy/en oranına sahip sığ ve geniş magma odalarının kaldera çökmesini tetikleyen hacim oranlarının, yüksek boy/en oranına sahip derin ve küçük magma odalarından daha düşük olduğu belirlenmiştir (Şekil 1.9d).



**Şekil 1.9.** Holohan ve ark. (2005)'in kaldera çökme deneyleri: **(a)** deney düzeneği, **(b)** bölgesel gerilmenin faylanmaya etkisi kesit görünümü şeklinde sunulmuştur (Acocella (2007)'den Türkçeleştirilerek alınmıştır). Geyer ve ark. (2006)'nın deneyleri: **(c)** deney düzeneği, **(d)** çökme süreçlerinin yapısal evrimi (Geyer ve ark. (2006)'dan Türkçeleştirilerek alınmıştır).

### 1.2.1. Sentez

Yapılan deneysel çalışmalar özetlenecek olursa;

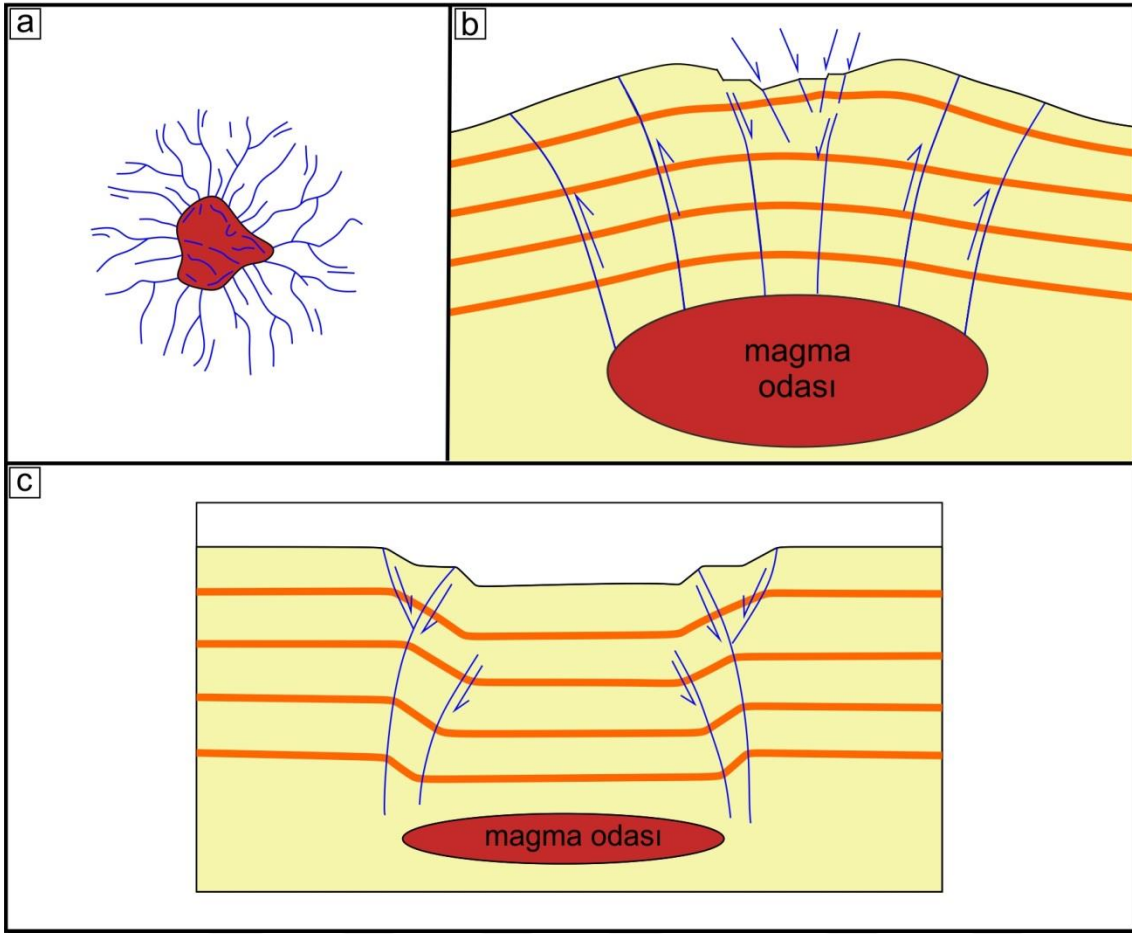
Genel olarak deneylerde üst kabuğu temsil eden kum ve kil karışımı (Komuro ve ark., 1984; Komuro, 1987), yalnızca kum (Roche ve ark., 2000; Acocella ve ark., 2000; Acocella ve ark., 2001; Troll ve ark., 2002; Kennedy ve ark., 2004; Lavallée ve ark., 2004; Acocella ve ark., 2004; Holohan ve ark., 2005; Geyer ve ark., 2006), kum ve/veya un (Walter ve Troll, 2001; Cailleau ve ark., 2003) ve alümina tozu (Marti ve ark., 1994) kullanılmıştır. Magma odasını ise sert bir küre (Komuro ve ark., 1984), uçucu kuru buz (Komuro, 1987), içi su dolu bir balon (Walter ve Troll, 2001; Troll ve ark., 2002; Kennedy ve ark., 2004; Lavallée ve ark., 2004; Geyer ve ark., 2006), içi hava dolu bir balon (Marti ve ark., 1994; Walter ve Troll, 2001; Cailleau ve ark., 2003; Holohan ve ark., 2005) ve silikon (Roche ve ark., 2000; Acocella ve ark., 2000; Acocella ve ark., 2001; Acocella ve ark., 2004) temsil etmektedir. Deney düzenekleri kum havuzu (Komuro ve ark., 1984; Komuro, 1987; Marti ve ark., 1994; Roche ve ark., 2000; Walter ve Troll, 2001; Troll ve ark., 2002; Geyer ve ark., 2006) ve yan duvarları hareketli plakalardan oluşan kum havuzu (Cailleau ve ark., 2003; Holohan ve ark., 2005), silindir kutu (Kennedy ve ark., 2004; Lavallée ve ark., 2004) ve tabla üzerinde (Acocella ve ark., 2000; Acocella ve ark., 2001; Acocella ve ark., 2004) olmak üzere dört farklı tipte tasarlanmıştır.

Deneyler kabarma (tumescence) ve çökme (Komuro ve ark., 1984; Marti ve ark., 1994; Troll ve ark., 2002), sadece çökme (Komuro, 1987; Roche ve ark., 2000; Acocella ve ark., 2001; Cailleau ve ark., 2003; Kennedy ve ark., 2004; Lavallée ve ark., 2004; Holohan ve ark., 2005; Geyer ve ark., 2006), çökme ve resürjans (Acocella ve ark., 2000; Acocella ve ark., 2004), kabarma, çökme ve resürjans (Walter ve Troll, 2001) şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Kesit alınarak çökme ile ilgili fayların gösterilmesiyle (Komuro ve ark., 1984; Komuro, 1987; Marti ve ark., 1994; Roche ve ark., 2000; Acocella ve ark., 2000; Acocella ve ark., 2001; Walter ve Troll, 2001; Troll ve ark., 2002; Kennedy ve ark., 2004; Lavallée ve ark., 2004; Acocella ve ark., 2004; Holohan ve ark., 2005; Geyer ve ark., 2006) ve tepeden fotoğraflamalar yapılarak (Walter ve Troll, 2001; Troll ve ark., 2002; Cailleau

ve ark., 2003; Kennedy ve ark., 2004; Lavallée ve ark., 2004; Holohan ve ark., 2005; Geyer ve ark., 2006) ya da lazer taramalarla topoğrafik modelin gözlemlenmesiyle (Kennedy ve ark., 2004; Lavallée ve ark., 2004) deneyler modellenmiştir.

Tüm bu deney gözlemleri sonucunda, magma odasının derinliği ve şekline bağlı olarak, kabarma ve çökme sırasında oluşan fay yapılarına ve tektonik etkilere göre çeşitli sonuçlar elde edilmiştir. Kabarma, topoğrafyanın zirve kısmında bölgesel bir çöküntü alanı (Şekil 1.10b; Marti ve ark., 1994) ve ırsal çatlaklar (Troll ve ark., 2002) oluşturmaktadır (Komuro ve ark., 1984; Walter ve Troll, 2001). Çökme esnasında dışa veya dik dalımlı (Komuro, 1987; Marti ve ark., 1994) ve bunlara eşlik eden içe dalımlı sınır fayları gözlenmektedir (Şekil 1.10c; Acocella ve ark., 2000; Acocella ve ark., 2001; Walter ve Troll, 2001; Troll ve ark., 2002; Kennedy ve ark., 2004). Magma odası derinliğine (Roche ve ark., 2000; Kennedy ve ark., 2004) ve şekline (Walter ve Troll, 2001; Lavallée ve ark., 2004; Holohan ve ark., 2005) bağlı olarak çökme tipleri farklılık göstermektedir. Tektonik etki altında (çekme gerilimi), kaldera şekillerinin (uzunlamasına) değiştiği gözlenmektedir (Cailleau ve ark., 2003; Acocella ve ark., 2004; Holohan ve ark., 2005). Çatı boy/en oranlarının kaldera çökme tiplerini etkilediği belirlenmiştir (Roche ve ark., 2000; Geyer ve ark., 2006).



**Şekil 1.10. (a)** Kabarma sonucu topoğrafyada oluşan ışınsal (radyal) çatlaklar, (kabarma sonucu topoğrafyanın zirve kısmında oluşan bölgesel çöküntü alanı kırmızı renkte gösterilmiştir), **(b)** Kabarma sonucu topoğrafyanın zirve kısmında oluşan bölgesel çöküntü alanı, **(c)** Çökme esnasında oluşan dışa ve içe dalımlı sınır fayları.

### 1.3. Motivasyon

Analog kaldera modelleri bugüne kadar kaldera çökmesi hadisesi ve çökmeye bağlı yapısal unsurlar hakkındaki bilgilerimizi oldukça geliştirmiştir. Birkaç on yıllık geçmişe sahip deneysel çalışmalar, örneğin çember fayın şekli, dalımı ve atımı ile ilgili bilgilerimizi zaman içerisinde değiştirmiş ve geliştirmiştir. Magma odasının şekli, derinliği ve boyutu ile kaldera şekli ve çökme tipi arasındaki ilişkileri anlamamıza yardımcı olmuştur. Kaldera oluşumuna dair deneysel çalışmalar bugüne kadar ülkemizde hiç yapılmamıştır. Bu tez çalışmasıyla, analog kaldera modellemeleri ile oluşan yapısal unsurlar hakkında bilgi edinmek, hem analog hem nümerik

modellemelerle magma odasının yanal genişlemesine bağlı olarak çatı bloğunda oluşan deformasyonu incelemek amaçlanmıştır. Buna göre, analog kaldera modellemeleri için düzenek oluşturularak, parçalı kaldera çökmeleri tekrarlanabilir deneylerle gerçekleştirilmiştir. Parçalı çöken kalderaların yapısal unsurlarının model yüzeyindeki evrimi iki farklı yöntemle incelenmiştir. Birincisi, Hareketten-Yapı – ok Bakılı Stereofotogrametri (HY-BS) yöntemi ile yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modelleri oluşturulmasıdır. İkincisi, Parçacık Takibi (PT) yöntemi ile yüzeydeki yatay yer değiştirmenin iki boyutta modellenmesidir. Literatürdeki çalışmalarda analog kaldera modelinin yüzeyinin lazer tarayıcılar ile taranarak modellendiği çalışmalar mevcuttur fakat bu pahalı ekipmanlar gerektiren bir yöntemdir. Daha zahmetli olmasına rağmen gelişen stereofotogrametrik ve bilgisayar teknolojileri ile HY-BS yöntemi kullanarak deneysel modellerin yüzey topoğrafyasının modellenebileceği bu çalışmada hassasiyeti ile birlikte sınanarak gösterilmektedir. Yine bir deneysel modelin farklı ve yeni bir teknikle sabitlenerek tomografisinin çekilmesi ilk kez bu çalışmada denenmektedir. Sabitlenmiş analog kaldera modellerinin X-ışını Tomografi ve X-ışını Mikro-CT yöntemi ile iç-yapısı üç boyutta haritalanarak, oluşan yapısal unsurları incelenmiştir. Nümerik modellemeler ile gerçek boyutlar, parametreler ve fiziksel koşullar altında modeller oluşturularak, magma odasının yanal genişlemesine bağlı olarak çatı bloğunda oluşturduğu stres dağılımları ve yüzey deformasyonu sayısal olarak incelenmiştir. Oluşturulan modeller doğada parçalı çökme ile oluşan kalderalar ile karşılaştırılmıştır.



## 2. METODOLOJİ

Kaldera çökmeleri ve oluşan yapısal unsurları incelemek amacıyla analog modeller oluşturulmuştur. Modellemeye deneyleri gerçekleştirmek üzere tasarlanan bir düzenek oluşturularak başlanmıştır. Ardışık deneylerle analog kaldera modelleri oluşturularak, Hareketten Yapı - Çok Bakılı Stereofotogrametri yöntemiyle 3B modelleri oluşturulmuştur. Böylece, yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modelleri elde edilmiştir. Sonraki adım, Parçacık Takibi yöntemiyle modelin yüzey hareketleri ve yüzey deformasyonunun incelenmesidir. Böylece, bu iki yöntemle modellerin yapısal unsurları ve yüzey hareketleri yüzeyden incelenmiştir. İkinci analog modelleme türü sabitlenmiş kaldera modelleridir. X-ışını tomografisi ve Mikro-CT yöntemleriyle sabitlenmiş kaldera modelleri üç boyutta haritalanmıştır. Böylece, modellerin iç yapısal unsurları üç boyutlu olarak incelenmiştir. İç yapısal unsurları incelenen ve yüzey modellemesi oluşturulan analog kaldera modellerine ek olarak, magma odasının yanal uzanımına bağlı olarak, yüzeyde oluşturduğu deformasyonun incelenmesi amacıyla, nümerik modeller oluşturulmuştur. Modellerin oluşum aşamaları ve incelenme yöntemleri ayrıntılarıyla sunulmuştur:

### 2.1. Analog Kaldera Modelleri

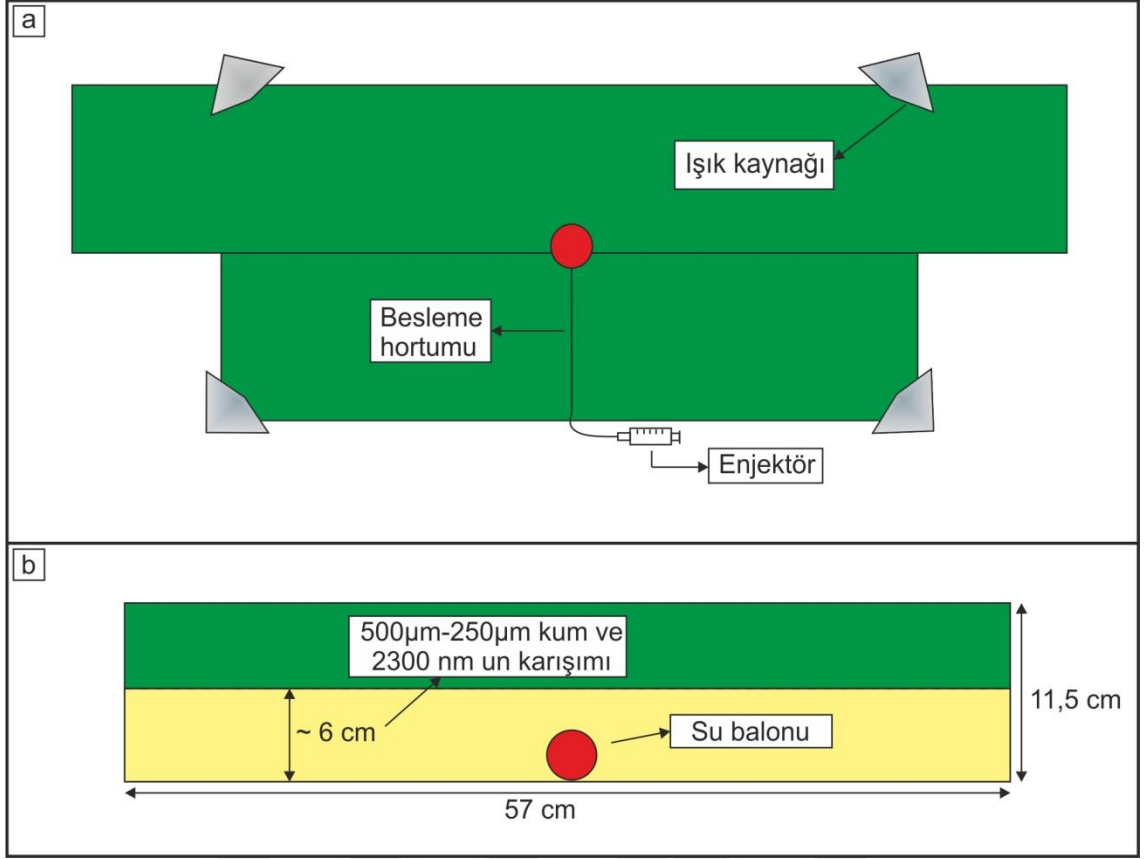
Analog kaldera modelleri, kum havuzu modelleri ve sabitlenmiş kum havuzu modelleri olmak üzere iki ayrı yöntemle gerçekleştirilmiştir.

#### 2.1.1. Kum Havuzu Modelleri

##### 2.1.1.1. Kullanılan Ekipman ve Malzeme

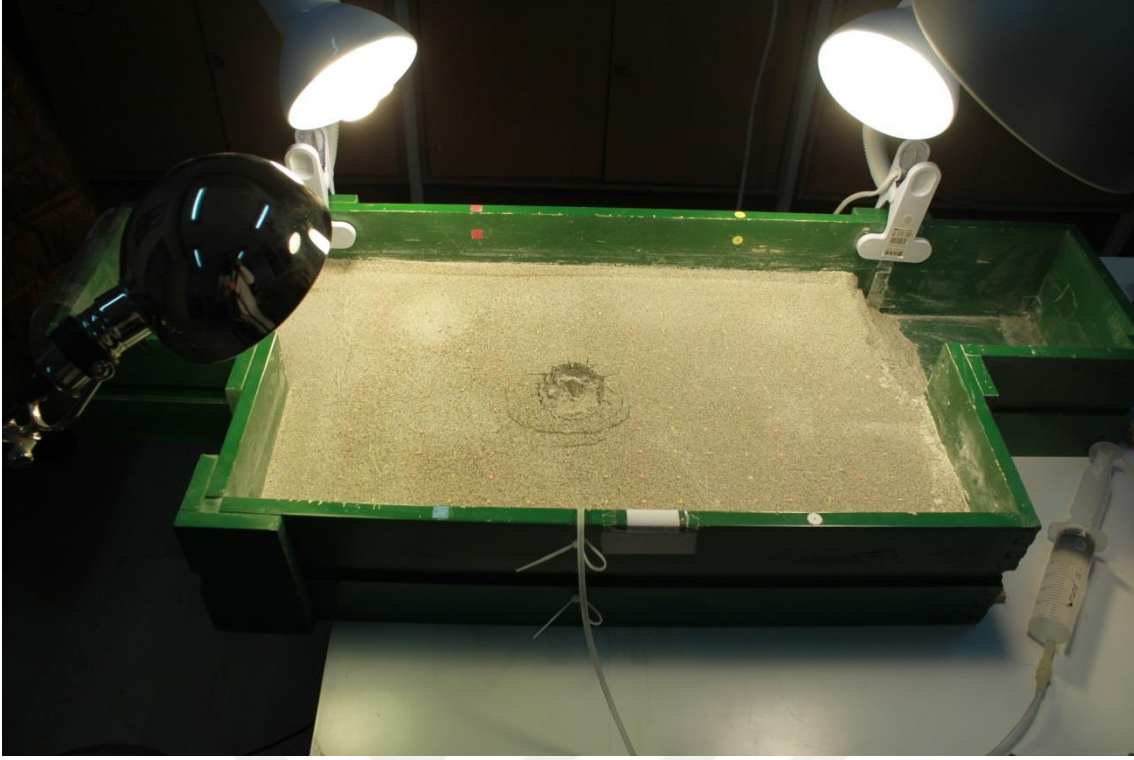
Deneylerin üzerine kurulduğu temel düzenek ortamı olan kum havuzu, 57 x 11,5 x 35,3 cm ölçeğinde ahşap bir kutu olarak tasarlanarak yapılmıştır ([Şekil 2.1](#)). Deney malzemesi İzmir'in Dikili ilçesinden alınan kumsal kumu ve kohezyonu arttırmak için kullanılan undan oluşmaktadır. Kum, 500 µm, 250 µm, 125 µm ve 63 µm tane boyu elekler kullanılarak elenmiştir.





**Şekil 2.1.** Deney düzeneği taslağı **(a)** üstten görünüm, **(b)** yandan görünüm.

Deneylerde 500-250  $\mu\text{m}$  tane boyunda kum ve 2300 nm tane boyunda un kullanılmıştır (Şekil 2.2). Unun tane boyu Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda Malvern Zetasizer Nano zs90 cihazında ölçülmüştür. Magma odasını bir su balonu temsil etmektedir. Balon bir besleme hortumu aracılığıyla 60 ml'lik içi su dolu bir enjektörle beslenmekte ve boşaltılmaktadır. Kum havuzu deneyler esnasında tepeden oda aydınlatmasına ek olarak deney düzeneğine yakın, düzeneğin köşelerine konumlandırılmış 4 adet ışık kaynağı ile ışıklandırılmaktadır (Şekil 2.1 ve 2.2).



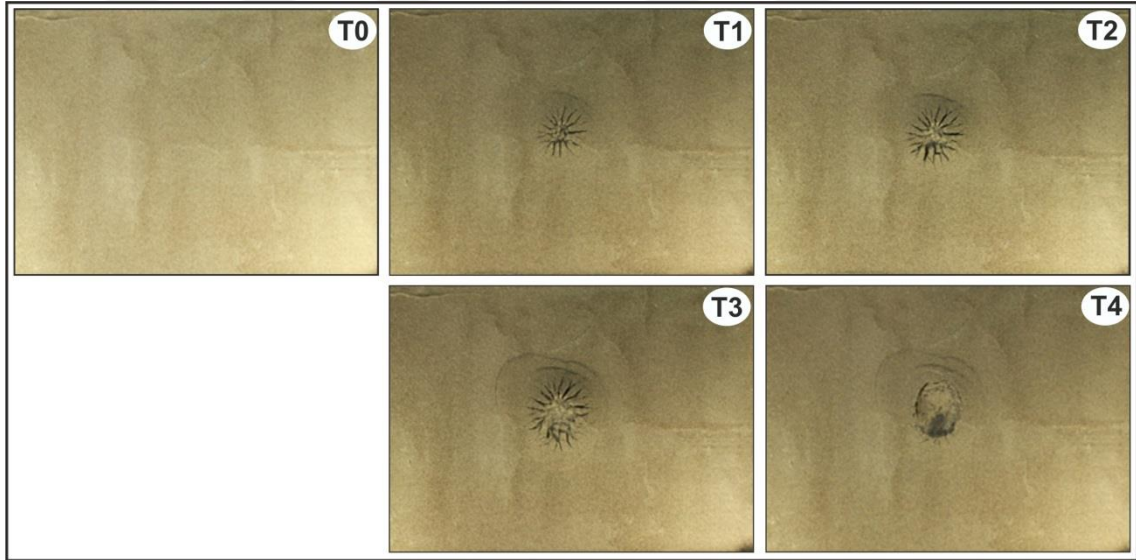
**Şekil 2.2.** Deney düzeneği.

#### **2.1.1.2. Deney Süreci**

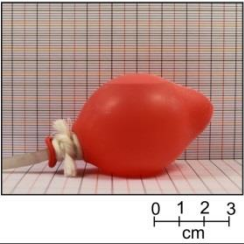
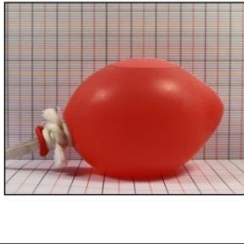
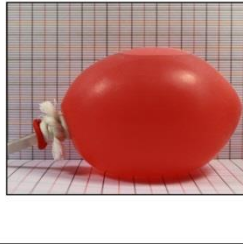
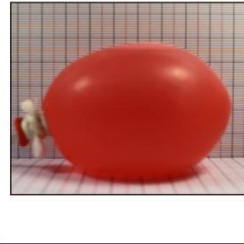
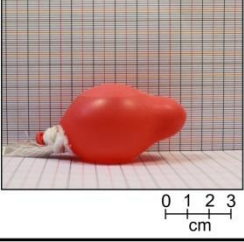
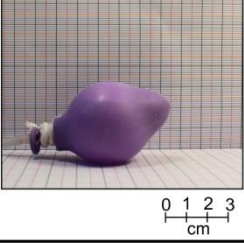
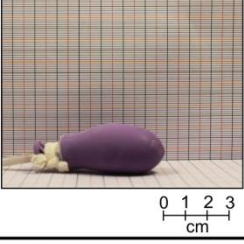
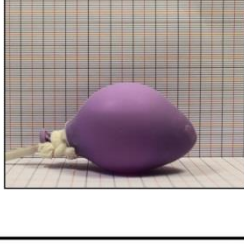
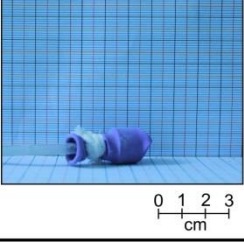
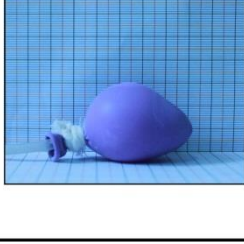
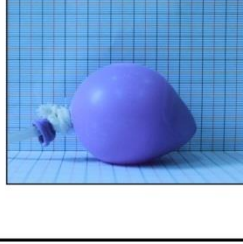
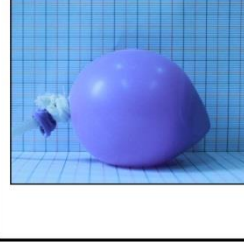
Deneylerde kum havuzunu 5 ila 9 cm aralığında farklı yüksekliklerde dolduran kum-un karışımı kullanılmıştır ([Çizelge 2.1](#)). Deneyler 5 farklı aşamada gerçekleştirilmiştir, bu aşamalar T0, T1, T2, T3 ve T4 olarak isimlendirilmiştir. İlk aşama referans aşamasıdır (T0). Bu aşamada su balonu kum havuzunun içine kum ve undan oluşan malzemenin altına gömülmüş, karışımın üst kısmı düzlenmiştir ([Şekil 2.3](#)). İleriki bölümlerde anlatılacağı üzere parçacık takibi yapılacak deneylerde T0 yüzeyine 2 x 3 cm aralıklarla fosforlu sarı ve fosforlu turuncu renklerde boyalı ~ 2 mm boyutlu kuvars çakılları ardışıklı olarak dizilmiştir. Sonraki 3 aşama volkan domunun oluşumunu temsil eden kabarma (tumescence) aşamasıdır (T1-T2-T3). Bu aşamaların her birinde enjektör içinden 60 ml su, su balonuna enjekte edilmiş, yani magma odasının magma ile dolduğu durum taklit edilmiştir ([Şekil 2.3](#)). Son deney aşaması kaldera çökmesini temsil eden, enjektör ile su balonunun boşaltıldığı (T4) aşamasıdır ([Şekil 2.3](#)). Toplam 14 deney gerçekleştirilmiştir. Temsili magma odasının (su balonu) farklı şekil, konum ve boyutlarına bağlı olarak deneyler tekrarlanmıştır ([Şekil 2.4](#)).

**Çizelge 2.1.** Deneyde kullanılan kum-un karışımı ve magma odası yükseklikleri.

| Deneyler | Referans Aşamasında (T0) Magma Odasının (Su Balonu) Yüksekliği (cm) | Referans Aşamasında (T0) Kum-Un Karışımının Yüksekliği (cm) |
|----------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Model 01 | 3,2                                                                 | 5                                                           |
| Model 02 | 3                                                                   | 5,5                                                         |
| Model 03 | 3,2                                                                 | 6                                                           |
| Model 04 | 3,2                                                                 | 6                                                           |
| Model 05 | 3,2                                                                 | 6                                                           |
| Model 06 | 3,2                                                                 | 6                                                           |
| Model 07 | 3,2                                                                 | 5                                                           |
| Model 08 | 3,94                                                                | 5,5                                                         |
| Model 09 | 3,94                                                                | 5,5                                                         |
| Model 10 | 2,24                                                                | 5                                                           |
| Model 11 | 2,24                                                                | 5                                                           |
| Model 12 | 2,24                                                                | 5,5                                                         |
| Model 13 | 2,24                                                                | 6                                                           |
| Model 14 | 1,48                                                                | 9                                                           |



**Şekil 2.3.** Deney aşaması. T0: referans aşaması, T1, T2, T3: kabarma (tumescence), T4: kaldera çökmesi.

|                   | T0-T4                                                                               | T1                                                                                  | T2                                                                                   | T3                                                                                    |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Model 03-04-05-06 |    |    |    |    |
| Model 07          |    |    |    |    |
| Model 08-09       |   |   |   |   |
| Model 10-11-12-13 |  |  |  |  |
| Model 14          |  |  |  |  |

**Şekil 2.4.** Temsili magma odalarının (su balonları) boyutlarının deneylere göre karşılaştırılması.

### 2.1.1.3. Kum Havuzu Deneyleri Gözlem Yöntemleri

Kum havuzu deneyleriyle oluşturulan kaldera modellerinin topoğrafik değişimleri iki farklı yöntemle incelenmiştir. Hareketten Yapı-Çok Bakılı Stereofotogrametri (HY-ÇBS) yöntemiyle 3B modeller oluşturulmuş ve yüksek hassasiyetli yüzey modellemesi yapılmıştır. Parçacık Takibi (PT) yöntemiyle yüzey hareketleri ve modellerin yüzey



deformasyonu incelenmiştir. Kullanılan yöntemlerin ayrıntıları takip eden alt bölümlerde anlatılmaktadır.

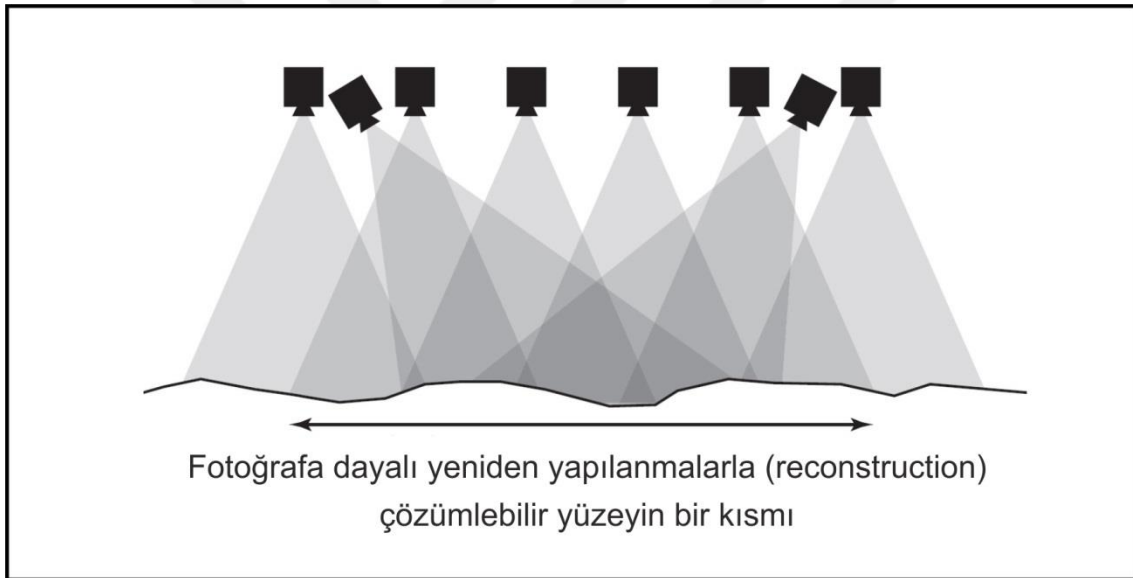
#### **2.1.1.3.1. Hareketten-Yapı/Çok-Bakılı Stereofotogrametri (HY-ÇBS)**

Fotogrametri; kamera konumu, odak uzaklığı ve yönelimi gibi kamera parametrelerinin bilinen değerlerinden, görüntü alanındaki (scene) içeriklerin 3 boyutlu görüntüsünü üretmek için, farklı konumlardan görüntülenen bir nesnenin en az iki görüntüsünü kullanan, bir uzaktan algılama tekniğidir (Tavani ve ark., 2014; Fleming ve Pavlis, 2018).

Sayısal fotoğraflama ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler son 20 yılda stereo fotoğraflar kullanılarak gerçekleştirilen basit fotogrametrik analizleri farklı bir seviyeye taşımıştır. Ullman (1979)'un hareketten 3B yapı çıkarmaya yönelik ilksel çalışmaları yakın zamanda geliştirilerek “Hareketten Yapı-Çok bakılı stereofotogrametri” (HY-ÇBS) metodunun ortaya çıkmasını sağlamıştır (Ulusoy ve ark., 2017). HY yöntemi farklı açılardan, mesafelerden ve pozisyonlardan çekilen görüntülerle basit, düşük yoğunluklu 3B bir nokta bulutu oluşturur. Pek çok görüntünün bu düşük yoğunluklu buluttan elde edilen konum bilgisine göre yeniden analiz edilmesiyle (ÇBS algoritmaları) herhangi bir yüzeyin veya nesnenin 3B modeli oluşturulur. Yöntem sayesinde 3B nokta bulutu verileri artık yalnızca lazer tarayıcılar gibi pahalı ve özel cihazlarla değil, kalibrasyonsuz (konum bilgisi kaydetmeyen), tüketici ölçeğindeki sayısal kameralarla da mümkündür (Furukawa ve Ponce, 2010; Gong ve Wang, 2011; James ve Robson, 2012; Bemis ve ark., 2014). HY-ÇBS yöntemi geniş ölçekte, çok ucuza, kolay, yüksek çözünürlüklü yüzey modellemesinin önünü açarak yerbilimlerinde yeni bir çağ açmaktadır (Favalli ve ark., 2012; Ulusoy ve ark., 2017).

3B yeniden yapılanma (reconstruction) için HY-ÇBS yöntemi, ilgili alanın görüntülerinin farklı konumlardan elde edilmesini gerektirir (James ve Robson, 2012). Görüntüler neredeyse tüm dijital kameralarla toplanabilmektedir (Bemis ve ark., 2014). Dijital fotoğraflar kolayca elde edilebildiği ve otomatik olarak işlenebildiğinden dolayı, alanların yanlışlıkla atlanması ihtimalini azaltmak için çok sayıda binili görüntü toplama amaçlanmalıdır (James ve Robson, 2012). Yeniden yapılandırılacak her yüzeyin, farklı konumlardan alınan en az 2 görüntüsü ve tercihen daha fazlası gerekir (Şekil 2.5; Bemis ve ark., 2014). 10-20° arasında değişen açısız aralıklarla

fotoğraflamalar yapıldığında daha iyi sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir (James ve Robson, 2012). Bununla birlikte, görüntü toplama sırasında birkaç ilkenin göz önünde bulundurulması, analiz sırasında reddedilebilecek fotoğrafların (bozuk veya düşük kaliteli görüntüler) sayısını en aza indirmeye yardımcı olabilmektedir (James ve Robson, 2012). Sahne dokuları ile birlikte fotoğraf setinin yoğunluğu, netliği ve çözünürlüğü, ilk durumda ortaya çıkan nokta bulutu verilerinin kalitesini belirleyecektir (Westoby ve ark., 2012). Görüntülerde çok az doku gösteren alanlar, örneğin, karlı yüzeyler veya gölgelerle gizlenmiş alanlar, modellemede kötü sonuçlar vermektedir (James ve Robson, 2012). Gölgeyi önlemek için, aydınlatma koşulları en iyi şekilde dağıtılmalıdır (James ve Robson, 2012). Yüzeyin görüntüsünün farklı yönlerden değişmesine neden olan faktörler (kamera flaşı kullanmak, yansımalar veya ıslak yüzeylerden parlama gibi) en aza indirilmelidir (James ve Robson, 2012).

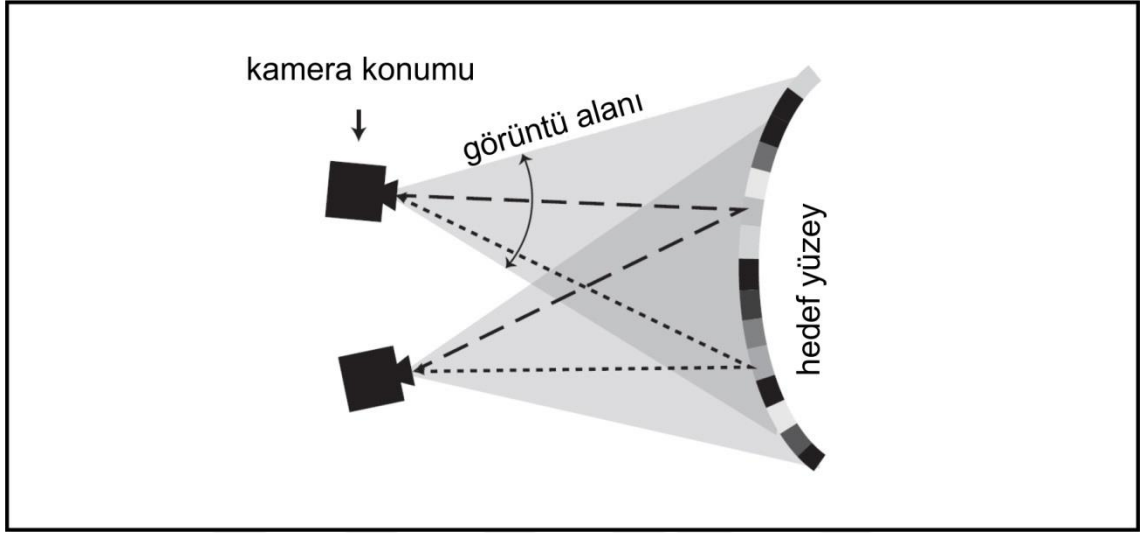


**Şekil 2.5.** Fotoğrafa dayalı 3B yeniden yapılanma (reconstruction) için basitleştirilmiş görüntü elde etme gösterimi (Bemis ve ark., (2014)’ten Türkçeleştirilerek alınmıştır).

Fotoğraf işleme ve 3B model oluşumu dört ana aşamadan oluşmaktadır:

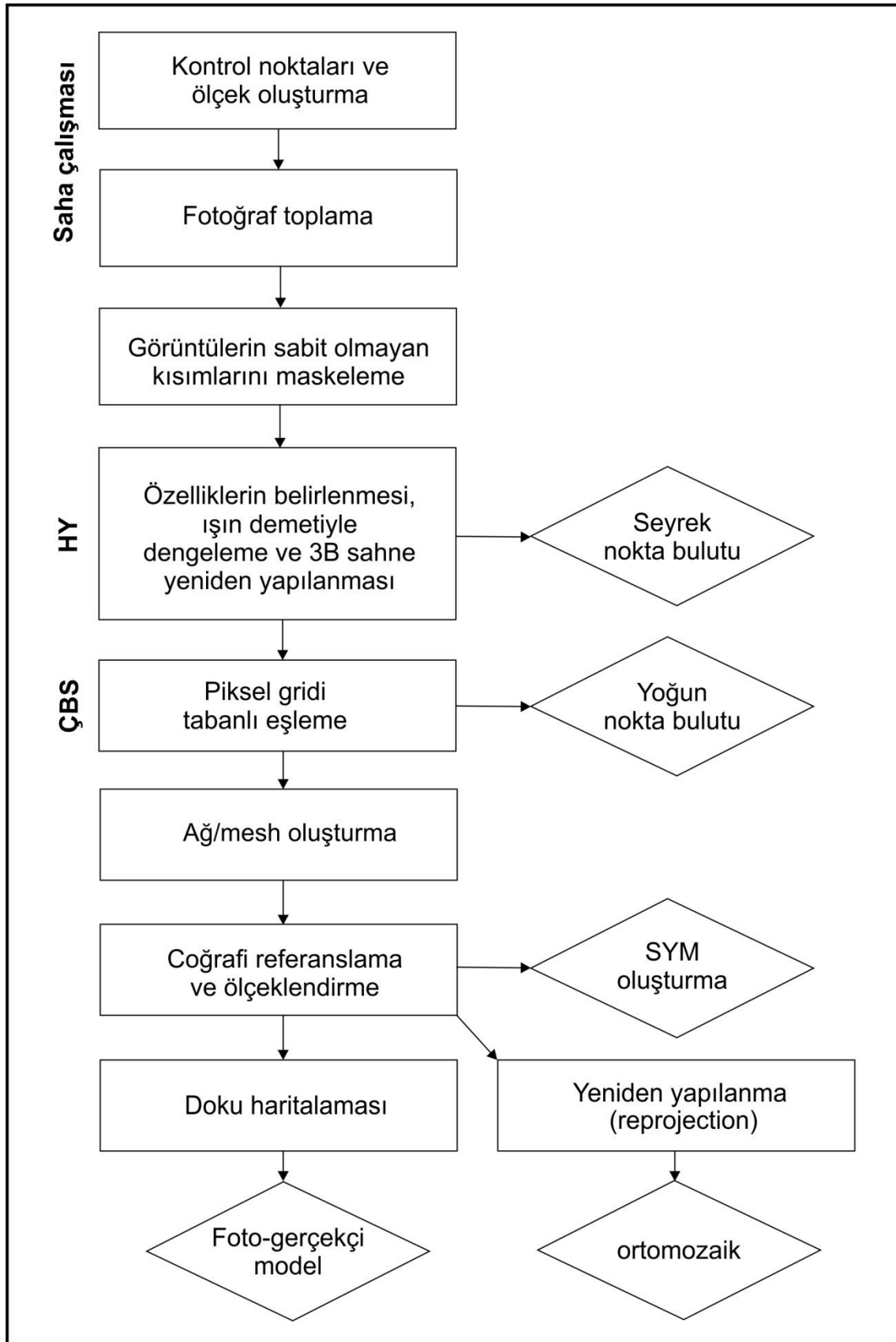
HY tabanlı bir 3B yeniden yapılanmanın ilk aşaması, her bir görüntünün koleksiyon içerisindeki diğer görüntülerde karşılık gelen özellikleriyle eşleştirilmesinin analizini içermektedir (Şekil 2.6; Bemis ve ark., 2014). 3B modelleme yönteminin ilk etabı olan Hareketten-Yapı (HY) algoritması farklı pozisyonlardan çekilmiş pek çok görüntüyü

tarar, bu görüntüleri elementlerine (izole noktalar, çizgisel unsurların bitiş noktaları veya dokusal unsurlar gibi ayırdedilebilir yapısal unsurlar) ayırır ve bunların üç boyutlu yapısını ve hareketini bu unsurları tekrar birleştirerek yeniden oluşturur (Ullman, 1979; Ulusoy ve ark., 2017). Böylece eşleşen özellikler, yerel bir koordinat sistemi içerisinde 3B bir seyrek nokta bulutu oluşturur (Bemis ve ark., 2014).



**Şekil 2.6.** 3B yeniden yapılanmada (reconstruction) fotogrametrinin temel prensipleri (Bemis ve ark., (2014)’ten Türkçeleştirilerek alınmıştır).

İkinci aşama, yoğun nokta bulutu oluşturmaktır. HY algoritmaları ile üretilen seyrek nokta bulutu, Çok-bakılı stereofotogrametri (ÇBS) algoritmaları için girdi olarak kullanılmaktadır (Fleming ve Pavlis, 2018). Bilinen kamera parametreleri ve yönelimleri ile ÇBS algoritması, yüzeyin yoğun bir nokta bulutunu üretmektedir (Bemis ve ark., 2014). Bu aşamada genellikle bir unsur tespit algoritması olan SIFT algoritması kullanılır (Lowe, 2004). Bu iki algoritma (HY ve ÇBS) sonucunda aslında gerçek 3B model oluşturulmuştur. Devam eden aşamalar modelin yüzeyinin görselliğini artırmak içindir; ağ (mesh), doku, ortofoto ve sayısal yükseklik modelleri üretilir (Şekil 2.7).



**Şekil 2.7.** Fotoğrafa dayalı 3B yeniden yapılanma (reconstruction) işlemini gösteren genel iş-akış şeması (Bemis ve ark., (2014)'ten Türkçeleştirilerek alınmıştır).



HY-ÇBS yönteminin ana avantajları ve uygulamada dikkat edilmesi gereken ana hususlar şu şekilde özetlenebilir: HY-ÇBS geleneksel fotogrametriye göre başlıca avantajlarından biri, kamera konumu, yönelimi ve geometrisinin tam olarak bilinmediği durumlarda (Westoby ve ark., 2012; Fleming ve Pavlis, 2018), birçok görüntünün otomatik olarak işlenebilmesidir (James ve Robson, 2012). Bu durum, aynı sahnenin farklı konumlardan alınan görüntülerindeki bir dizi örtüşen nokta grubunun HY algoritmalarıyla otomatik olarak algılanması ve her fotoğraf için kamera parametrelerini ilişkilendirmesiyle meydana gelmektedir (Tavani ve ark., 2014). Geleneksel fotogrametrinin aksine, sonuçta ortaya çıkan 3-boyutlu modelinin koordinat sistemi görecelidir (Westoby ve ark., 2012; Fleming ve Pavlis, 2018). Bu göreceli koordinat sistemi, herhangi bir referans bilgisi gerektirmeyen HY algoritmalarının bir sonucudur (Fleming ve Pavlis, 2018). Bununla birlikte, jeoreferanslı bir HY modeli elde etmek için, iki seçenek vardır: bunlardan birincisi kamera koordinatlarını sağlamak, ikincisi ise zemin kontrol noktalarını (Ground Control Points/GCP) kullanmaktır (Chen ve Clarke, 2001; Fleming ve Pavlis, 2018). Böylece HY görüntü alanı koordinatlarının, mutlak bir koordinat sistemine dönüşümü sağlanabilir (Westoby ve ark., 2012; Javernick ve ark., 2014).

Kaydedilen kamera konumlarına dayalı bir koordinat sisteminin ayarlanması genellikle havadan çekilen fotoğrafları işlemede kullanılır (Agisoft, 2018). Kullanılan kameranın dahili bir GPS ünitesi varsa, referans bilgileri genellikle fotoğrafların verileri içinde saklanır (Fleming ve Pavlis, 2018). Çeşitli yazılımlar (örneğin, Agisoft Photoscan Professional) bu bilgileri otomatik olarak çekebilir ve fotoğraflarla birlikte programa aktarabilir (Fleming ve Pavlis, 2018). Ölçeklendirme ve jeoreferanslama yapmak için ikinci bir yöntem olan zemin kontrol noktaları (Ground Control Points/GCP), doğal nesneler ya da yapay hedeflerdir (Fleming ve Pavlis, 2018) ve ilgili alanın kenarına veya dışına doğru yerleştirilmelidir (James ve Robson, 2012). Jeoreferanslama için minimum üç zemin kontrol noktasına (Ground Control Points/GCP) ihtiyaç duyulsa da, daha fazla kontrol noktası hatayı minimuma indirerek daha verimli bir sonuç sağlamaktadır (James ve Robson, 2012).

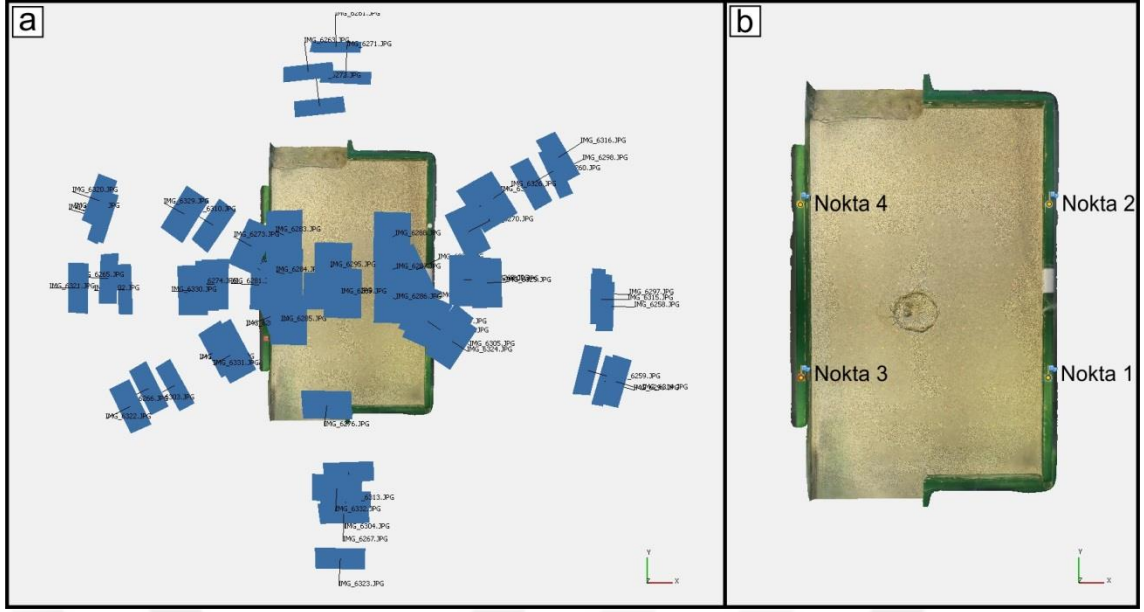
HY-ÇBS algoritmaları için çeşitli yazılımlar kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında Agisoft PhotoScan Professional 1.0.4 yazılımı kullanılmıştır.

Bu çalışmada, ilk olarak, deney düzeneği dört farklı köşeden ışık kaynaklarıyla aydınlatılmıştır (Şekil 2.8). Deneyin her aşamasında (T0, T1, T2, T3, T4) farklı açılardan ve yüksekliklerden modeli çevreleyen fotoğraflar çekilmiştir (Şekil 2.9a). Her bir deney seti için yaklaşık 70 adet fotoğraf kullanılmıştır.



Şekil 2.8. Deneyin HY-ÇBS ile 3B modellenmesi.

Fotoğraflamalar 15 MP çözünürlüğünde, Canon EOS 500D model dijital kamerayla yapılmıştır. Odak uzunluğu 18 mm, poz süresi 1/60 saniyedir. Jeoreferanslı bir HY modeli elde etmek için, deney düzeneğine mavi, beyaz, kırmızı ve sarı (sırasıyla, nokta 1, nokta 2, nokta 3 ve nokta 4) renklerinde referans noktaları yerleştirilmiştir (Şekil 2.9b). Fotoğraflar PhotoScan programına aktarılmış ve 3B model oluşturmak üzere 4 farklı aşamada modelleme gerçekleştirilmiştir.

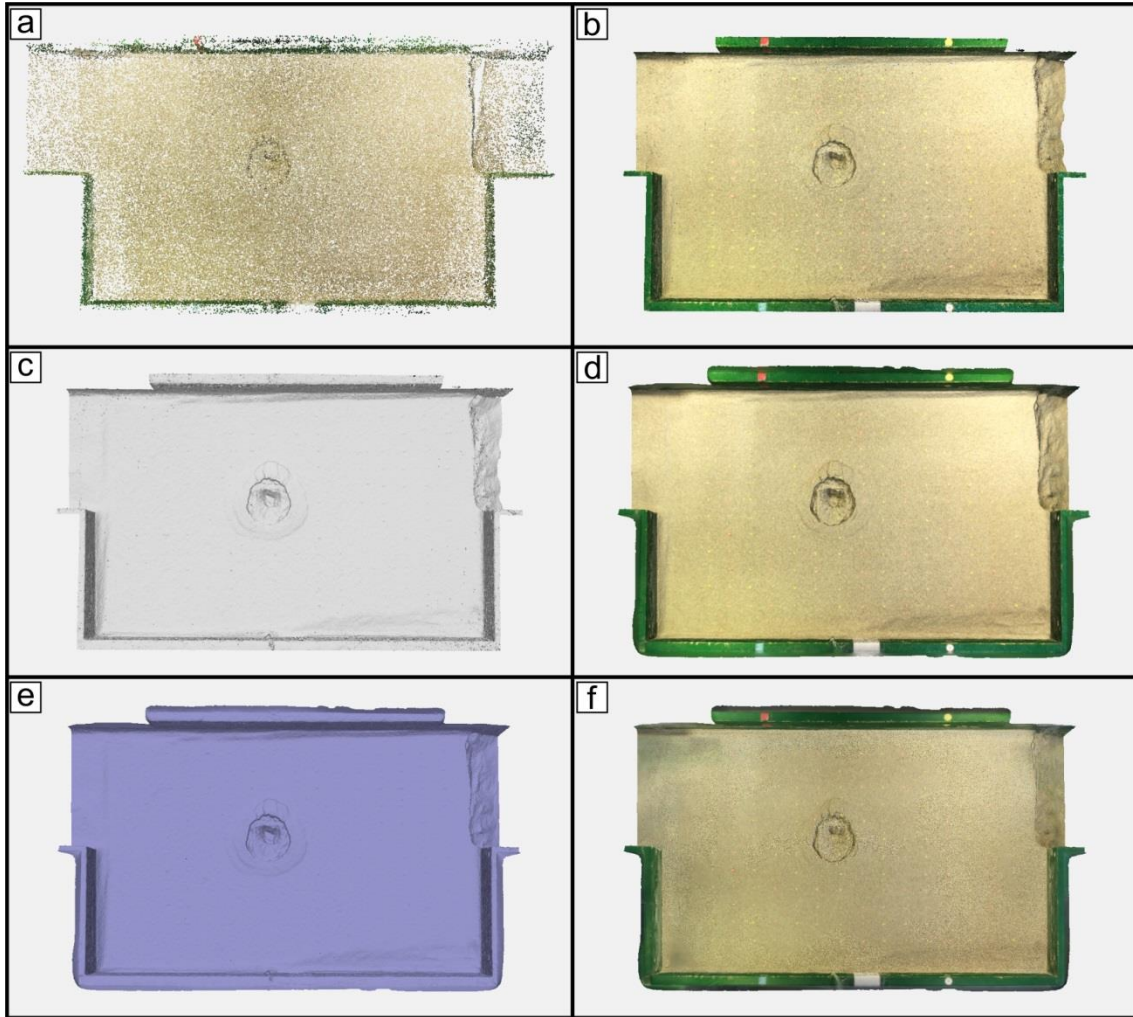


**Şekil 2.9. (a)** Farklı açı ve yüksekliklerden çekilen fotoğrafların kum havuzuna göre konumu, **(b)** referans noktalarının konumu.

İlk aşama, görüntü hizalamadır. Programa aktarılan 70 fotoğraf HY algoritmasıyla eşleştirilerek, bir seyrek nokta bulutu (point cloud) oluşturmaktadır (Şekil 2.10a). İkinci aşama, yoğun nokta bulutudur; ilk aşamayla birlikte belirlenen kamera konumları ve yönelimleri, ikinci aşamada referans olarak kullanılmaktadır ve çok-bakılı stereofotogrametri algoritmalarıyla yoğun nokta bulutu oluşmaktadır (Şekil 2.10b). Üçüncü aşama, 3B bir poligonal ağ oluşturarak modelin yüzeyini temsil eden bir ağ (mesh) oluşturma aşamasıdır (Şekil 2.10c, d). Dördüncü aşama ise modelin oluşturulduğu doku (texture) yapılanmasıdır (Şekil 2.10e, f), bu aşama sonunda artık gölgelendirilmiş sayısal yükseklik modeli ve bu model üzerine oturtulmuş ortofoto modeli oluşturulmaktadır. Böylece deneylerin yüksek hassasiyetli yüzey modellemesi elde edilmiştir. Modelin oluşumu aşamasında kullanılan fotoğraf sayıları ve nokta/yüzey sayıları aşama aşama Çizelge 2.2’de verilmiştir. Oluşan modellerin hassasiyeti ile ilgili detaylı çalışmamız bir sonraki bölümde sunulmuştur.

**Çizelge 2.2.** 3B model oluşumunda her bir aşamada ortaya çıkan nokta sayısı.

| Deney Aşaması | Fotoğraf Sayısı | Seyrek Nokta Bulutunda Nokta Sayısı | Yoğun Nokta Bulutunda Nokta Sayısı | 3B Model'de Yüz (Face) Sayısı |
|---------------|-----------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| T0            | 70              | 175 204                             | 6 221 984                          | 1 252 629                     |
| T1            | 70              | 178 222                             | 6 955 026                          | 1 399 724                     |
| T2            | 70              | 179 153                             | 6 829 442                          | 1 374 751                     |
| T3            | 69              | 177 217                             | 7 538 422                          | 1 517 284                     |
| T4            | 69              | 189 322                             | 7 507 543                          | 1 510 600                     |



**Şekil 2.10.** (a) Seyrek nokta bulutu, (b) yoğun nokta bulutu, (c) ağ oluşumu, (d, e, f) doku yapılanması.

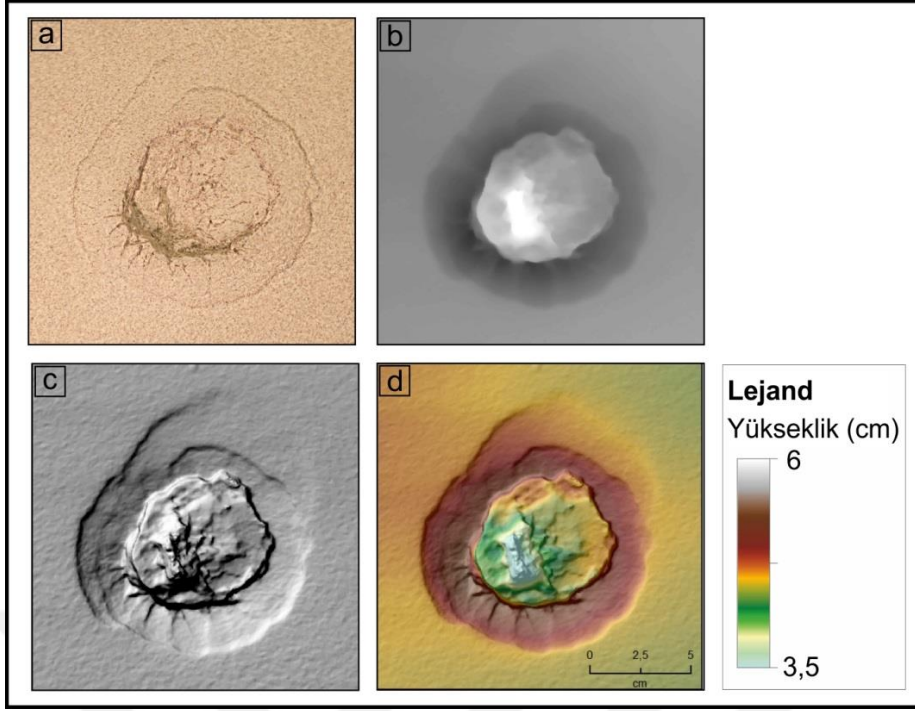
Her kaldera deneyinde oluşturulan 3B model kum havuzu kenarındaki referans noktaları yardımıyla referanslanmıştır. Referans noktaları kullanılarak modelin jeoreferanslaması esnasında referans noktasına yaklaşımda hesaplanan RMS (karelerin ortalamasının karekökü) hata payları örnek olarak 12'inci model için Çizelge 2.3'te sunulmuştur.

**Çizelge 2.3.** Referanslama sonucunda referans noktalarında oluşan yaklaşım hataları.

| Referans Noktaları | X (cm) | Y (cm) | Z (cm) | Toplam hata (cm) | X hata (cm) | Y hata (cm) | Z hata (cm) |
|--------------------|--------|--------|--------|------------------|-------------|-------------|-------------|
| Nokta 1            | 36.05  | 0.00   | 11.5   | 0.086332         | 0.067421    | -0.050743   | 0.018239    |
| Nokta 2            | 36.35  | 25.30  | 11.5   | 0.103128         | -0.092370   | -0.042138   | -0.018101   |
| Nokta 3            | 0.00   | 0.00   | 11.5   | 0.069793         | 0.065683    | 0.014807    | -0.018371   |
| Nokta 4            | 0.00   | 25.15  | 11.5   | 0.089912         | -0.040700   | 0.078078    | 0.018208    |
| <b>Toplam hata</b> |        |        |        | <b>0.088096</b>  |             |             |             |

Agisoft PhotoScan yazılımında oluşturulan 3B modeller, Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) veya ortofoto şeklinde dışa aktarılabilir (Şekil 2.11). Modeller, dört referans noktasının daha önce ölçülen x, y, z koordinatları ile referanslanmıştır (Çizelge 2.3). Oluşan ortofoto ve SYM görüntüleri ‘geotiff’ formatında kaydedilmiştir (Şekil 2.11a, b). Elde edilen SYM görüntüleri GIS veritabanında toplanarak uygun bir renk skalası ile renklendirilmiştir. Bir girdi olarak tanımlanan SYM haritasındaki piksellerin güneşe göre konumunu (Azimuth değeri 315) hesap ederek siyah/beyaz renkli, gölgeli bir kabartı haritası (hillshade) oluşturulmuştur (Şekil 2.11c). Böylece ArcGIS 10.2 yazılımı kullanılarak sayısal yükseklik modelleri elde edilmiştir (Şekil 2.11d). Her bir görüntü ‘jpeg2000’ formatında kaydedilmiştir. Tüm deneyler (Model 01 - 14) ve deney aşamaları aşamaları (T0, T1, T2, T3, T4) için bu işlemler tekrarlanmıştır.



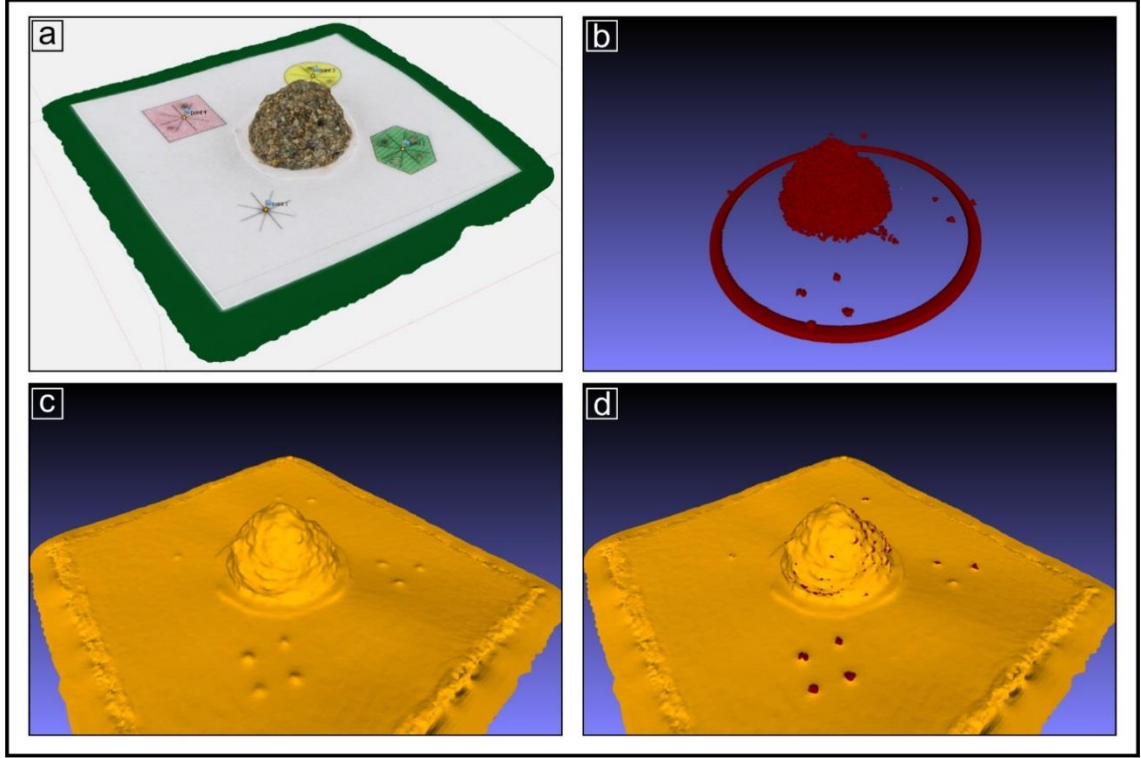


**Şekil 2.11.** Modelleme sonucu oluşturulan sayısal modellere örnekler: **(a)** ortofoto görüntüsü, **(b)** SYM görüntüsü, **(c)** gölgeli kabartı görüntüsü, **(d)** gölgeli kabartı görüntüsü üzerine oturtulmuş renkli sayısal yükseklik modeli.

#### 2.1.1.3.2. Stereofotogrametrik Yüzey Modellerinin Hassasiyeti

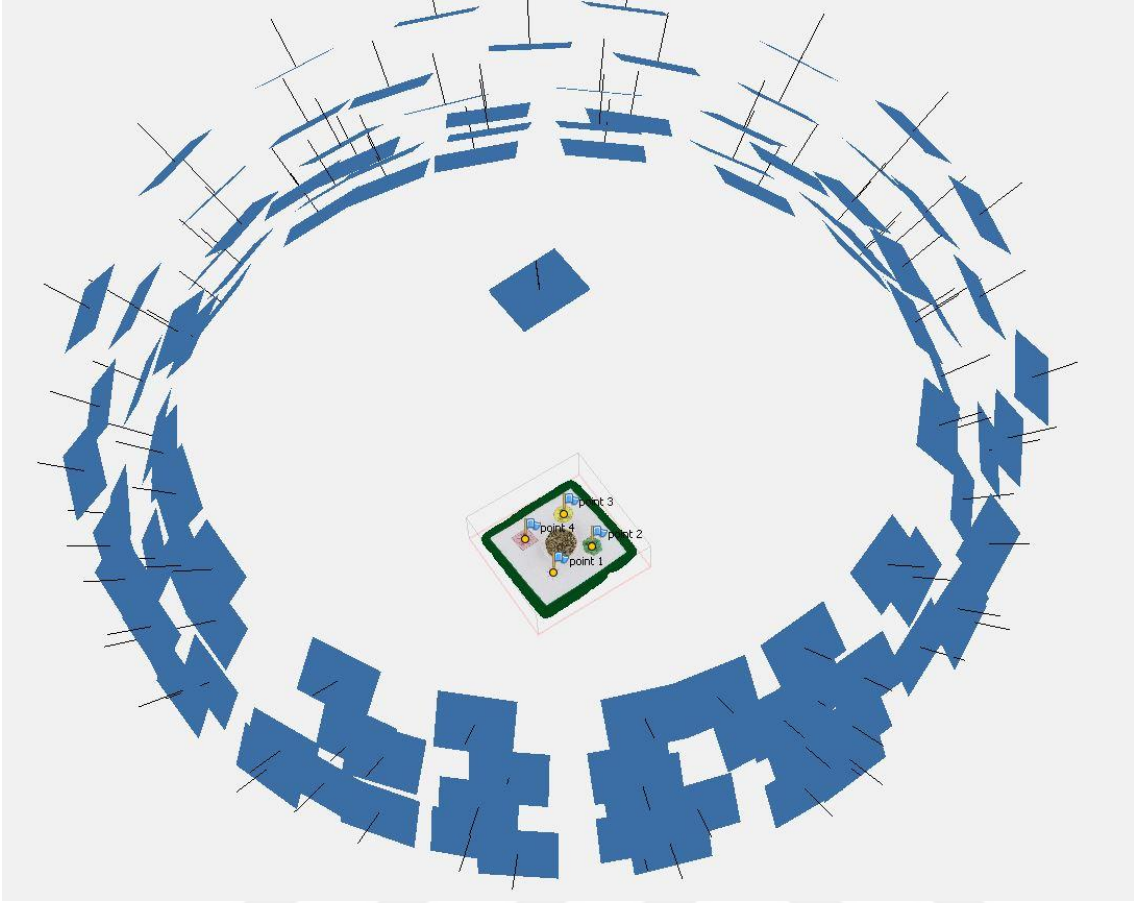
Kaldera deney modeli yüzey topoğrafyaları stereofotogrametrik modelleme ile oluşturulmuştur. Modellerin grid çözünürlüğü 0,0027 cm/piksel'dir. Bu yüksek çözünürlük görsel ve nümerik olarak analiz edilebilir sonuçlar vermiştir. Buna karşın modellerin güvenilirliğinin daha net ortaya konulabilmesi için yani yüksek çözünürlüklü modelin gerçeğe yakınlığını sınavabilmek için bir hassasiyet analizi de yapılmıştır. Model hassasiyetinin belirlenebilmesi için deneyde kullanılan kum-un karışımından basit bir tepecik oluşturulmuş, bu tepecik su bazlı yapıştırıcı ve su karışımıyla önceden referans noktaları çizilmiş bir kağıt şablon üzerine sabitlenmiştir (Şekil 2.12a). Hem şablon hem de kum-un karışımı yapıştırıcı ile sabitlenmiştir. Modellemenin kalitesinin artırılması için kağıt şablon üzerindeki referans noktaları ayrı şekil ve renklerde oluşturulmuştur. Referans şablonu referans noktalarının hassasiyetinin tutarlılığı için CorelDraw X6 ile hazırlanmış, 600dpi ile yazdırılmıştır. Referans noktalarını oluşturan karenin kenar uzunluğu 1,5 santimetredir (Şekil 2.12a). Noktaların 3 boyutta da görünürlüğünü artırmak amacıyla her referans noktasına sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 adet kum taneciği yapıştırılmıştır (Şekil 2.12). Hazırlanan bu küçük, sabit kum tepeciğinin hem

Mikro-CT ile (Şekil 2.12b) hem de stereofotogrametrik (HY-ÇBS) yöntemle (Şekil 2.12c ve 2.13) 3B modeli oluşturulmuştur.



**Şekil 2.12.** Stereofotogrametrik kaldera modellerinin hassasiyetini ölçmek için tasarlanan kontrol deneyi düzeneği. **(a)** Referanslı şablon üzerine yapıştırılan, su bazlı yapıştırıcı ile sabitlenen kum-un karışımı tepeciği, **(b)** Sabit tepeciğin Mikro-CT ile görüntülenene yüzey görüntüsü, **(c)** HY-ÇB stereofotogrametri ile oluşturulan yüzey modeli ve **(d)** her iki yöntemle modellenene/görüntülenene sabit tepeciğin referans noktaları yardımı ile referanslanarak üstüste oturtulmuş görüntüsü (bordo renkler Mikro-CT görüntüsünü, sarı yüzey de HY-ÇBS modelini göstermekte).

Stereofotogrametrik kaldera modellerinin hassasiyetini ölçmek için hazırlanan sabitlenmiş kum-un tepeciği, 15,1 MP çözünürlüğe sahip Canon EOS 500d dijital fotoğraf makinesi ile ortalama 15,1 santimetre mesafeden 114 kare ile fotoğraflanmıştır (Şekil 2.13). Fotoğraflar 18, 55 ve 40 mm odak uzunluğu ile üç farklı yakınlaştırma ile çekilmiştir. Çekilen fotoğrafların piksel boyutu  $4,77 \mu\text{m} \times 4,77 \mu\text{m}$ 'dir. Oluşturulan yüzey modelinin (Şekil 2.12c) grid çözünürlüğü 0,0553 mm/piksel'dir. Yüzey modeli 30337 vertis (ağ bağlantı noktası) ve 60000 yüzeyden (faces) oluşmaktadır.



**Şekil 2.13.** Stereofotogrametrik kaldera modellerinin hassasiyetini ölçmek için tasarlanan kontrol deneyi düzeneğinin stereofotogrametrik modeli ve modeli oluşturmak için alınan fotoğraf konumları.

Farklı yöntemler ile oluşturulan katı modelleri karşılaştırma için kullanılacak yapay kum tepciği modeli (6 x 9 mm boyutunda), 0,5 derece döndürme adımları ve her bir adımlamada 3 poz bindirme/ortalama yöntemi ile 0,5 mm alüminyum filtre kullanılarak 2 saat, 360 derece SkyScan 1272 X-Işını bilgisayarlı mikro tomografi cihazında, Hacettepe Üniversitesi İleri Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde (HÜNİTEK) taranmıştır. Tarama süresince 16,1  $\mu$ m piksel boyutu çözünürlüğüne sahip CCD kamera ile 852 adet 16 bit 4904 x 3208 piksel çözünürlüğünde ham radyografik iz düşüm/yansıma görüntüsü kaydedilmiştir. Ham görüntüler NRecon yazılımı kullanılarak 8 bit 772 x 1460 piksel çözünürlükte olacak şekilde 2 boyutlu bitmap görüntü formatına dönüştürülerek yeniden yapılandırılmıştır. Yapılandırılmış iki boyutlu görüntüler CT Analyzer (CTAn) görüntü işleme yazılımı kullanılarak stl. uzantısına sahip 3 boyutlu katı yüzey modeline dönüştürülmüştür. Sabitlenen örneğin Mikro-CT taraması ile oluşturulan yüzey modelinin grid çözünürlüğü 0,029



mm/piksel'dir. Mikro-CT ile oluşturulan yüzey 2748079 vertis ve 5521818 yüzeyden oluşmaktadır.

Oluşturulan iki yüzey veri seti (Şekil 2.12b, c) MeshLab (v.1.3.4beta) yazılımında üstüste çakıştırılmış (Şekil 2.12d) ve model hassasiyetinin belirlenmesi amacıyla iki yüzey modelinin üç boyutlu ortamda birbirinden farkı Hausdorf mesafe ölçüm yöntemiyle hesaplanmıştır. 'Hausdorf mesafe' yöntemi üç boyutlu uzayda iki hacimsel nesnenin birbirleri ile olan metrik mesafelerini hesaplamada kullanılır (Rockafellar ve Wets, 2005). HY-ÇBS ile oluşturulan yüzey modelinin 30337 vertis noktasının Mikro-CT ile oluşturulan yüzeydeki ilgili noktaya olan uzaklığının ölçülmesi ile elde edilen minimum, maksimum ve ortalama mesafe değerleri sırasıyla 0,000002 mm, 0,033419 mm ve 0,009393 mm'dir. Hesaplamanın karekök ortalama (RMS) hata payı 0,011046'dir. Buradaki maksimum mesafe 0,033419 mm oluşturulan modelin hassasiyetini göstermektedir. Bununla beraber bu hassasiyet birbirine göre referanslanan iki yüzey modelinin birbiri arasındaki hassasiyetini göstermektedir. Unutulmamalıdır ki stereofotogrametrik modelin jeoreferanslama esnasındaki hata payı ve sabit modelin şablonundaki referans noktalarının hata payı da toplam hatada etken olacaktır.

#### 2.1.1.3.3. Parçacık Takibi Yöntemi

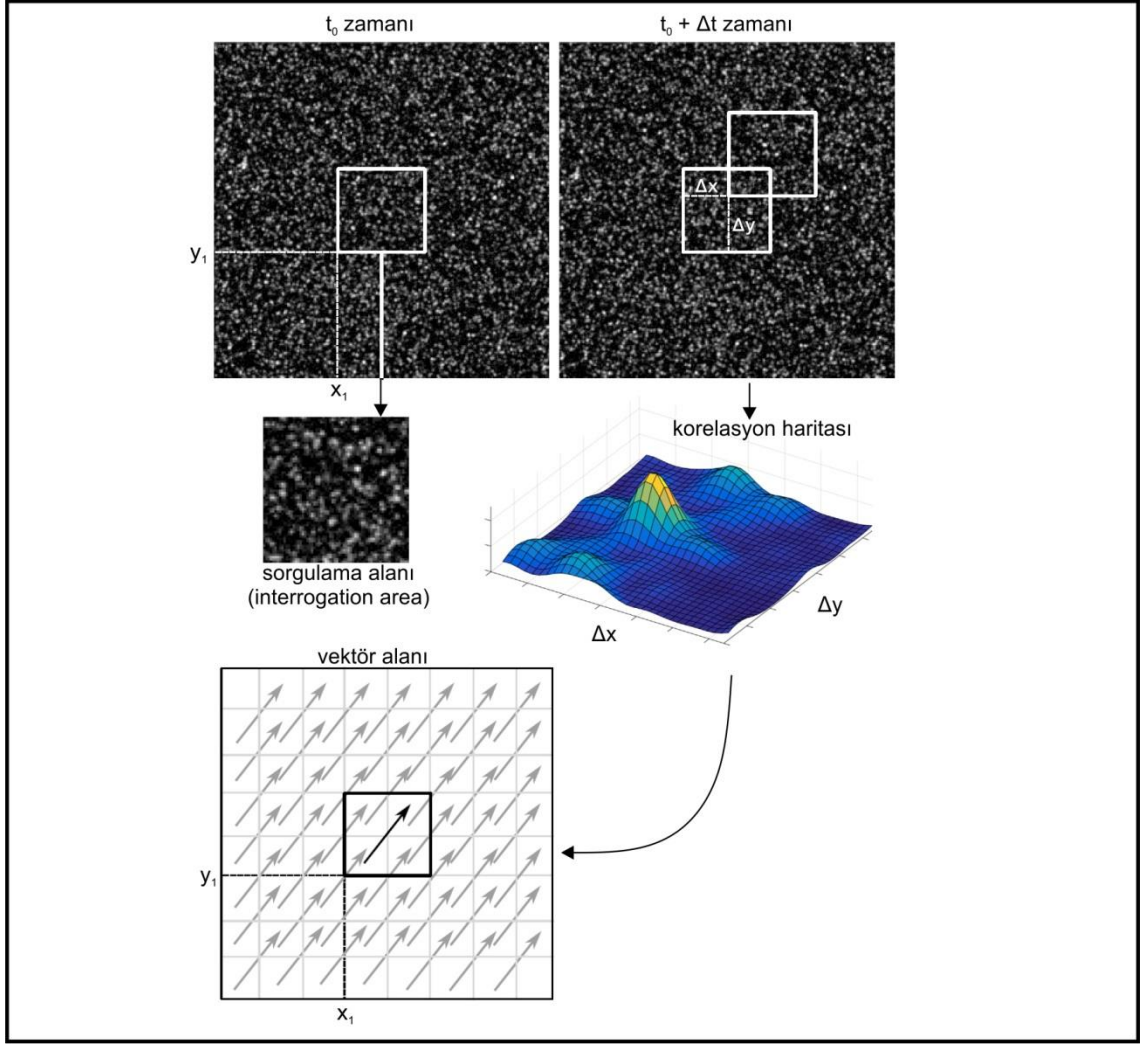
Dijital Parçacık Görüntü velosimetrisi (Digital Particle Image Velocimetry) veya daha genel adıyla Parçacık Takibi (Particle Tracking - PT) yöntemi kalitatif ve kantitatif akış görselleştirmesi amacıyla kullanılan yaygın bir tekniktir (Thielicke ve Stamhuis, 2014a). Bu çalışmada, PT analizleri için MATLAB yazılımının açık kaynaklı bir arayüzü olan PIVlab 1.4 kullanılmıştır (Thielicke, 2014a; Thielicke ve Stamhuis, 2014a, 2014b). PT, kum tanelerinin ya da diğer pasif işaretleyicilerin yer değiştirmelerinin ölçüldüğü ve deformasyonun modelde nerede, nasıl ve ne zaman gerçekleştiğinin kesin bir şekilde ölçülmesine izin veren birim deformasyon (strain) ya da -birim deformasyon-hızı (strain-rate) bileşenlerinin türetildiği bir tekniktir (Boutelier, 2016). PIVlab, yalnızca görüntü çiftleri içindeki hız dağılımını hesaplamakla kalmayan, aynı zamanda akış modelinin birden fazla parametresini türetmek, görüntülemek ve dışa aktarmak için de kullanılabilen açık kaynaklı bir yazılımdır (Thielicke, 2014b).

Thielicke ve Stamhuis (2014a) bir akışkanın (sıvı veya gaz) hareketini izleyebilmek için akışkan tabakasını ışıkla aydınlatarak dijital bir kamera ile parçacık hareketlerini PT ile

yakalamış ve takip etmişlerdir. PT analizinde, incelenen, biri referans ( $t_0$ ) diğeri hareketin gerçekleştiği zamandaki ( $t_0 + \Delta t$ ) iki görüntüdür (Thielicke ve Stamhuis, 2014a). Bu iki görüntünün kıyaslanmasıyla herhangi bir parçacık tanesinin A noktasından B noktasına  $\Delta t$  zamanda gittiği hesabıyla parçacığın hızı hesaplanır (Thielicke ve Stamhuis, 2014a).

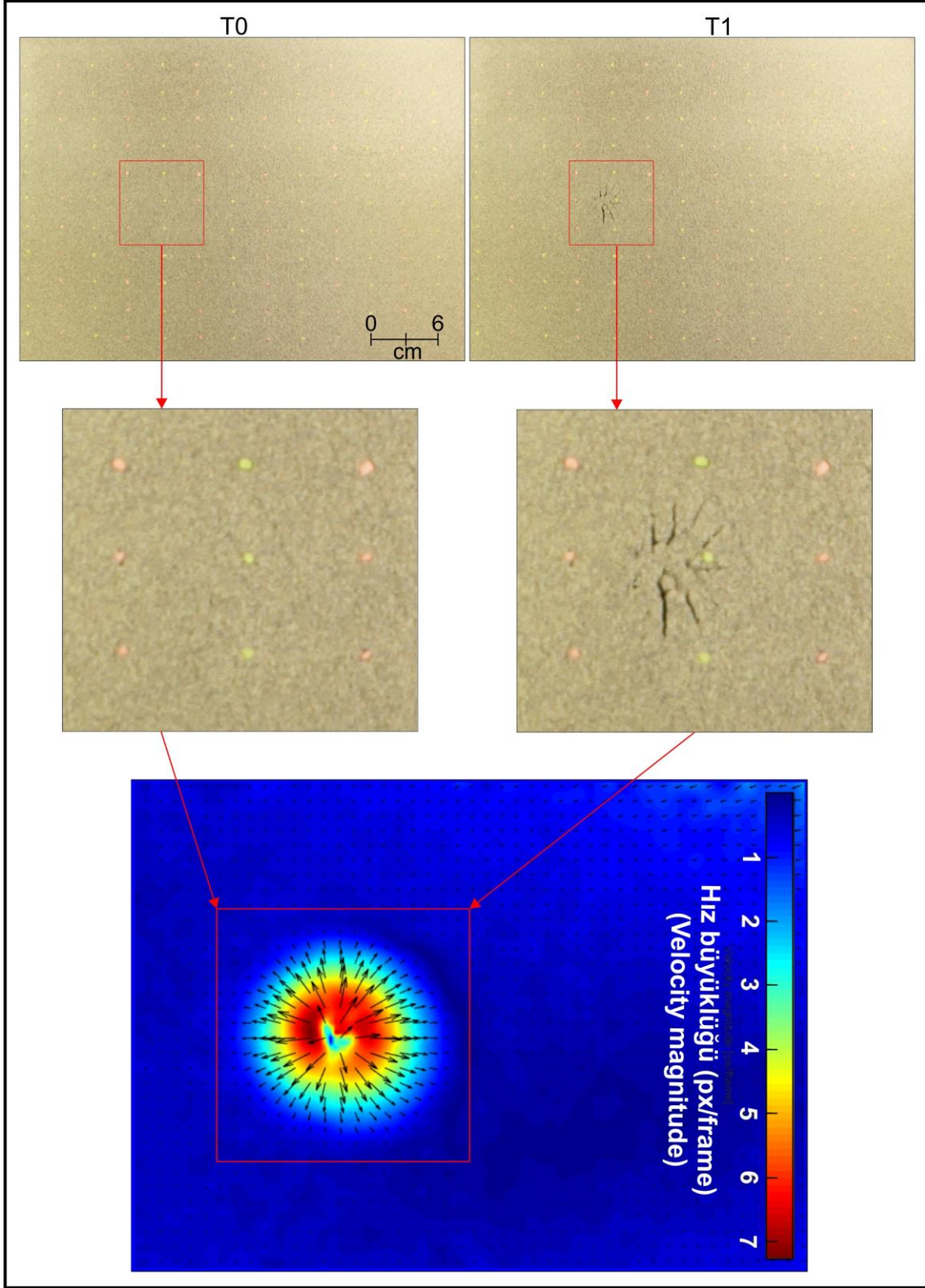
Dijital görüntü korelasyon teknikleri, belirli bir alanın tanımlanmış bir referans karesine göre nasıl hareket ettiğini belirlemek için, görüntüdeki belirli bir alanın konumunu ardışık görüntüdeki alanın konumuyla karşılaştırır (Marshak ve ark., 2019). Her bir görüntü küçük sorgulama alanlarına yani alt görüntülere bölünür ve her sorgulama alanı (interrogation area) için iki görüntü arasındaki yerel yer değiştirme vektörü çapraz korelasyon ile belirlenir (Şekil 2.14; Boutelier, 2016). Algoritma, her sorgulama penceresinin bir sonraki görüntüyle arasındaki kayma miktarını (shift) hesaplar (Boutelier, 2016). İki görüntü ve görüntü ölçeği arasındaki zaman aralığı göz önüne alındığında akış hızı vektörü ortaya çıkarılabilir (Boutelier, 2016).

Deneyler gerçekleştirilmeden önce parçacık takibi analizi için, referans topoğrafik yüzeye yaklaşık 2 mm çapında fosforlu turuncu ve fosforlu sarı renklerde boyalı kuvars çakılları yerleştirilmiştir (Şekil 2.15). Parçacıklar yatayda 3 cm ve dikeyde 2 cm aralıklarla dizilmiştir. Bu renkli parçacıklar PT analizleri için bir referans gibi kullanılır. Bu parçacıklar PT ile takip edilirken deney düzeneğinin kum yüzeyinde PIVlab'ın referanslara dayanarak tanıdığı kum parçacıkları da PT hesaplamasında kullanılır. Yani PT için kullanılan parçacıklar yalnızca bu renkli referans taşları değil, aynı zamanda deney kumu yüzeyidir.



**Şekil 2.14.** Parçacık Görüntüleme Velosimetrisi'nin temel gösterimi (Boutelier (2016)'dan Türkçeleştirilerek alınmıştır).

PT analizinde, deneyin her bir aşaması ( $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ) için üstten fotoğraflamalar yapılmıştır (Şekil 2.15). Görüntüler 1-2, 2-3, 3-4... ( $n$ ,  $n+1$ ) şeklinde, çiftler halinde sıralanarak PIVlab'a yüklenmiştir. Sonraki aşama görüntülerin analizidir. Çapraz korelasyon algoritmasıyla, görüntü çiftleri arasındaki yer değiştirme vektörleri belirlenmiştir. Sayısal parçacık takibi algoritması kullanılarak Model 12'de yüzey deformasyonu incelenmiştir.



**Şekil 2.15.** Model 12'nin T0 ve T1 aşamalarında çekilen ardışık iki fotoğrafı arasındaki yer değiştirmenin şematik gösterimi.

### **2.1.2. Sabitlenmiş (Fixed) Kum Havuzu Modelleri ve Onların Mikro-CT Analizleri**

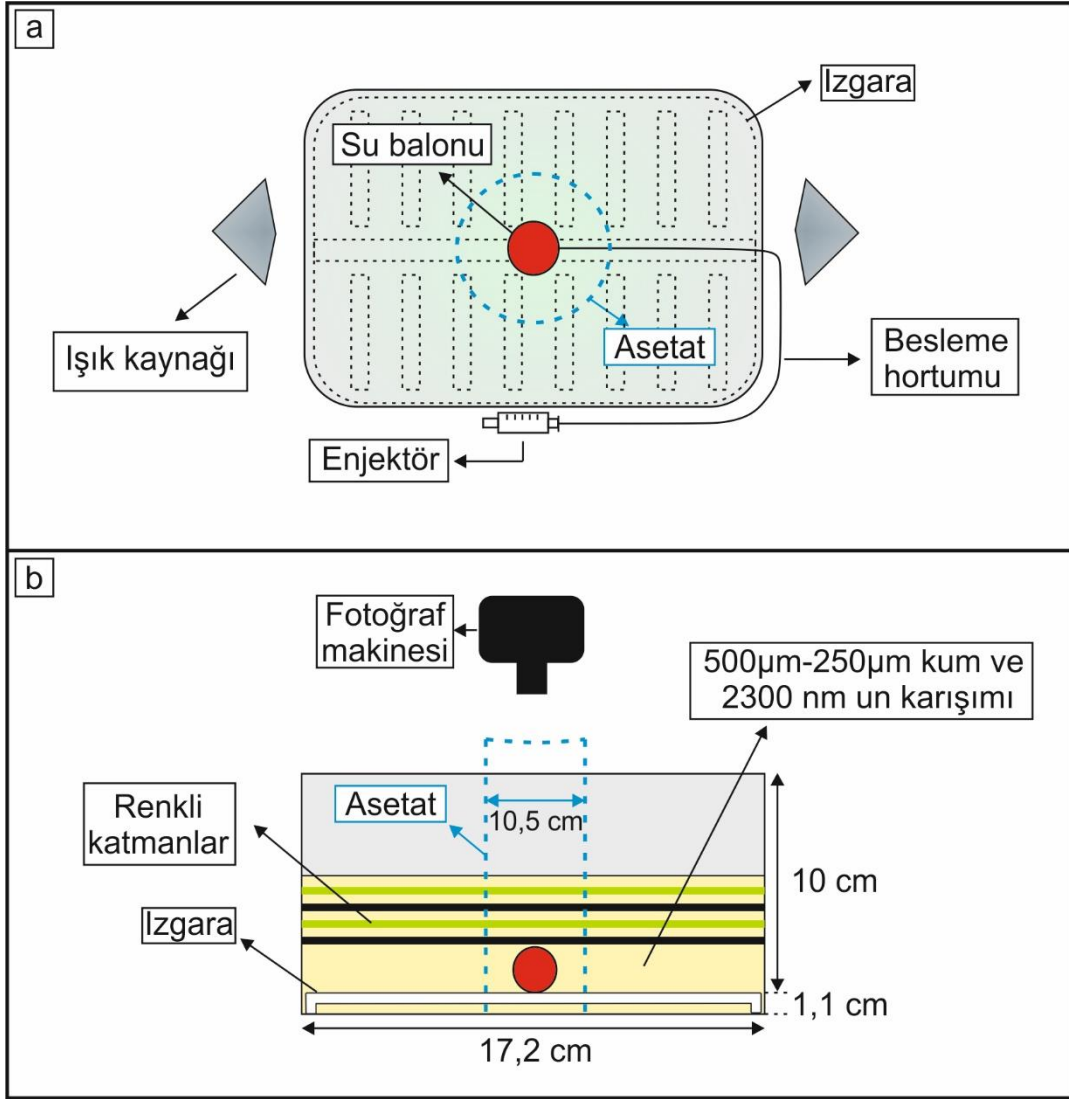
Kaldera deneylerinde oluşturulan modelin topoğrafik değişimi hem HY-ÇBS yöntemiyle hem de PT yöntemiyle incelenmiştir. Faylanmalar ve yüzey hareketleri bu yöntemlerle yüzeyden modellenerek incelenmiştir. Fakat oluşan fayların ve yapısal değişikliklerin üç boyutta, modelin içinde nasıl ilerlediğini ve geliştiğini yüzey modelleme yöntemleriyle belirlemek mümkün değildir. Bu amaçla modelin iç yapısını da görünür hale getirmek için sabitlenmiş (fixed) kaldera modelleri oluşturulmuş, bu sabitlenmiş modeller X-ışını tomografi ve Mikro-CT ile 3 boyutlu olarak taranarak analiz edilmiştir.

#### **2.1.2.1. Kullanılan Ekipman ve Malzeme**

Deney düzeneği 17,2 x 11,2 x 12,6 cm boyutlarında şeffaf bir kutudan oluşmaktadır (Şekil 2.16 ve 2.17). Kutunun tabanında 1,1 cm yüksekliğinde plastik bir ızgara yer almaktadır. Toplamda 5 farklı model oluşturulmuştur. Bu tez çalışması kapsamında verimli sonuç alınan iki model sunulmuştur. İlk modelin deney malzemesi İzmir'in Dikili ilçesinden alınan kumsal kumu, un ve öğütülmüş kuvars ve piroksenden oluşmaktadır. Kum, öğütülmüş kuvars ve piroksenler 500 µm, 250 µm, 125 µm ve 63 µm tane boyu elekler kullanılarak elenmiştir.

Deneyde 500-250 µm tane boyutunda kum, 2300 nm boyutunda un, 250-125 µm boyutunda piroksen ve yeşil renkli kuvars kumu kullanılmıştır (Şekil 2.17). 250-125 µm boyutlu piroksen ve kuvars kumu toplamda 4 katman oluşturacak şekilde (sırasıyla piroksen-kuvars-piroksen-kuvars şeklinde) deney düzeneğine yerleştirilmiştir (Şekil 2.16). Bu katmanların oluşturulma amacı, farklı X ışını geçirgenlikleri sayesinde, bu malzemelerin 3 boyutlu modelde yeraltı yapısalığının davranış şeklini temsil edeceği olgusudur. Magma odasını bir su balonu temsil etmektedir. Balon bir besleme hortumu aracılığıyla 60 ml'lik içi su dolu enjektörle beslenmektedir.





Şekil 2.16. Deney düzeneği (a) üstten görünüm, (b) yandan görünüm.

İkinci modelin deney malzemesi yine kumsal kumu, un ve öğütülmüş piroksenden oluşmaktadır. Kum ve öğütülmüş piroksenler 500 µm, 250 µm, 125 µm ve 63 µm tane boyu elekler kullanılarak elenmiştir. Deneyde 500-250 µm tane boyutunda kum, 2300 nm boyutunda un, < 125 µm boyutunda piroksen kullanılmıştır. < 125 µm boyutlu piroksen mineralleri toplamda 4 katman oluşturacak şekilde deneyde kullanılmıştır. Aynı şekilde, magma odasını bir su balonu temsil etmektedir. Balon bir besleme hortumu aracılığıyla 60 ml'lik içi su dolu enjektörle beslenmektedir.

Her iki model içinde aynı deney düzeneği kullanılmıştır.



**Şekil 2.17.** Deney düzeneği.

#### **2.1.2.2. Deney Süreci**

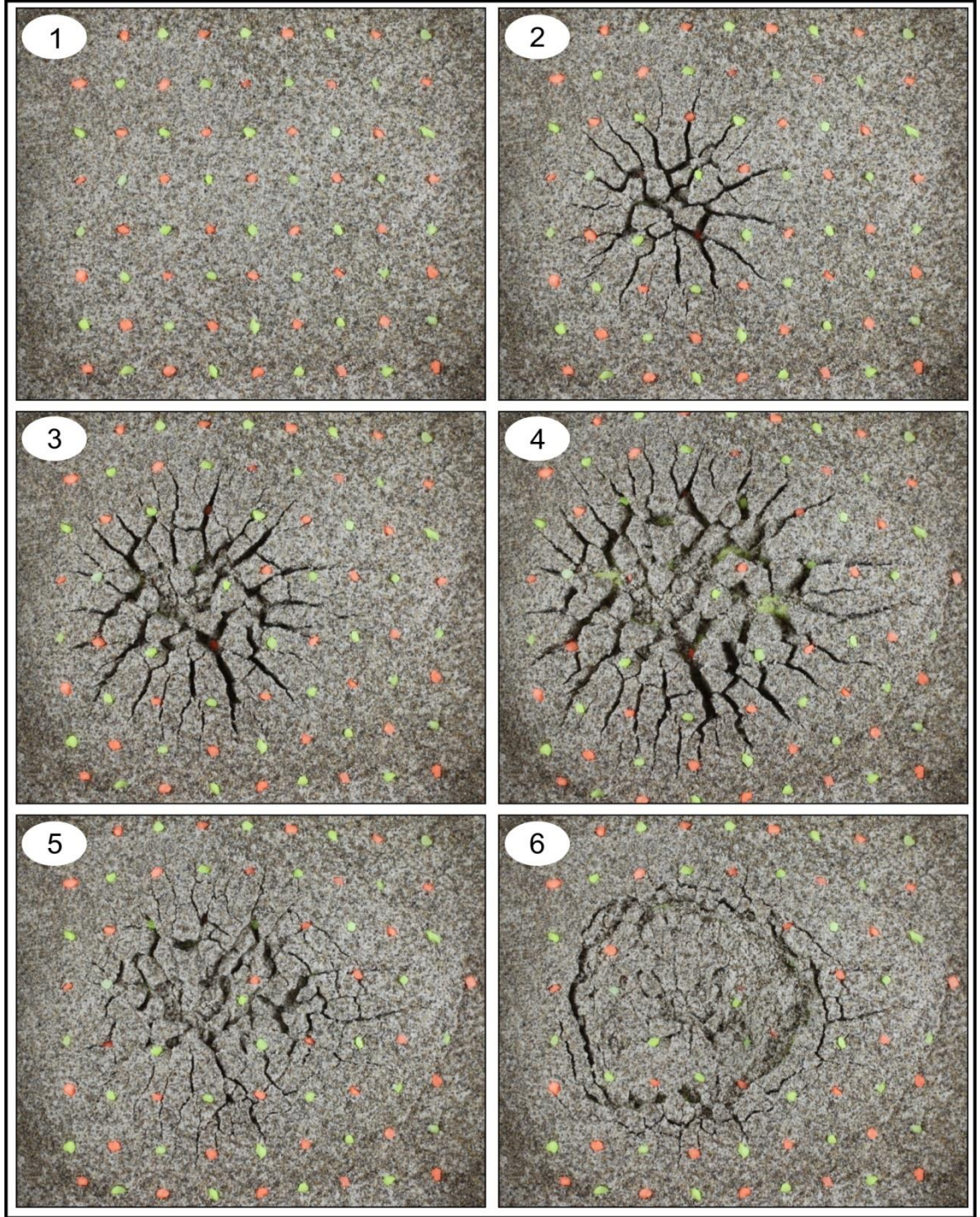
Deney kutusunun tabanına magma odasını temsil eden su balonu yerleştirildikten sonra kum-un karışımı (kumun 1/2'i kadar un) balonu örtecek şekilde doldurulmuştur. Ardından renkli katmanlara geçilmiştir. Her renkli katmanın arasında kum-un karışımı olmak üzere, tabandan itibaren sıralı bir şekilde (ilk model için piroksen, kuvars, piroksen, kuvars şeklinde; ikinci model için yalnızca piroksen) 4 renkli katman kullanılmıştır.

Deney düzeneği karşılıklı iki ışık kaynağıyla aydınlatılmıştır ve nadir bakış açısıyla (yukarıdan dik aşağı bakış açısı) fotoğraflama yapmak üzere fotoğraf makinesi yerleştirilmiştir. Referans aşamasından, kaldera oluşum sürecine kadar tüm deney süreci kesintisiz olarak (1/2 ve 1 saniye aralıklarla) fotoğraflanmıştır (Şekil 2.18). Nadir görüntüler için Canon EOS 500D model dijital fotoğraf makinesi kullanılmıştır. Fotoğraflar 4752 x 3168 piksel boyutundadır. Odak uzunluğu 33 mm, poz süresi 1/13 saniyedir. Deney süresi boyunca ilk model için toplam 109, ikinci model için 57 fotoğraf çekilmiştir.

Modellerin bozulmadan Micro-CT cihazına yerleştirilebilmesi için sabitlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle ilk olarak, yaklaşık 10,5 cm çapında silindir şekilli bir asetat kaldera modelini kapsayacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.19). Ardından  $\frac{1}{4}$  su bazlı yapıştırıcı ve  $\frac{3}{4}$  oranında su ile bir sabitleme karışımı hazırlanmış, bu su-yapıştırıcı karışımı, modeli kapsayan silindir şekilli asetatın içine doğru süzdürülmüştür. Model tamamen su-yapıştırıcı karışımı ile doygun hale gelince kurumaya/donmaya bırakılmıştır. Model kuruduktan sonra asetat dışında kalan kum atılmıştır. Böylece sabitlenmiş silindir şekilli bir kaldera modeli elde edilmiştir (Şekil 2.20). Her iki model için aynı işlemler tekrarlanmıştır.

Oluşturulan sabit modellerden birincisinin, herhangi bir deformasyona maruz bırakılmaksızın iç yapısal unsurlarının incelenmesi amacı ile X-ışını Tomografi yöntemi ile tomografisi çekilmiştir. İkinci sabit modelin ise önce yarı-dairesel kesitleri, daha sonra da çeyrek dairesel kesitleri alınarak, model üzerinde gözlenen yer değiştirme oranları ölçülmüştür, çeyrek dairesel kesitlerin X-ışını mikrotomografi ölçümleri yapılmıştır (Şekil 2.21).





**Şekil 2.18.** Deney sürecini nadir bakış açısıyla gösteren temsili deney süreci fotoğrafları.

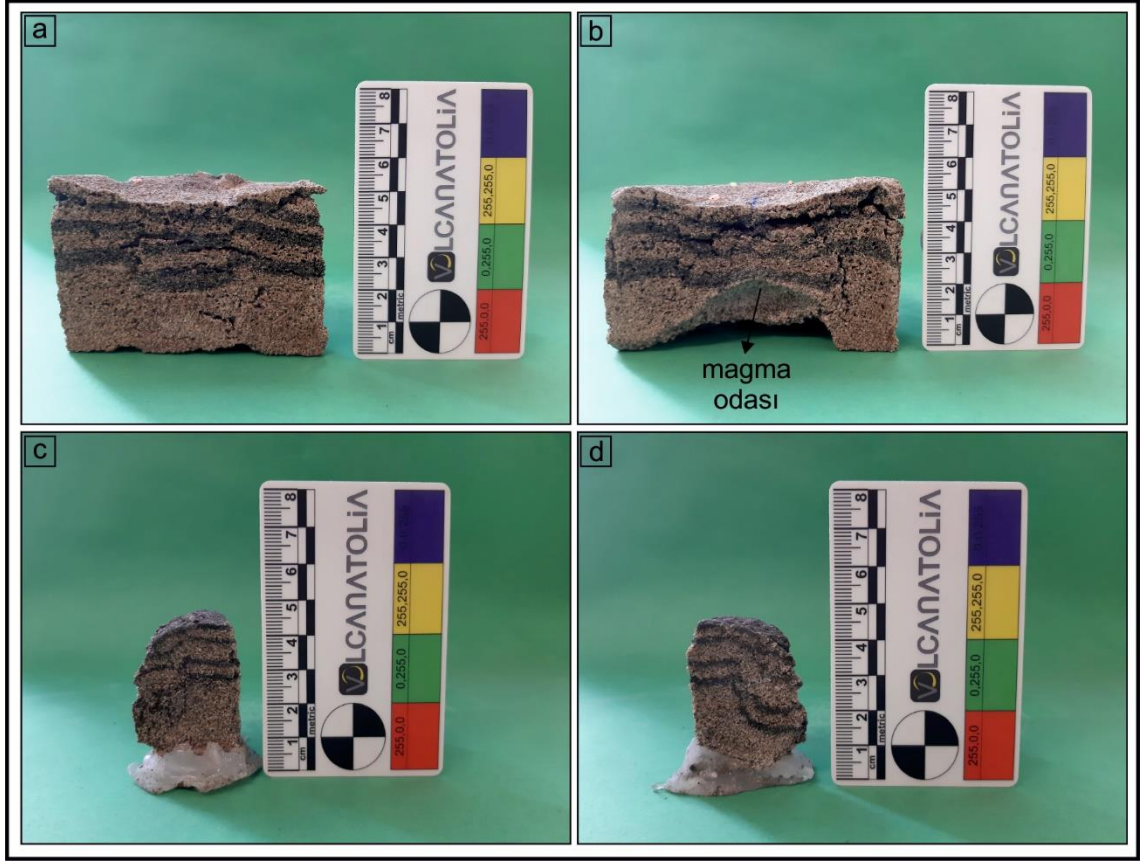




Şekil 2.19. Modele yerleştirilen 10,5 cm çaplı silindirik şekilli asetatin yerleştirilmesi.



Şekil 2.20. İlk oluşturulan sabitlenmiş modelin farklı açılardan fotoğrafları.



**Şekil 2.21.** İkinci sabitlenmiş modelin enine kesit fotoğrafları: **(a, b)** modelin yarı-dairesel kesit fotoğrafı, **(c, d)** modelin çeyrek dairesel kesit fotoğrafı.

### 2.1.2.3. Gözlem

#### 2.1.2.3.1. X-ışını Tomografisi / X-ışını Mikrotomografisi (Mikro-CT)

Üç boyutlu bir nesnenin yapısal bilgisi, nesnenin iki boyutlu kesitler haline getirilerek bir ışık mikroskobu kullanılarak görselleştirilmesiyle mümkündür. Bununla birlikte, örneğin ışık mikroskobu için hazırlanma aşamasında kesitleri alınırken yapısının ve dokusunun tahribatı ve kesit kalınlıkları arasındaki mesafenin fazla olması nedeniyle 3B yapısının tahribatı göz önüne alındığında bu yöntemin güvenilir sonuçlar verdiği düşünülmemektedir (Baker ve ark., 2003; Gurioli ve ark., 2008; Landis ve Keane, 2010; Polacci ve ark., 2006).

X-ışını tomografisi, üç boyutlu nesne yapılarının tamamını görselleştirmeye ve üç boyutlu bilgisini bozmadan ve kaybetmeden maddenin belirli fiziksel özelliklerini (gözeneklilik, yönelim, nesne boyutu gibi) ölçmeye olanak sağlar (Cnudde ve Boone, 2013; Flannery ve ark., 1987; Landis ve Keane, 2010). X-ışını (radyografi) taramasının temel prensibi, bir dedektör veya kamera kullanarak X-ışını aydınlatma verilerinin

toplanması aracılığıyla taranan bir nesnenin belirli alanlarının iki boyutlu gölge (kesitsel tomografik) görüntülerinin üretilmesine dayanmaktadır (ör., Scarfe ve Farman, 2008; Scarfe ve ark., 2009).

Sabitlenmiş kaldera modelleri ve sabitlenmiş çeyrek dairesel kaldera modeli, sırasıyla QR s.r.l., NewTom 5G Konik Işınlı Bilgisayarlı Tomografi / Cone Beam Computed Tomography (TEKNOgEM, İstanbul-Türkiye) ve Bruker, SkyScan1272 X-ışını Mikro-Bilgisayarlı Tomografi / X-Ray Micro-Computed Tomography (Hacettepe Üniversitesi Merkez Laboratuvarı, Ankara-Türkiye) kullanılarak iki farklı tipte konik ışınli bilgisayarlı tomografi sistemi kullanılarak taranmıştır. Tomografi çekilirken, kuvarsça zengin matriksli deney kumu ve piroksen tabakaları arasında en iyi kontrastı, minimum gürültü (noise) ile elde edebilmek için en uygun olan tarama parametreleri ayarlanmıştır. Sabitlenmiş kaldera modeli, 120 x 80 mm görüş alanında (FOV) NewTom 5G kullanılarak filtre olmadan yüksek çözünürlüklü geliştirilmiş mod (artırılmış doz, 110 kV-19.20 mA) ile 36 saniye içinde 360 derece taranmıştır. Bu tarama için 480 sayıda 14 bit, 1140 x 1000 piksel ham projeksiyon görüntüsü, 16 bit, 672 x 672 piksel, serbest matriks dicom formatına NNT yazılımı ile iki boyutlu görüntüler olarak modellenmiştir (reconstruction). Sabitlenmiş çeyrek dairesel kaldera modeli (2,7 cm x 1,8 cm x 1 cm) SkyScan 1272 tarafından taranmıştır. 2 saat boyunca, 360 derece dönen tarama ile 852 adet 16 bit 4904 x 3208 piksel ham projeksiyon görüntüsü, en yüksek kamera çözünürlüğünde (16,1 µm görüntünün piksel boyutu), 3 kare (frame) ortalamalı, 0,11 mm Cu filtre ile 0,5 dönel adım kullanılarak yakalanmıştır. Ham görüntüler, bir kez daha, NRecon yazılımı kullanılarak 8 bit, 772 x 1460 piksel bitmap görüntü dosyası formatına modellenmiştir.

Dairesel veya çeyrek dairesel numunenin 3B modellemesinin (hacim oluşturma) bölümlere ayrılması ve oluşturulması için modellenen 2B görüntü kesitleri, CT Analyzer (CTAn) yazılım paketi kullanılarak işlenmiştir. 2B görüntülerdeki piroksen katmanları, farklı yoğunluklu malzemelere sahip kontrast farkı ile gri tonlamalı ölçek ile kuvars bakımından zengin kum matriksinden ayrılmıştır. Kaldera modelinin ayrılan kısımları CTVox ve CTVol yazılımı kullanılarak 3B hacim olarak gözlemlenmiştir. Hacim oluşturma ekranı (volume rendering display), kaldera modelinin iç yapısını görselleştirmemizi sağlamaktadır ve örneklerdeki farklı piroksen katmanlarının ve

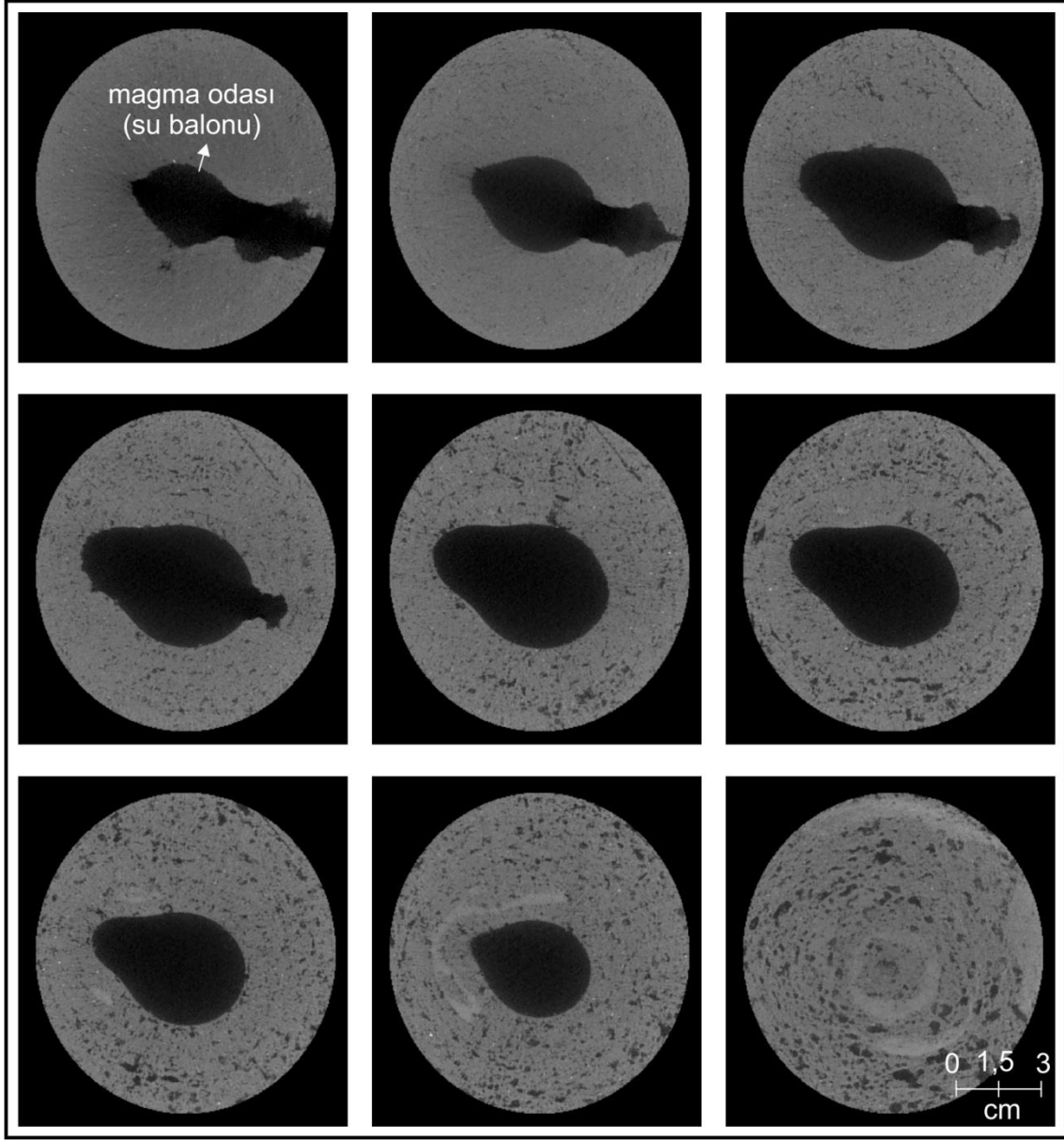
kuvars bakımından zengin matriksin çatlak ve boşluklarının 3B geometrisinin kalitatif incelenmesi için kullanılmıştır.

X-ışını tomografisi ile sabitlenmiş dairesel modeller görüntülenmiş ve bu görüntülerden modelin iç yapısını incelemek amacıyla yatay ve dikey kesitler alınmıştır (Şekil 2.22 ve 2.23). Her bir görüntü üzerinde fay çizikleri CorelDraw X6 programı kullanılarak çizilmiştir (Şekil 2.23). Faylar karakterlerine göre 4 gruba ayrılmıştır ve bu gruplar (sonraki bölümde sunulacağı üzere) 4 farklı renkte belirtilmiştir. X-ışını tomografisi ile elde edilen kesit görüntüleri ve bu görüntüler üzerine çizilen fay grupları Voxler programına aktararak 3B modeli elde edilmiştir.

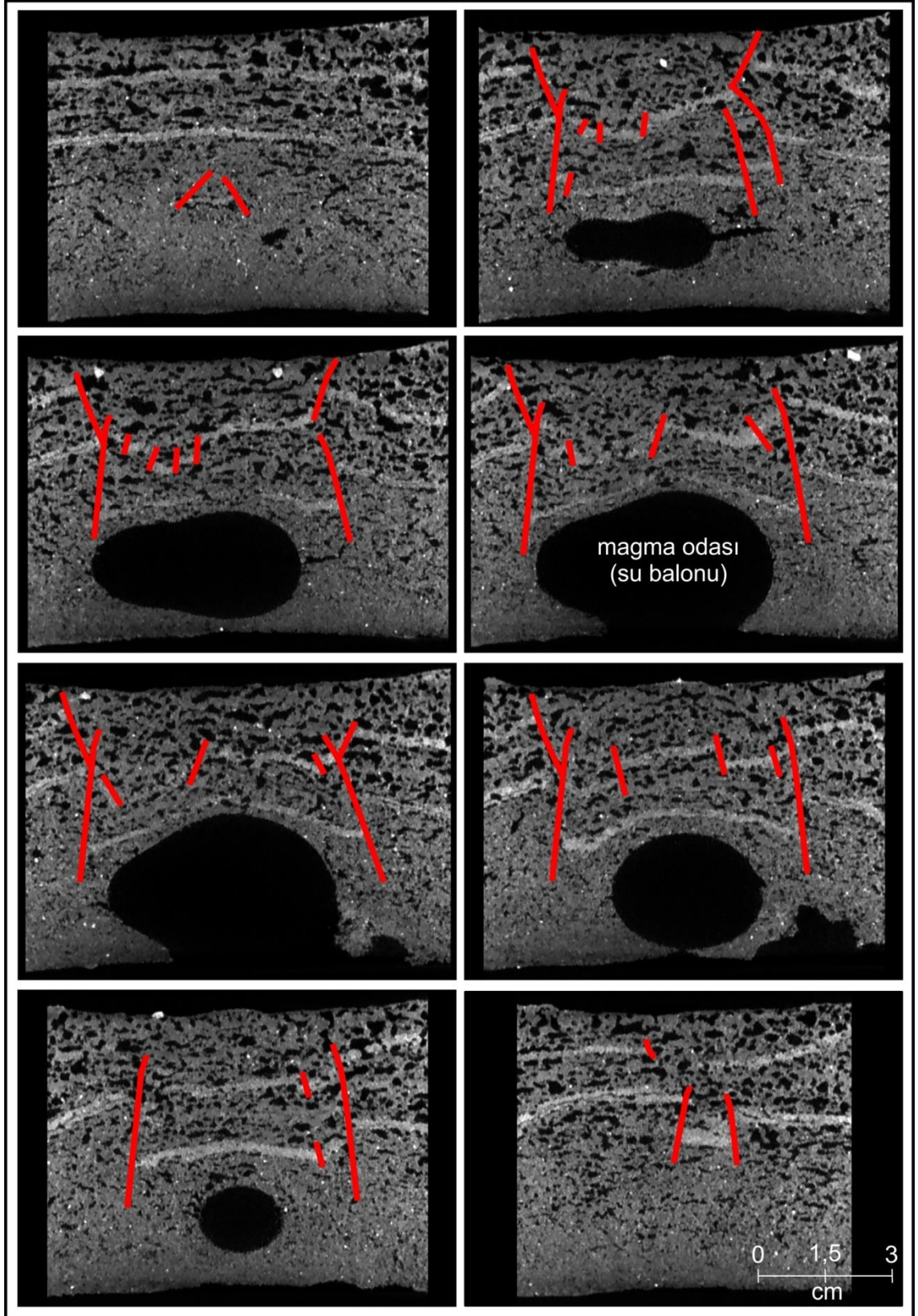
Voxler, hacimsel gösterim ve üç boyutlu veri görüntülemeye yönelik üç boyutlu bir bilimsel görselleştirme programıdır (Voxler, 2015), birçok farklı disiplinde (ör. arkeoloji, klimatoloji, tıp, hidrojeoloji, jeoloji, jeofizik) kullanılmaktadır (Voxler, 2015).

Voxler’de 3B model oluşturmak için 5 farklı aşama kullanılmıştır. Bunlar görüntüleri aktarma, filtreleme, kırpma, eş yüzeyler oluşturma (isosurface) ve hacimsel gösterimden (volume rendering) oluşmaktadır. Fay grupları ve kesit görüntüleri için tüm aşamalar tekrarlanmıştır. Böylece, modelin iç yapısal unsurları üç boyutta haritalanmıştır.





**Şekil 2.22.** Sabitlenmiş modelin X-ışını tomografisi ile elde edilen (aşağıdan yukarıya doğru sunulmuş) üstten görüntüsü.



**Şekil 2.23.** Sabitlenmiş modelin X-ışını tomografisi ile elde edilen kesitler halinde görüntüsü (kırmızı çizgiler, fayları temsil etmektedir).

## 2.2. Nümerik Modeller

Oluşturulan kaldera analog modellerinin topoğrafya yüzeyinde oluşturduğu yapısal unsurlar yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modelleriyle incelenmiş, iç yapısal unsurları ise X-ışını tomografi yöntemi ile görüntülenmiş ve modellenmiştir. Analog modellemelere ek olarak magma odasının yanal genişlemesinin yüzeyde oluşturduğu deformasyonu incelemek amacıyla gerçek boyutlar, parametreler ve fiziksel koşullar altında incelenmesi ve deneysel bulguların tekrarlanabilirliğini sınamak amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak nümerik modeller oluşturulmuştur. Bu modeller aynı zamanda model oluşumu esnasında stres dağılımlarını haritalayabilmek açısından da önemlidir. Tez kapsamında sunulan tüm nümerik modellemeler sonlu elemanlar yöntemi ile COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bunun için COMSOL Multiphysics'in Yapısal Mekanik (Structural Mechanics) modülünün Katı Mekanik (Solid Mechanics) ve Deforme Olmuş Geometri (Deformed Geometry) alt modüllerinden yararlanılmıştır.

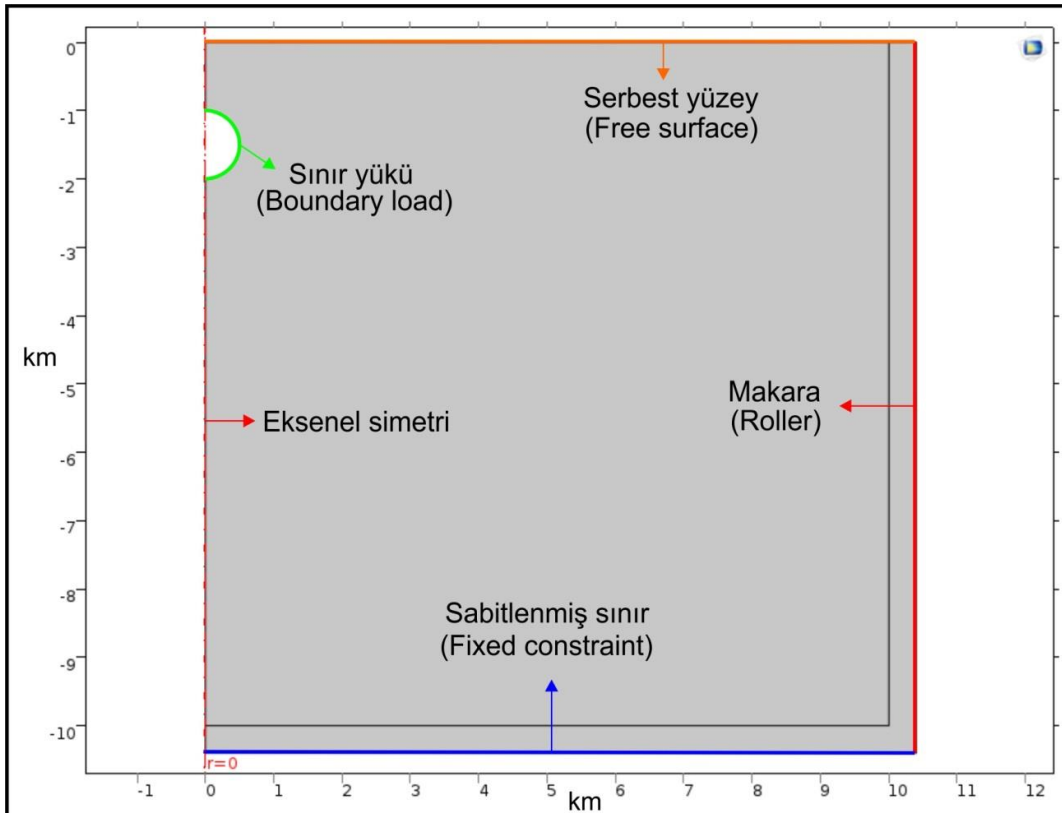
COMSOL Multiphysics, her türlü bilimsel ve mühendislik problemini modellemek ve çözmek için kullanılan güçlü bir etkileşimli simülasyon ortamıdır. (Comsol, 2013). Comsol ile multifizik simülasyonları çözülebilir; örneğin bir sıkışma deneyi esnasında örnek üzerindeki sıcaklık veya elektriksel faaliyeti veya bunların her ikisini birden modellemek mümkündür. Bu yazılım ile hazır fizik arabirimleri ve malzeme özellikleri için temel denklemleri tanımlamak yerine ilgili fiziksel nicelikleri (ör. malzeme özellikleri, yükler, sınırlamalar) tanımlayarak modeller oluşturulabilmektedir (Comsol, 2013). Değişkenleri, fiziksel eşitlikleri veya farklı sayısal değerleri doğrudan, katı veya akışkan ortamlara, ortamların sınırlarına, kenarlarına ve noktalara 'hesaplama ağından' (mesh) bağımsız olarak uygulanabilmek mümkündür (Comsol, 2013). Bir nümerik model modellenirken COMSOL multifizik yazılımı dahili olarak tüm fiziksel veya fizikokimyasal modeli temsil eden bir denklem grubunu kendi içinde derler (Comsol, 2013).

Modern ve teknolojik gelişmelerle birlikte araştırmacılar ve mühendisler, projelerinin daha düzgün ve güvenilir bir şekilde tasarlanması için, karmaşık fiziksel sistemlerin davranışlarını simüle etmelerine imkan veren matematiksel modellere ihtiyaç duymuşlardır (Dhatt ve ark., 2012). Mühendislik bilimleri (katı ve akışkanların dinamiği, termodinamik gibi) bu fiziksel sistemlerin davranışlarını kısmi diferansiyel



denklemler ile tanımlar (Dhatt ve ark., 2012). Bugün, sonlu elemanlar yöntemi, bu tür denklemleri çözmek için en sık kullanılan yöntemlerden biri haline gelmiştir (Dhatt ve ark., 2012) ve mekanik, fizik ve mühendislik hesaplamalarındaki problemlerle başa çıkmak için en güçlü tekniklerden biri olmuştur (Long ve ark., 2009).

Sonlu elemanlar modellerinin volkanik çalışmalara uygulanmasının başlangıcından bu yana, iki boyutlu ve eksenel-simetrik modeller yaygın olarak kullanılmıştır (Bianchi ve ark., 1984; Dieterich ve Decker, 1975; Yang ve ark., 1988; Scandura ve ark., 2008; Galgana ve ark., 2009; Pepe ve ark., 2010; Natale ve ark., 2011; Pinel, 2011; Hickey ve Gottsmann, 2014; Corbi ve ark., 2015; Gregg ve ark., 2015; de Silva ve ark., 2015; Troiano ve ark., 2015; Galetto ve ark., 2017). Temel olarak, simetrik ya da eksenel simetrik modelleri yöneten fizik aynıdır, ancak zemin yüzeyi deformasyonu gibi bazı çalışmalar geleneksel olarak eksenel-simetri tipi göstergeler kullanılarak sunulmuştur (Mogi 1958; Browning, 2015). Örneğin kaldera çökmeleri ve/veya tünel stabilitesi için eksenel simetri kullanan bir baz model olan ‘Mogi modeli’ (Mogi 1958), Şekil 2.24’te verilmiştir. Bu model, modelin simetrik olarak yarısının diğer yarısı ile aynı fiziksel değişimleri göstereceği basit varsayımıyla kurulur.



Şekil 2.24. Kaldera modelleri için bir baz model olan Mogi modeli.

Bu çalışmada magma odasının farklılaşan geometrisini, bu geometrinin zamansal değişimini ve modelin üst kısmını farklı topoğrafya ile temsil edebilmek için iki boyutlu simetrik modeller kullanılmıştır. Tüm modeller 80 km genişliğinde, 45 km yüksekliğinde dikdörtgen bir alandan oluşmaktadır. Topoğrafya farklı şekillerde modellenmiştir ve her topoğrafya şekli için farklı tip magma odaları zamana bağlı olarak simüle edilmiştir.

Comsol Multiphysics yazılımında sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan elastik modeller belirli denklemlerle ifade edilebilen fiziksel modüllerden ve sınır koşullarından oluşmaktadır. Buna göre, bu modellerin teorik alt yapısı kısaca özetlenmiştir:

Oluşturulan nümerik modeller, yer kabuğunu, izotropik bir elastik kütle olarak temsil etmektedir. İzotropik, doğrusal elastik malzemelerin ardındaki temel teori Hooke Kanunu'dur (Charco ve del Sastre, 2014; Hickey ve Gottsmann, 2014):

$$\sigma = E\varepsilon$$

Bu denklemde,  $\sigma$ , alan üzerine etki eden kuvvet yani gerilme (stress); E, Elastisite Modülü ve  $\varepsilon$ , gerilme etkisi altındaki nesnenin uzunluğundaki değişiklik yani birim deformasyon (strain)'dur (Browning, 2015). Burada gerilme (stress) ile birim deformasyon (strain) birbiriyle ilişkilidir (Hickey ve Gottsmann, 2014). Bu durum, volkanik modellerde etkin olan gerilmenin yüzeyde bir deformasyon oluşturacağı anlamına gelmektedir (Hickey ve Gottsmann, 2014).

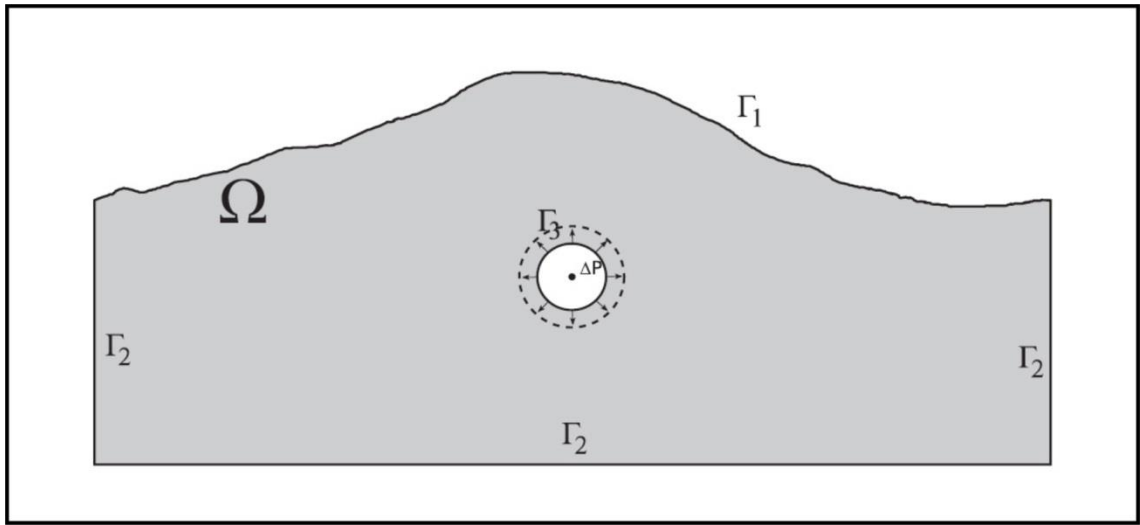
Nümerik modellerde oluşturulan sınır koşullarını, basınç değişikliği ve yer değiştirme miktarının etkilediği bilinmektedir (Browning, 2015). Modelin düzgün çalışabilmesi için uygun sınır koşulları gereklidir. Charco ve del Sastre (2014) oluşturdukları modelde ortamın ( $\Omega$ ) sınırını,  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$  ve  $\Gamma_3$  bölümlerine ayırmıştır (Şekil 2.25) ve sınır koşullarını aşağıdaki gibi belirtmiştir:

$$\sigma \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \Gamma_1 \text{'de}$$

$$\mathbf{u} = 0 \quad \Gamma_2 \text{'de}$$

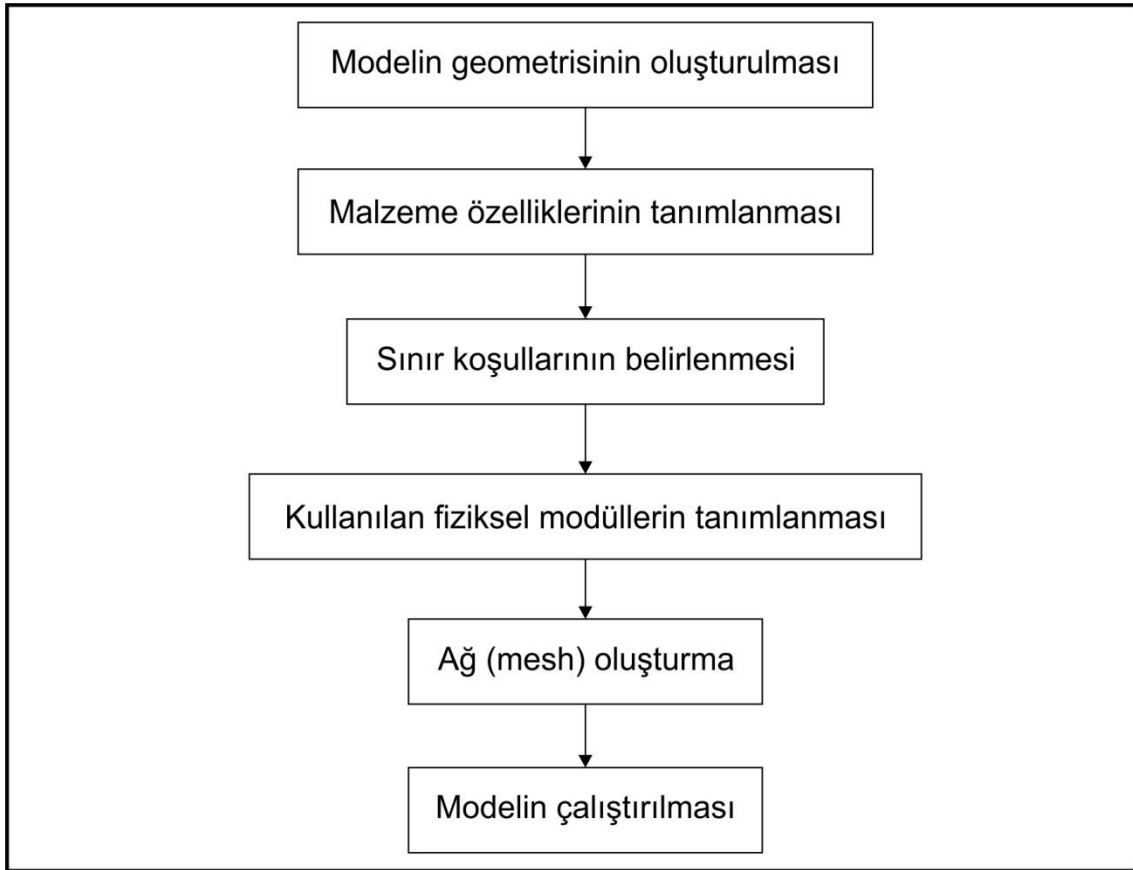
$$\sigma \cdot \mathbf{n} = -\Delta P \quad \Gamma_3 \text{'de}$$

Burada,  $\sigma$ , gerilme;  $\mathbf{u}$ , yer deşiştirme;  $\mathbf{n}$ , düzleme dik yöndeki vektör (düzlem normali);  $\Delta P$ , düşük basınç değeridir. Buna göre, magma odasını çevreleyen ortamın ( $\Omega$ ) herhangi bir yük etkisinde kalmadığı serbest yüzeyi ' $\Gamma_1$ 'dir. Ortamın ( $\Omega$ ) yer çekimi etkisine bağlı olarak düşey yöndeki hareketini önlemek için sabitlenmiş sınırı  $\Gamma_2$  ve yarıçapı  $a$  olan dairesel bir boşluğın duvarına normal olarak etkiyen basınç değişimine uygun sınır koşulu da  $\Gamma_3$  olarak tanımlanmıştır (Charco ve del Sastre, 2014). Böylece, volkanlardaki yüzey deformasyonunun, magma rezervuarlarının şişirilme/söndürölmesine bağlı olarak derindeki basınç değişimlerinden ( $\Delta P$ ) kaynaklanabileceği bilinmektedir (Charco ve del Sastre, 2014).



Şekil 2.25. İki boyutta oluşturan modelin kesit görüntüsü (Charco ve del Sastre (2014)'ten alınmıştır).

Bu çalışma kapsamında, magma odasının yanal genişleme hareketine bağlı olarak, yüzeyde oluşturduğu deformasyonu incelemek amacıyla nümerik modellemelere modelin geometrisi oluşturularak başlanmıştır. Magma odasını çevreleyen ortamı simüle eden iki boyutlu simetrik 80 km genişliğinde, 45 km yüksekliğinde dikdörtgen bir alan oluşturulmuştur. Farklı şekillerde topoğrafya ve magma odası şekil ve derinlikleri kullanılarak her bir model için aynı malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra modelin hareketini oluşturacak/hesaplayacak fiziksel modüller (Katı Mekanik ve Deforme Olmuş Geometri modülleri) ve sınır koşulları tanımlanmıştır. Sonraki aşamada ağ (mesh) oluşturularak modelin çalıştırılmasıyla, nümerik modelleme tamamlanmıştır (Şekil 2.26). Modellerin oluşum aşamaları ayrıntılarıyla sunulmuştur:



**Şekil 2.26.** Nümerik modellerin oluşum aşamalarını gösteren iş akış şeması.

Modellerde kullanılan, magma odasını çevreleyen sonsuz ortam ve magma odasını temsil eden malzemelerin fiziksel parametreleri literatürden yararlanılarak tanımlanmıştır ( r. Gudmundsson, 2007; Browning ve Gudmundsson, 2015). Magma odasını çevreleyen sonsuz ortam için Elastisite Modülü (Young's Modulus,  $E$ )  $40 \times 10^9$  Pa, Poisson Oranı (Poisson's Ratio,  $\nu$ ) 0,25, yoğunluk (density,  $\rho$ )  $2700 \text{ kg/m}^3$  iken, magma odası için Elastisite Modülü  $10 \times 10^8$  Pa, Poisson Oranı 0,25 ve yoğunluk  $2500 \text{ kg/m}^3$  olarak belirlenmiştir ( izelge 2.4).

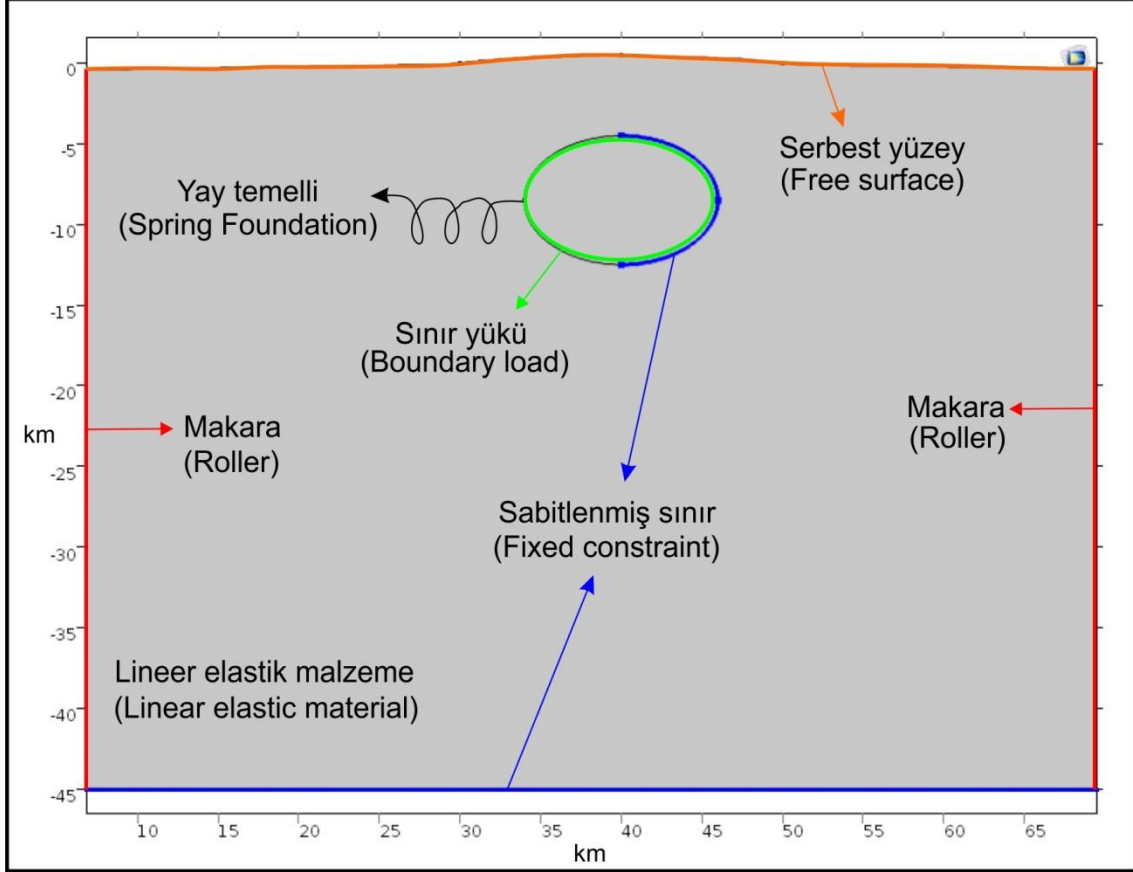
**Çizelge 2.4.** Modeller için tanımlanan malzeme özellikleri.

|                         |                      |                                    |
|-------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Kabuk                   |                      |                                    |
| Elastisite Modülü (E)   |                      | $40 \times 10^9$ Pa                |
| Poisson Oranı (v)       |                      | 0,25                               |
| Yoğunluk                |                      | $2700 \text{ kg/m}^3$              |
| Drucker-Prager          | Alfa katsayısı       | 1                                  |
|                         | k katsayısı          | 1 Pa                               |
| Mohr-Coulomb            | Kohezyon             | 300 Pa                             |
|                         | İçsel sürtünme açısı | 40 rad                             |
| Magma Odası             |                      |                                    |
| Elastisite modülü (E)   |                      | $10 \times 10^8$ Pa                |
| Poisson Oranı (v)       |                      | 0,25                               |
| Yoğunluk                |                      | $2500 \text{ kg/m}^3$              |
| Basınç (Pressure, p)    |                      | -5 MPa                             |
| Yay temelli             |                      | $x = 10 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ |
| (Spring Foundation, Fv) |                      | $y = 10 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ |

Malzeme özellikleri tanımlanan modelin, düzgün işleyebilmesi için uygun sınır koşulları tanımlanmalıdır (Şekil 2.27). Magma odasının yanal hareketinin yüzeyde oluşturacağı gerilme ve yer değiştirmesinin incelenmesi amacıyla magma odasını çevreleyen ortamın üst sınırı serbest yüzey (free) olarak belirlenmiştir. Yanal yer değiştirmeye bağlı olarak magma odasını çevreleyen ortamın hareket etmesini önlemek için alt kenarı sabitlemiş (fixed constraint) ve yan kenarları makara (roller) ile sınırlandırılmıştır. Magma odasının tek yönlü yanal uzanımının etkisini incelemek amacıyla yalnızca bir kenarı sabitlenmiştir.

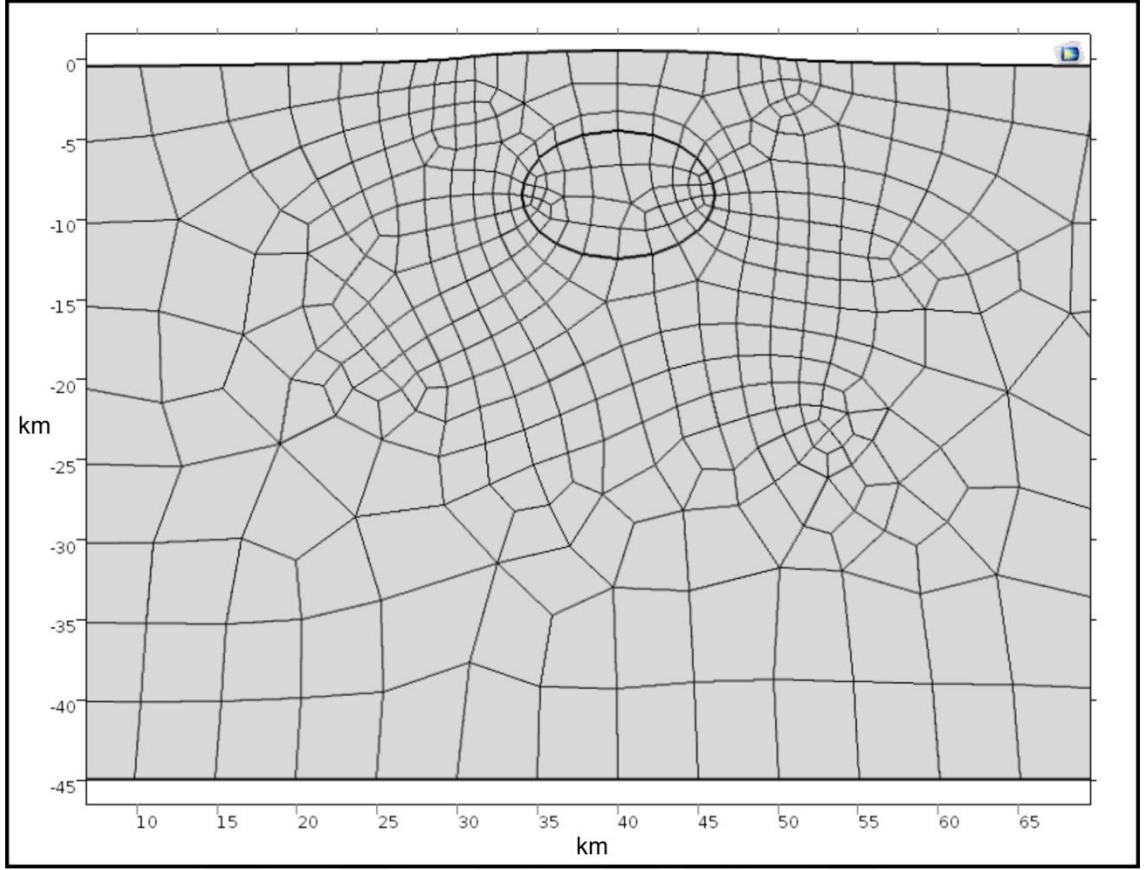
Sınır koşulları tanımlanan modelin çalışabilmesi için modelin hareketini oluşturacak fiziksel modüller tanımlanmalıdır. Katı Mekanik modülü olan yay temelli hareket (spring foundation) parametresi, magma odasının yanal genişlemesinin bir fonksiyonu olarak x ve y yönündeki kuvvetini belirtmek üzere  $10 \times 10^8 \text{ N/m}^3$  ve  $10 \times 10^6 \text{ N/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Magma odasının şişirilmesi, söndürülmesi veya yanal uzanımına bağlı olarak rezervuarın sınırına etki eden basıncın yüzeyde oluşturacağı deformasyonun etkisi, sınır yükü (boundary load) parametresi ile belirlenmektedir (Şekil 2.27). Buna göre, literatürden yararlanılarak magma odasındaki basınç değişimi -5 MPa olarak belirlenmiştir (Gudmundsson, 2007; Browning ve Gudmundsson, 2015). Diğer bir

fiziksel modül olan Deforme Olmuş Geometri modülü, tüm modeli kapsayan serbest deformasyon (free deformation) parametresi ile model üzerinde gözlemlenen deformasyonun belirlenmesi açısından önemlidir.



**Şekil 2.27.** Tez çalışması kapsamında oluşturulan iki boyutlu modellerin sınır koşulları.

Fiziksel parametreleri ve sınır koşulları tanımlanan modeller için bir sonraki adım, ağ (mesh) oluşturmaktır. COMSOL Multiphysics, ağ elemanları için çeşitli geometrik düzenlemeler sunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında dörtgen kafes kullanılmıştır (Şekil 2.28).



**Şekil 2.28.** Dörtgen kafes ağının iki boyutlu modelde gösterimi.

Son olarak, gerilme ve ortaya çıkan yer değiştirme dağılımını değerlendirmek için çeşitli grafik araçları kullanılmıştır. COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak elde edilen nümerik modelleme sonuçları yüzey yer değiştirmesi ve von Mises gerilimi olmak üzere zamana bağlı (0-10 saniye aralığında) grafikler oluşturularak sunulmuştur. Sonraki bölümlerde sunulmak üzere, yaklaşık 33 model oluşturulmuştur (EK-B, C, D, E). Bütün modellerde aynı parametreler kullanılmıştır ve tüm aşamalar tekrar edilmiştir.



### 3. BULGULAR

Çalışma kapsamında analog ve nümerik olmak üzere iki farklı modelleme türünden yararlanılmıştır. Analog modeller, kum havuzu modelleri ve sabitlenmiş kum havuzu modelleri olmak üzere iki farklı yöntemle gerçekleştirilmiştir. Model yüzeyleri, kesitleri ve 3B tomografi görüntüleri analiz edilmiştir. Nümerik modellemelerde ise sonlu elemanlar yöntemi ile çeşitli magma odası geometrileri ve topoğrafya kullanılmış, sonuçlar yer değiştirme ve stres için analiz edilmiştir. Elde edilen analog ve nümerik modeller Agisoft Photoscan, ArcGIS 10.2, CorelDraw X6, COMSOL Multiphysics, CTvox, MeshLab, Voxler, PIVLab (Matlab) lisanslı ve serbest kullanımlı yazılımlarıyla modellenmiş, analiz edilmiş ve görselleştirilmiştir. Çalışmanın içeriği ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur:

#### 3.1. Analog Modeller

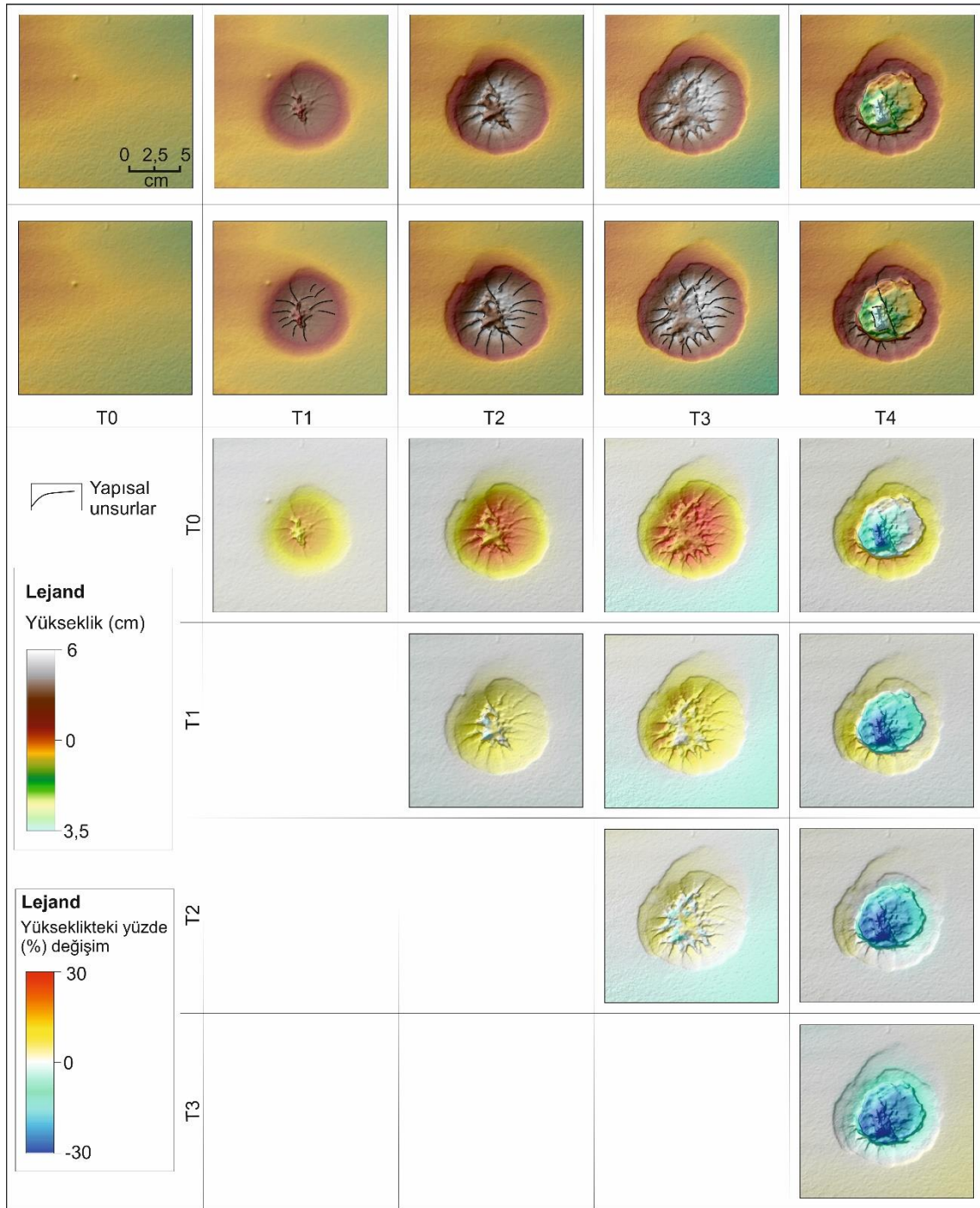
##### 3.1.1. Kum Havuzu Modelleri

Bölüm 2.1.1.'de ayrıntılı olarak anlatıldığı üzere analog modeller, kum havuzu modelleri ve sabitlenmiş kum havuzu modelleri tasarlanmış, gerçekleştirilmiş ve çeşitli yöntemlerle gözlemlenmiştir. HY-ÇBS yöntemi ile yüzey modellemesi yapılan deneylerin sayısal yükseklik modelleri ve gölgeli yüzey modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan sayısal yükseklik modelleri kullanılarak deneylerin her aşamasının (T0, T1, T2, T3, T4) birbirine göre yükseklikteki yüzde (%) değişimi hesaplanmış, bir yükseklikteki yüzde değişim matriksi oluşturulmuştur (Şekil 3.1). Modellenen 14 kaldera deneyinin her biri için tüm aşamaların matriksi oluşturulmuştur (EK-A).

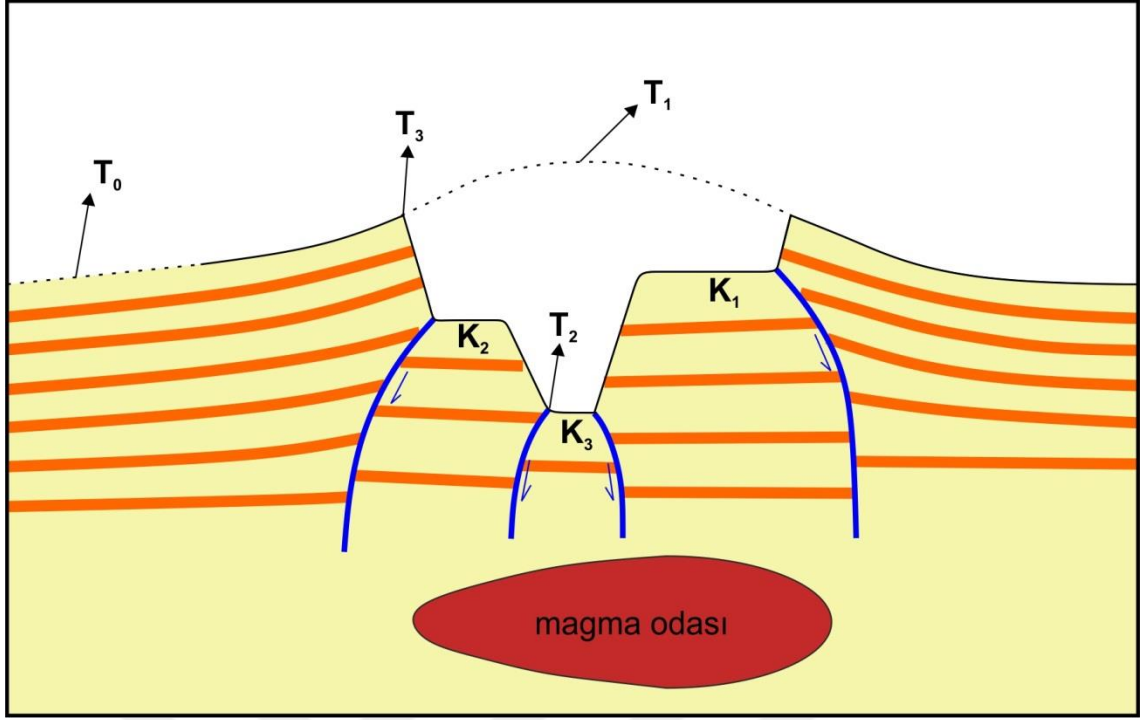
Kaldera modellerinde, kabarmanın (tumescence) ilk aşamalarında ışınsal fayların oluştuğu gözlenmektedir (Şekil 3.1: T1). Bu aşamada literatürdeki diğer çalışmalarda da gözlenen (ör., Komuro ve ark., 1984; Marti ve ark., 1994; Şekil 1.3a, 1.4a) zirve çöküntü alanının çekirdeği oluşmaya başlamıştır. İkinci aşamada ışınsal fayların olgunlaştığı ve genişlediği görülmektedir; bu aşamada zirvedeki çöküntü alanı da olgunlaşmıştır (Şekil 3.1: T2). Dikkat edilirse bu aşamada çöküntü alanının bir kenarının lineer bir yapısal sınırdan oluştuğu ve kabaran volkan konisini bir baştan bir başa katettiği görülebilir (Şekil 3.1: T2: BF). Zirvedeki çöküntü alanı neredeyse bir tarafı düz bir lens şeklini almıştır (Şekil 3.1: T2). İlerleyen kabarma aşamasında zirve

çöküntü alanının bir tarafa doğru genişlediği gözlenmektedir, ışınsal çatlaklanma artmış, ışınsal çatlakların zirve çöküntü alana bakan kısmında tırnak yapıları oluşmuştur (Şekil 3.1: T3). Bu kabarma aşaması süresince magma odasını temsil eden su balonunun dikey genişlemeden daha yüksek miktarda bir yanal uzanımı olduğunu hatırlamak gerekir (Şekil 2.4). Magma odasının dikey ekseninden daha fazla miktardaki yanal eksenindeki hareketi sonucu, üstündeki kaldera bloğunun bir parçasının magma odasının yanal genişlemesi istikametinde hareket ettiği deneyler esnasında gözlenmiştir. Modellerin mercek şekilli zirve çöküntüsünün genişlemesinin nedeni budur. Son aşama kaldera çökmesini temsil etmektedir (Şekil 3.1: T4); kalderanın parçalı çöktüğü, halka şekilli kaldera sınır fayının oluştuğu ve ışınsal fayların arta kalanlarının topoğrafik kaldera sınırı dışında görülmeye devam ettiği gözlenmiştir.

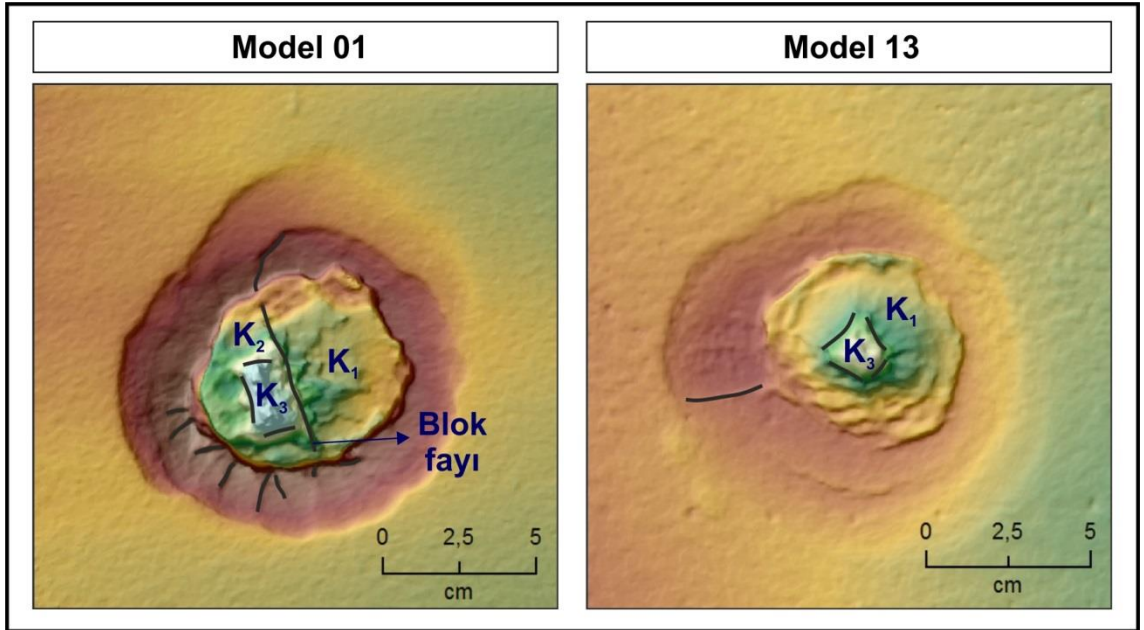
Oluşan parçalı kalderanın çöken plakalarında bir takım belirgin yapısal özellikler ortaya çıkmaktadır. Çökme aşamasında modellerin bir kısmında kalderanın ortasından geçen doğrusal bir yapısal sınır (blok fayı) ortaya çıkmıştır. Bu blok fayının, kaldera tabanını iki farklı deformasyon alanına ayırdığı ve fayın bir tarafında kalan çöken bloğun diğer tarafında kalan bloğa göre daha yüksekte kaldığı gözlenmiştir (Şekil 3.1: T4). Blok fay, kabarmanın ilk evrelerinde yapıyı boydan boya kesen magma odasının yanal hareketi ile belirginleşen bir yapısal unsurdur (Şekil 3.1: T2) ve çökme evresinde de parçalı çöken iki bloğu birbirinden net olarak ayırmaktadır. Bazı modellerde altta kalan blok kendi içinde küçük bir çöküntü alanı içermektedir. Böylece, bu türde çöken kaldera modellerinin tabanı iki ana (üstteki  $K_1$  ve alttaki  $K_2$ ) plaka ve alttaki ana plakanın ( $K_2$ ) içinde üçüncü bir iç plakacık ( $K_3$ ), olmak üzere üç parçadan oluşmaktadır (Şekil 3.2). Bazı kaldera modellerinin ise blok fayı içermediği, yalnızca yüksekte kalan blok ile bu blok içinde küçük bir çöküntü alanı içerdiği gözlenmiştir. Bununla birlikte bu türde çöken kaldera modellerinin tabanı, alt ( $K_3$ ) ve üst ( $K_1$ ) olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Böylece iki farklı türde çöken parçalı kaldera modelleri incelenmiştir (Şekil 3.3), bu çökme modellerinin daireselliği ve çökme miktarları hesaplanmıştır. Model 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11 blok fayı içeren ve kaldera tabanının iki ana plaka ve alt blok içinde küçük bir çöküntü parçacık ile oluştuğu kaldera türüne örnektir (Şekil 3.3: Model 01). Model 12, 13, 14 ise blok fayı içermeyen ve kaldera tabanının iç-içe (nested) iki parçadan oluştuğu kaldera türüne örnek verilebilir.



**Şekil 3.1.** Model 01'in sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.



**Şekil 3.2.** Kalderaların çökme miktarının şematik gösterimi ( $K_1$  üst plakanın,  $K_2$  orta plakanın ve  $K_3$  alt plakanın ortalama yüksekliğini belirtirken;  $T_0$  referans aşamasının ortalama yüksekliğini,  $T_1$  volkan domunun (tumescene) en yüksek noktasını,  $T_2$  çökmenin maksimum olduğu noktayı ve  $T_3$  kaldera sınırının maksimum yüksekliğini belirtmektedir).

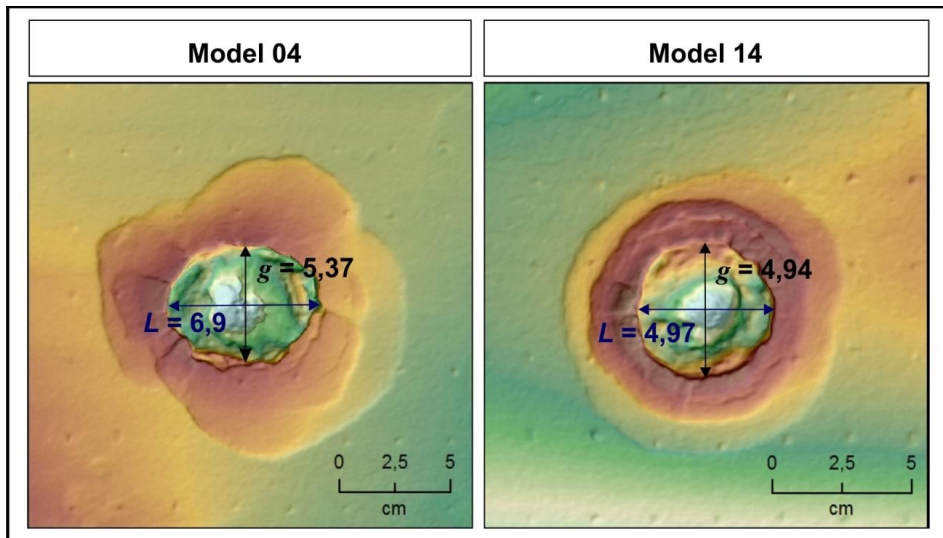


**Şekil 3.3.** Blok fayı içeren (Model 01) ve içermeyen (Model 13) kaldera modellerini gösteren şekil.



Devam eden analizler bu iki tip parçalı çökmeyi açıklamaya yöneliktir. Kaldera modellerinin ovalliğini sayısal veriye dönüştürmek için aspekt oranı hesaplanmıştır. Oluşturulan kaldera modellerinin uzunluk ( $L$ ) ve genişlikleri ( $g$ ) ölçülerek (Şekil 3.4), uzunluk/genişlik ( $L/g$ ) oranları bulunmuştur (Çizelge 3.1). Böylece, kaldera modelleri ovalliklerine göre sınıflandırılmıştır. Uzunluk/genişlik ( $L/g$ ) oranları 1,00 ile 1,05 arasında olanlar dairesel, 1,05 ile 1,10 arasında olanlar yarı eliptik ve 1,10'dan büyük olanlar ise eliptik şekilli kaldera olarak tespit edilmiştir (Şekil 3.4). Buna göre, Model 11 ve 14 dairesel, Model 01, 10, 12, 13 yarı eliptik ve Model 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09 ise eliptik şekilli kalderalardır. Çökme dairesele doğru gittikçe huni tipine benzer çökme gözlenmeye başlamış,  $K_3$  bloğu çöken yapının orta kısmına denk gelmiştir. Çökme eliptik şekle doğru gittikçe iki ana bloktan oluşan parçalı bir çökme gözlendiği ve  $K_3$  bloğunun daha aşağı çöken  $K_2$  bloğu içinde kaldığı gözlenmiştir.

Oluşturulan modellerin topoğrafik çökme miktarını belirlemek için  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  ve  $T_3$  yükseklik değerleri baz yükseklikler olarak kullanılmıştır (Şekil 3.2).  $T_0$ , referans aşamasının ortalama yüksekliğini, yani volkanın temel topoğrafya yüksekliğini,  $T_1$ , volkan domunun (kabarmasının) en yüksek noktasını,  $T_2$ , çökmenin maksimum olduğu noktayı ve  $T_3$  de topoğrafik kaldera sınırının maksimum yüksekliğini belirtmektedir (Şekil 3.2). Böylece, ( $T_1-T_2$ ) değerleri ile maksimum çökme miktarı ve ( $T_3-T_2$ ) değerleri ile topoğrafik kaldera sınırından itibaren maksimum çökme miktarı hesaplanmıştır (Çizelge 3.2).



Şekil 3.4. Model 04 (eliptik) ve Model 14 (dairese)l'ün uzunluk/genişlik ( $L/g$ ) oranlarını gösteren şekil.

**Çizelge 3.1.** Kaldera modellerinin uzunluk/genişlik ( $L/g$ ) oranlarını gösteren çizelge.

| Model    | Genişlik<br>$g$ (cm) | Uzunluk<br>$L$ (cm) | Uzunluk/Genişlik<br>$L/g$ |
|----------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Model 01 | 6,45                 | 7,04                | 1,091                     |
| Model 02 | 5,42                 | 6,44                | 1,188                     |
| Model 03 | 5,58                 | 6,29                | 1,127                     |
| Model 04 | 5,37                 | 6,9                 | 1,284                     |
| Model 05 | 5,63                 | 6,32                | 1,122                     |
| Model 06 | 5,39                 | 6,16                | 1,142                     |
| Model 07 | 5,74                 | 6,74                | 1,174                     |
| Model 08 | 5,74                 | 6,71                | 1,168                     |
| Model 09 | 5,39                 | 6,48                | 1,202                     |
| Model 10 | 5,83                 | 6,34                | 1,087                     |
| Model 11 | 6,03                 | 6,27                | 1,039                     |
| Model 12 | 6,35                 | 6,95                | 1,094                     |
| Model 13 | 5,58                 | 5,97                | 1,069                     |
| Model 14 | 4,94                 | 4,97                | 1,006                     |

**Çizelge 3.2.** Kaldera modellerinin topoğrafik çökme miktarlarını gösteren çizelge.

| Model    | $T_0$ (cm) | $T_1$ (cm) | $T_2$ (cm) | $T_3$ (cm) | $T_1-T_2$ (cm) | $T_3-T_2$ (cm) |
|----------|------------|------------|------------|------------|----------------|----------------|
| Model 01 | 4,527      | 5,997      | 3,029      | 5,47       | 2,968          | 2,441          |
| Model 02 | 4,724      | 6,904      | 3,727      | 5,958      | 3,177          | 2,231          |
| Model 03 | 5,414      | 7,094      | 3,922      | 6,142      | 3,172          | 2,22           |
| Model 04 | 5,155      | 6,712      | 3,578      | 5,866      | 3,134          | 2,288          |
| Model 05 | 4,883      | 6,774      | 3,41       | 5,884      | 3,364          | 2,474          |
| Model 06 | 4,799      | 6,677      | 3,535      | 5,572      | 3,142          | 2,037          |
| Model 07 | 4,297      | 5,795      | 3,154      | 5,065      | 2,641          | 1,911          |
| Model 08 | 4,903      | 6,563      | 3,742      | 5,614      | 2,821          | 1,872          |
| Model 09 | 4,823      | 6,217      | 3,661      | 5,383      | 2,556          | 1,722          |
| Model 10 | 4,752      | 6,598      | 3,394      | 5,432      | 3,204          | 2,038          |
| Model 11 | 4,433      | 6,326      | 3,106      | 5,167      | 3,22           | 2,061          |
| Model 12 | 4,549      | 6,157      | 3,329      | 5,259      | 2,828          | 1,93           |
| Model 13 | 5,142      | 6,79       | 3,908      | 5,744      | 2,882          | 1,836          |
| Model 14 | 7,652      | 9,448      | 6,638      | 8,438      | 2,81           | 1,8            |

Plakaların çökme yüksekliklerine dair hesaplamalara devam etmek için  $K_1$ ,  $K_2$  ve  $K_3$  plakalarının ortalama yükseklikleri (Şekil 3.2 ve 3.3) sayısal yükseklik modellerinden hesaplanmıştır (Çizelge 3.2). Buna göre, ( $T_3-K_1$ ) üst plakanın maksimum topoğrafik

çökme yüksekliğini, ( $T_3-K_2$ ) orta plakanın ve ( $T_3-K_3$ ) alt plakanın maksimum topoğrafik çökme yüksekliğini belirten parametreler olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3.4).

**Çizelge 3.3.** Kaldera modellerinin plakalarının çökme miktarları gösteren çizelge.  $K_1$ ,  $K_2$  ve  $K_3$  çöken plakaların ortalama yüksekliğini ifade ediyor (Şekil 3.2).

| Model    | $K_1$ (cm) | $K_2$ (cm) | $K_3$ (cm) | $K_1-K_2$ (cm) | $K_1-K_3$ (cm) |
|----------|------------|------------|------------|----------------|----------------|
| Model 01 | 4,483      | 4,194      | 3,536      | 0,289          | 0,947          |
| Model 02 | 5,007      | 4,999      | 4,223      | 0,008          | 0,784          |
| Model 03 | 5,152      | 5,135      | 4,305      | 0,017          | 0,847          |
| Model 04 | 4,986      | 4,889      | 4,071      | 0,097          | 0,915          |
| Model 05 | 4,744      | 4,634      | 3,904      | 0,11           | 0,84           |
| Model 06 | 4,644      | 4,566      | 3,893      | 0,078          | 0,751          |
| Model 07 | 4,284      | 4,128      | 3,45       | 0,156          | 0,834          |
| Model 08 | 4,764      | 4,637      | 4,013      | 0,127          | 0,751          |
| Model 09 | 4,778      | 4,716      | 4,089      | 0,062          | 0,689          |
| Model 10 | 4,611      | 4,517      | 3,804      | 0,094          | 0,807          |
| Model 11 | 4,309      | 4,264      | 3,465      | 0,045          | 0,844          |
| Model 12 | 4,495      | -          | 3,647      | -              | 0,848          |
| Model 13 | 5,073      | -          | 4,292      | -              | 0,781          |
| Model 14 | 7,727      | -          | 7,002      | -              | 0,725          |

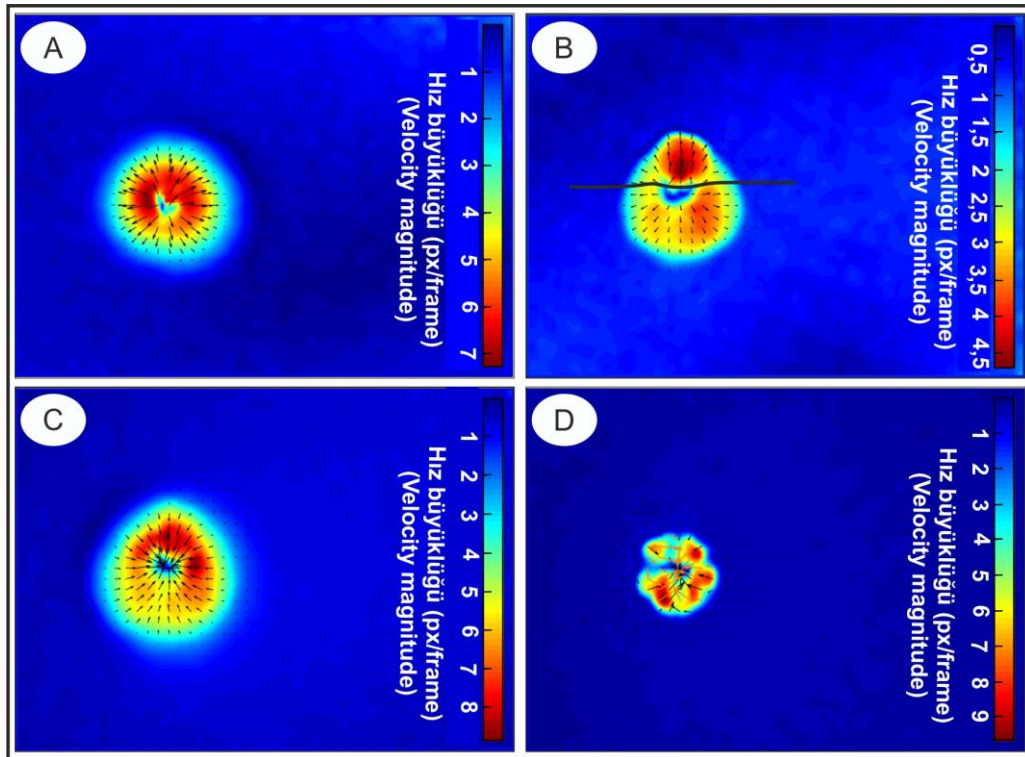
**Çizelge 3.4.** Plakaların maksimum topoğrafik çökme yüksekliklerini gösteren çizelge.

| Model | $K_1$ (cm) | $K_2$ (cm) | $K_3$ (cm) | $T_3$ (cm) | $T_3-K_1$ (cm) | $T_3-K_2$ (cm) | $T_3-K_3$ (cm) |
|-------|------------|------------|------------|------------|----------------|----------------|----------------|
| 01    | 4,483      | 4,194      | 3,536      | 5,47       | 0,987          | 1,276          | 1,934          |
| 02    | 5,007      | 4,999      | 4,223      | 5,958      | 0,951          | 0,959          | 1,735          |
| 03    | 5,152      | 5,135      | 4,305      | 6,142      | 0,99           | 1,007          | 1,837          |
| 04    | 4,986      | 4,889      | 4,071      | 5,866      | 0,88           | 0,977          | 1,795          |
| 05    | 4,744      | 4,634      | 3,904      | 5,884      | 1,14           | 1,25           | 1,98           |
| 06    | 4,644      | 4,566      | 3,893      | 5,572      | 0,928          | 1,006          | 1,679          |
| 07    | 4,284      | 4,128      | 3,45       | 5,065      | 0,781          | 0,937          | 1,615          |
| 08    | 4,764      | 4,637      | 4,013      | 5,614      | 0,85           | 0,977          | 1,601          |
| 09    | 4,778      | 4,716      | 4,089      | 5,383      | 0,605          | 0,667          | 1,294          |
| 10    | 4,611      | 4,517      | 3,804      | 5,432      | 0,821          | 0,915          | 1,628          |
| 11    | 4,309      | 4,264      | 3,465      | 5,167      | 0,858          | 0,903          | 1,702          |
| 12    | 4,495      | -          | 3,647      | 5,259      | 0,764          | -              | 1,612          |
| 13    | 5,073      | -          | 4,292      | 5,744      | 0,671          | -              | 1,452          |
| 14    | 7,727      | -          | 7,002      | 8,438      | 0,711          | -              | 1,436          |

Analog kaldera modellerinden Model 12'nin deney esnasında nadir bakış açısıyla çekilen fotoğrafları, sayısal parçacık takip (PT) algoritmasıyla deformasyonun yüzeyde nasıl geliştiğini gözlemek için incelenmiştir. Bölüm 2.1.1.3'te detayları verilen PT



yöntemiyle deneyin T1, T2, T3 ve T4 aşamalarındaki vektörel yer değiştirmeleri ve yer değişimi hızları incelenmiştir. Deney esnasında nadir bakış açısıyla çekilen 56 adet görüntü PT için kullanılmıştır. Her görüntü yüzeyi kendinden 0,5 saniye önceki yüzey ile karşılaştırılmıştır. A - D aşamaları için PT sonuçları **Şekil 3.5**'te sunulmuştur. Magma odasının şişmeye başlaması ve dolayısıyla kabarmanın başlaması aşamasında vektörel hareketin ışınsal olduğu, magma odasının yanal hareketi ile birlikte de bu ışınsal vektörlerin bir istikamette daha büyük değer aldığı (**Şekil 3.5: A**; yukarı istikamette yoğunlaşan ışınsal hareket) görülmektedir. Henüz bu aşamada dahi kabaran koninin zirve bölgesindeki küçük çukurluğun oluşmaya başladığı görülmektedir (**Şekil 3.5**); kabaran volkan konisinin merkezindeki mavi renkle yoğunlaşan alan aşağı yönlü vektörel hareket nedeniyle mavi görünmektedir. Magma odasının yanal hareketinin artması B aşamasında iyice belirgin hale gelmiş (**Şekil 3.5: B**), böylece yüzeyde iki farklı deformasyon alanının oluştuğu gözlenmiştir. **Şekil 3.5**'te bu deformasyon alanları yapısal bir sınırla ayrılarak gösterilmiştir. Zirve bölgesindeki ilksel küçük çökme, bu aşamada daha da belirginleşmiş, volkanı boydan boya kateden yapısal sınırla birleşmiştir. **Şekil 3.5**'teki C ve D aşamaları, vektörel hareketten de anlaşılacağı üzere kaldera çökme sürecinin başlangıç ve son evrelerini göstermektedir.



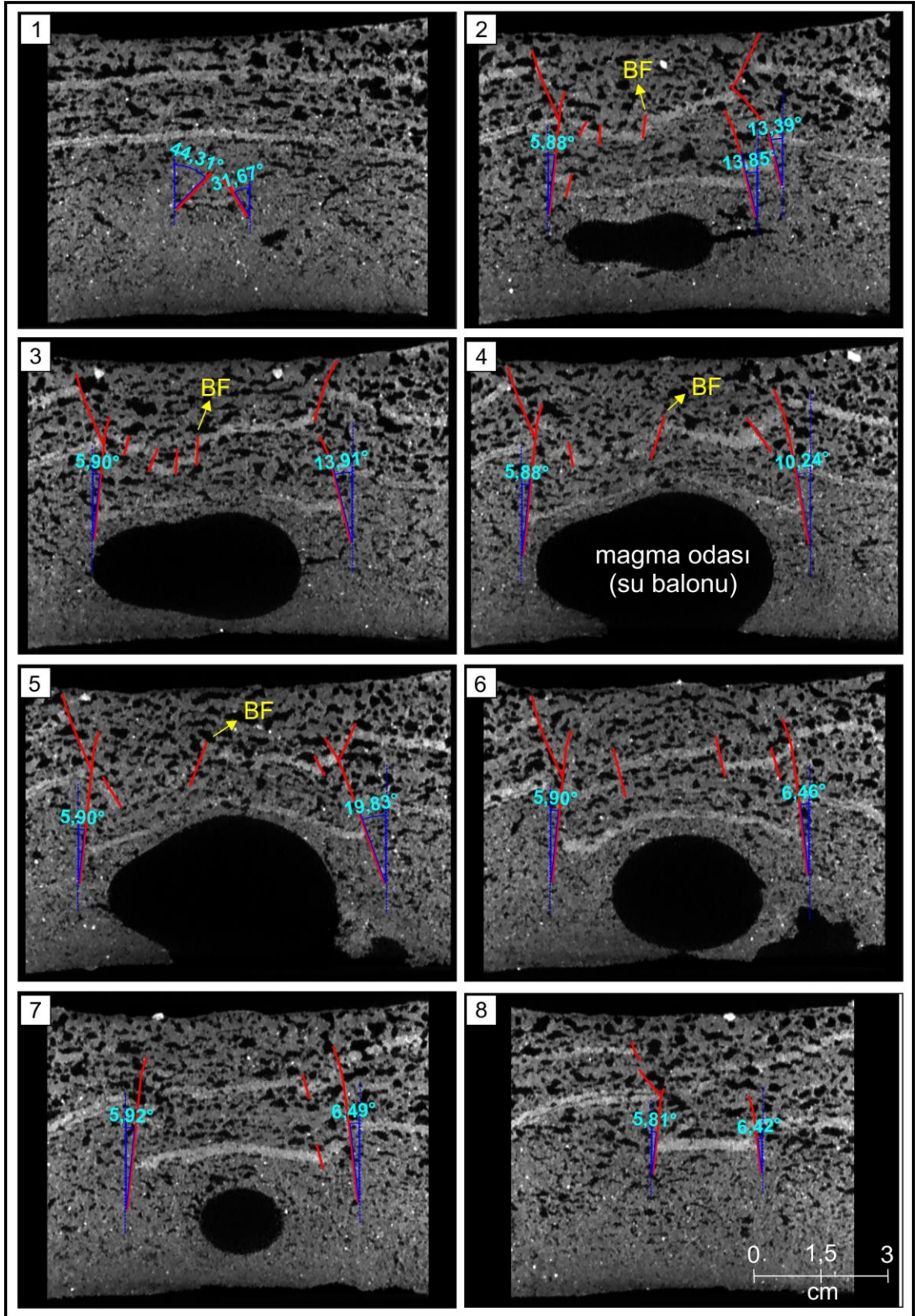
**Şekil 3.5.** Model 12'nin sayısal parçacık takip algoritmasıyla analiz edilmesi sonucunda gözlenen yüzey deformasyonunu gösteren şekil.

### 3.1.2. Sabitlenmiş Kum Havuzu Modelleri

Sabitlenmiş kum havuzu modellerini oluşturma tekniği Bölüm 2.1.2’de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Modeller iki farklı şekilde incelenmiştir. İlk olarak modeller deforme edilmeden iç-yapısal unsurlarını incelemek amacıyla, Micro-CT ile elde edilen görüntülerden 3B model oluşturulmuştur. Modelin X-ışını Micro-CT taramaları sonucu elde edilen kesit görüntüleri üzerine yapısal unsurlar çizilerek işlenmiştir. Bu yapısal unsurlar içe doğru (kaldera içine doğru) dalımlı normal ve dışa doğru dalımlı ters sınır faylarından oluşmaktadır. Kaldera çökmesinde gözlenen, Bölüm 1.1.1’de de anlatılan, kaldera çöküntüsünü çevreleyen dairesel ana yapısal unsur olan kaldera sınır fayı bu fay sistemidir. Dışa doğru dalımlı ters atımlı sınır faylarının açıları  $5,81^{\circ}$  ile  $44,31^{\circ}$  arasında değişmektedir (Şekil 3.6).

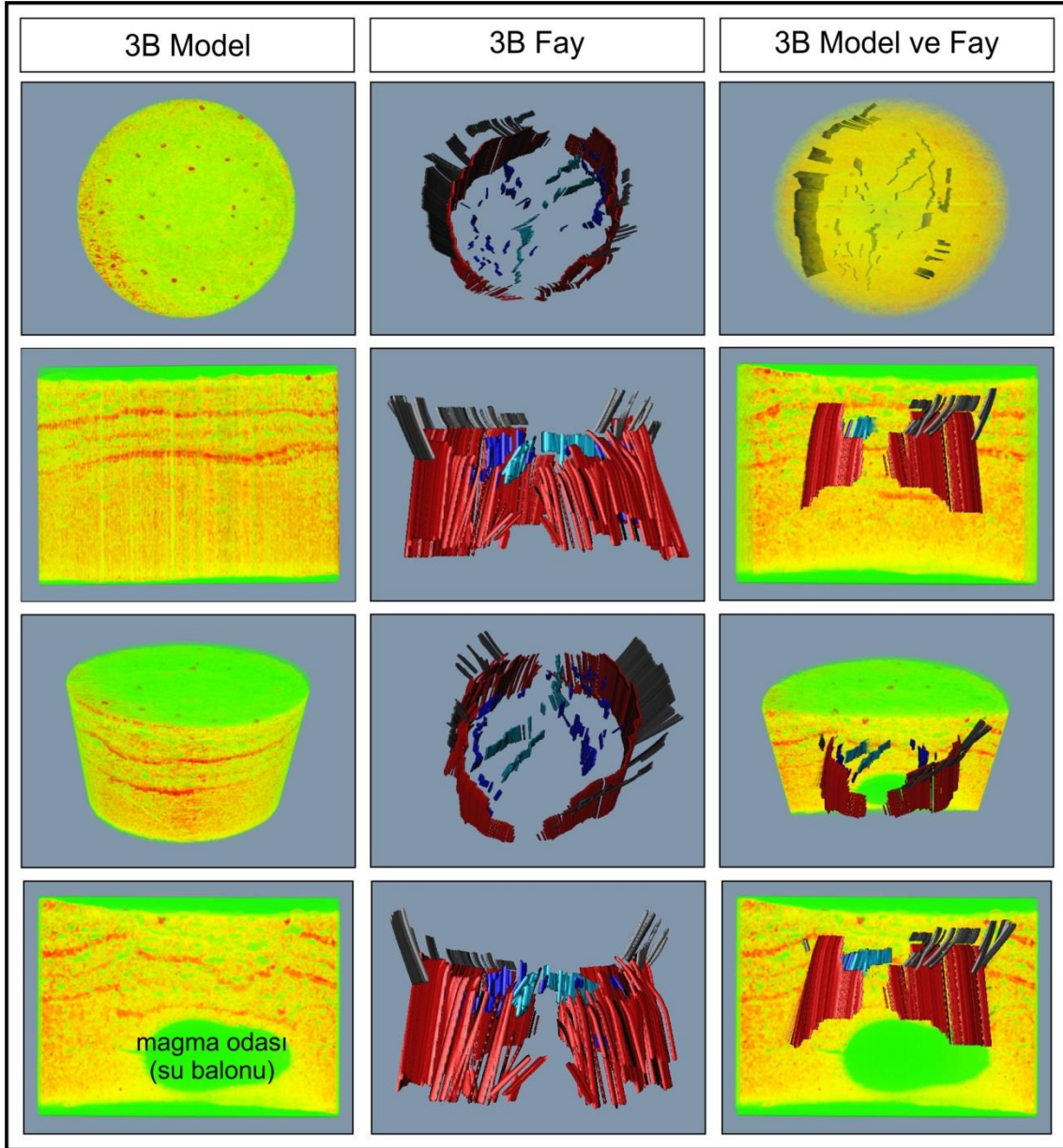
Kesit görüntüleri üzerine çizilen yapısal unsurlar ve X-ışını Micro-CT taraması sonucu elde edilen kesit görüntülerinin 3B enterpolasyonu ile 3B hacimsel model oluşturulmuştur (Şekil 3.7). Bu 3B hacimsel gösterimde yapısal unsurlar 4 farklı renkte (kırmızı, açık mavi, lacivert ve gri) gruplandırılmıştır. İçe doğru dalımlı normal atımlı sınır fayları gri, dışa doğru dalımlı ters atımlı sınır fayları kırmızı, kaldera blok fayı açık mavi ve çöken ana blokları küçük parçalara ayıran faylar da lacivert renkler ile gösterilmiştir (Şekil 3.7). Böylece, hem fay gruplarının hem de Micro-CT tarama görüntülerinin üç boyutlu modeli oluşturulmuş, görsel olarak incelenmiştir.

Dışa doğru dalımlı ters fayların magma odasının genişleme yönüne dik kesitlerindeki dalım açılarının (ör.,  $5,47^{\circ}$  -  $3,14^{\circ}$ ), magma odasının genişleme yönüne paralel kesitlerindeki açılara (ör.,  $10,26^{\circ}$  -  $5,81^{\circ}$ ) göre daha dike yakın olduğu saptanmıştır (Şekil 3.8). Ayrıca, oluşturulan üç boyutlu modelde de önceki kaldera modellerinde gözlenen blok fayın çökme bloğunu iki parçaya ayırdığı görülmektedir (Şekil 3.6; Şekil 3.7: açık mavi ile gösterilen fay).

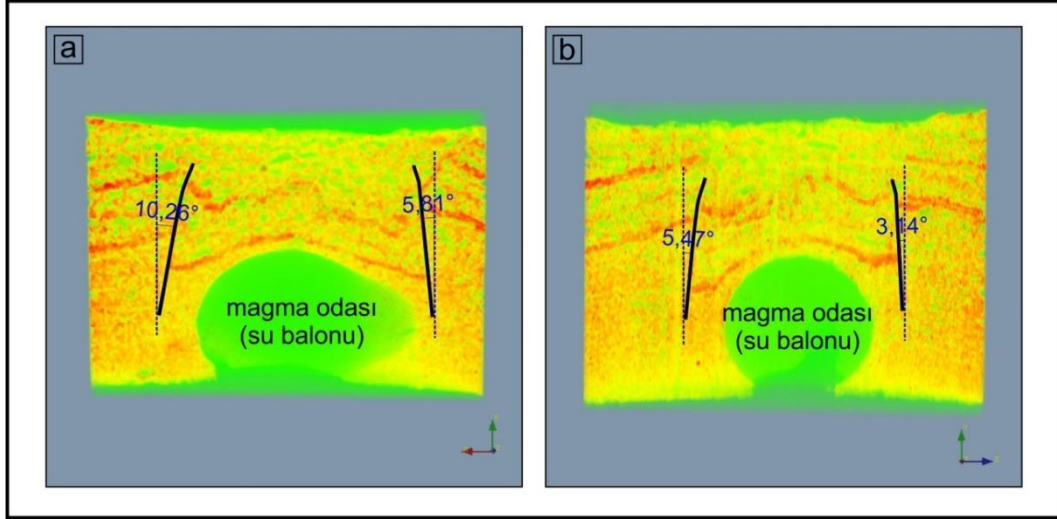


Şekil 3.6. Kesit fotoğrafı üzerinde dışa doğru dalımlı sınır faylarının açılarının aşamalı olarak gösterimi (BF: blok fayı).



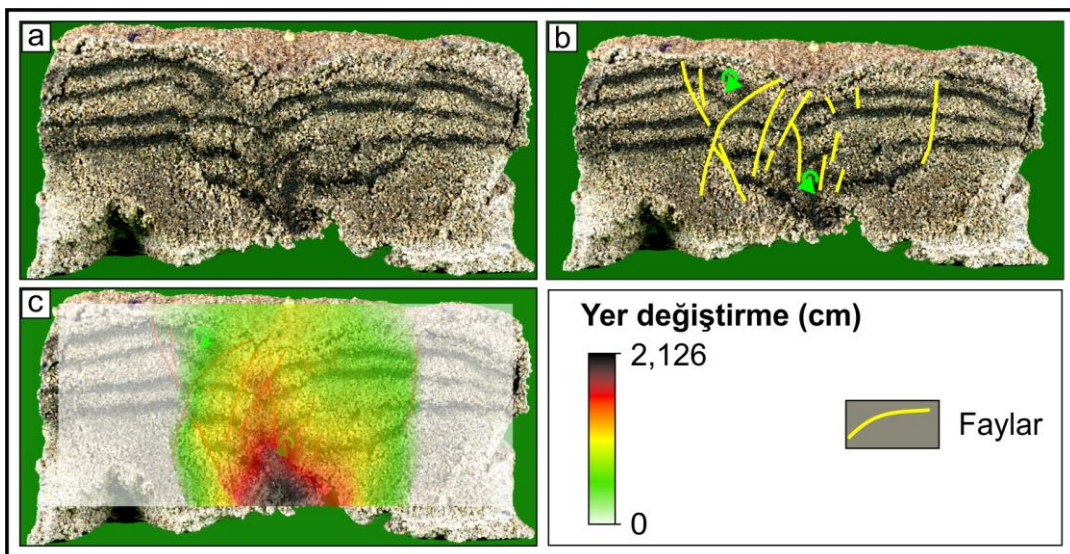


Şekil 3.7. Sabitlenmiş kum havuzu modeli ve fayların üç boyutlu gösterimi.



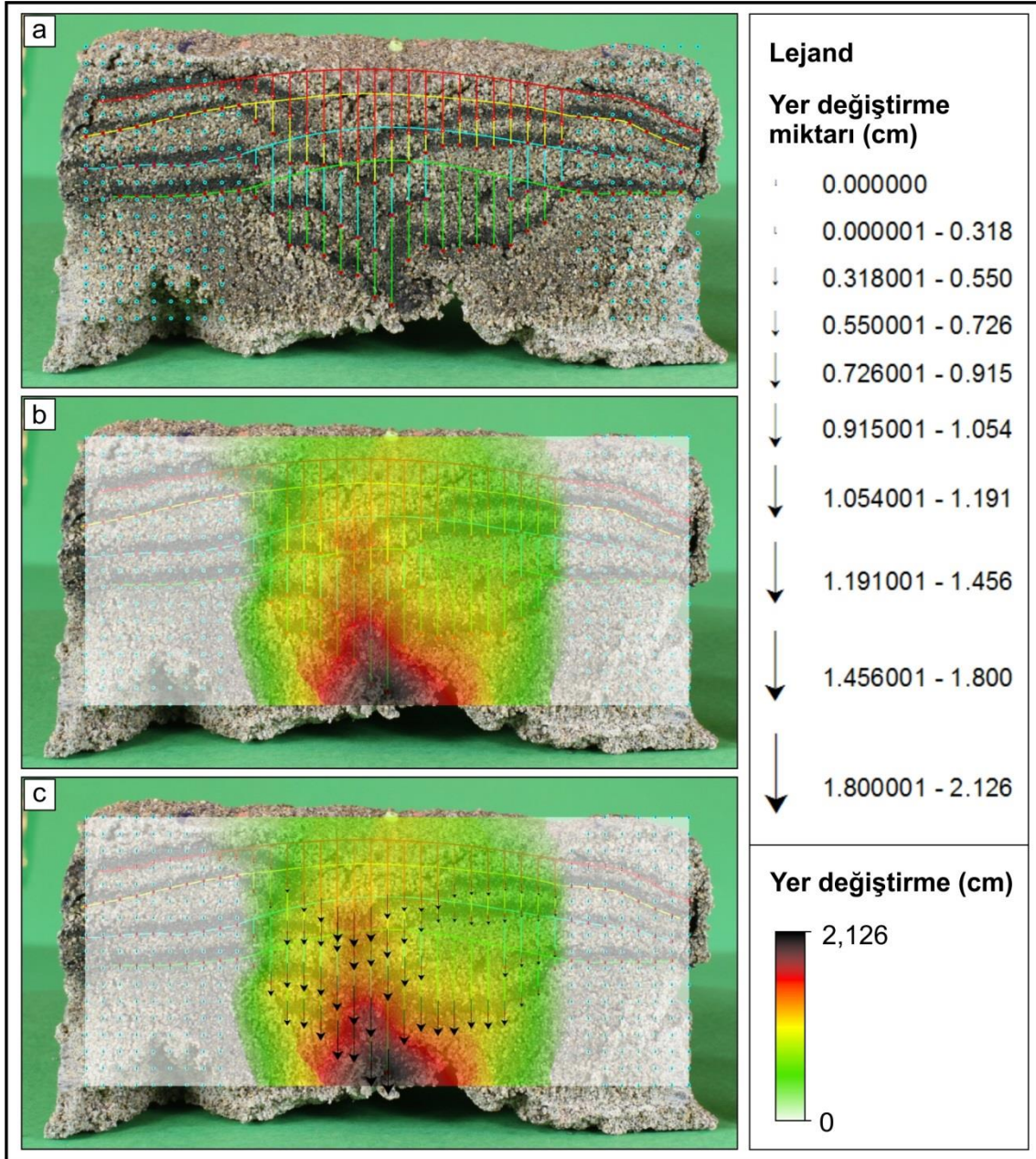
**Şekil 3.8.** Dışa doğru dalımlı ters fayların **(a)** magma odasına paralel kesitte (z eksenine boyunca) alınan görüntüsü üzerinde açılarının gösterimi, **(b)** magma odasına dik kesitte (x eksenine boyunca) alınan görüntüsü üzerinde açılarının gösterimi.

Deforme edilmeden tomografi ile incelenen örneklerden bir tanesi tomografi çekiminden sonra magma odası genişleme yönüne paralel olarak fiziksel olarak kesilmiş ve fotoğraflanarak sayısal ortamda analiz edilmiştir (Şekil 3.9). Modelin kesit görüntüleri kullanılarak kaldera çökmesi öncesini temsil eden, piroksenlerle belirgin tabakaların çökme öncesi eğimleri kullanılarak kaldera çökmesi ile oluşan çökme miktarı vektörel olarak ölçülmüş ve enterpole edilmiştir; kesit üzerinde faylar ve çökme ile oluşan hareket incelenmiştir (Şekil 3.9 ve 3.10).



**Şekil 3.9.** Sabitlenmiş modelin; **(a)** kesit görüntüsü, **(b)** kesit görüntüsü üzerinde belirtilen yapısal unsurlar, **(c)** yer değiştirme miktarı.





**şekil 3.10.** Model üzerinde gözlenen; **(a)** kaldera oluşumundan önceki tabaka düzlemlerinin durumunun farklı renklerle (kırmızı, sarı, mavi, yeşil) gösterimi, **(b)** yer değiştirme miktarını gösteren şekil, **(c)** yer değiştirme vektörlerini gösteren şekil.

Kaldera oluşumundan önceki durum, kaldera dışındaki çökmeyen kısımdaki piroksen kumu ile belirgin tabaka düzlemlerine dayanarak çizilmiştir (**şekil 3.10a**). Farklı piroksen katmanları farklı renklerle (kırmızı, sarı, mavi, yeşil) ifade edilmektedir (**şekil 3.10a**). Böylece kaldera oluşumundan önceki ve sonraki tabakaların son hali karşılaştırılarak yer değiştirme miktarı belirlenebilecektir. Model, ArcGIS programında

sayısallaştırılmış ve yer değiştirme miktarı modellenmiştir. Modelleme sonucu hesaplanan yer değiştirme vektörleri ve enterpole görüntüsü [Şekil 3.10b](#) ve [c](#)'de sunulmuştur. Yer değiştirme miktarının en fazla magma odasına yakın derin, orta kesimde gerçekleştiği ve yaklaşık 2,126 cm olduğu görülmektedir. Yine, kalderanın iki farklı çökme deformasyonu gösterdiği, magma odasının genişlediği yönde kalan bloğun diğer bloğa göre daha fazla çöktüğü ve bu bloğun daha fazla deforme olduğu görülebilmektedir ([Şekil 3.10](#)).

### 3.2. Nümerik Modeller

Kaldera modellerinin gerçek boyutlar, parametreler ve fiziksel koşullar altında incelenmesi amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak nümerik modellemeler yapılmıştır. Modelleme için COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılmıştır. Nümerik modellerin iş akış aşamaları Bölüm 2.2'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Magma odasının şeklinin, derinliğinin ve topoğrafyanın çatı bloğunda oluşturduğu gerilme ve yatay yer değiştirme etkisini incelemek amacıyla 33 farklı model üretilmiştir ([EK-B, C, D, E](#)).

Oluşturulan nümerik modellerin işleyiş şekli bir model üzerinde basitçe anlatılacak olursa, modellemeye öncelikle magma odası ve onu çevreleyen bir topoğrafya oluşturularak başlanmıştır ([Şekil 3.11a](#)). Sonraki adımda magma odasının yanal genişlemesinin topoğrafya üzerinde yaptığı etkinin 0-10 saniye aralığındaki zamana bağlı değişimi incelenmiştir (Örnek modelde, [Şekil 3.11a](#), topoğrafyanın 0. saniyedeki durumunu gösterirken; [Şekil 3.11b](#), topoğrafyanın 10. saniyedeki durumunu göstermektedir). Modelin 0-10 saniye aralığındaki değişimi incelendiğinde, magma odasının yanal genişlemesine bağlı olarak çatı bloğunda meydana gelen yer değiştirmenin ve stresin topoğrafyada yatay yönde bir ilerleme ve buna bağlı olarak deformasyon oluşturduğu belirlenmiştir ([Şekil 3.11c, d](#)). Magma odasının derinliğine bağlı olarak, bulunduğu derinliğin üzerindeki her km'de bir gerilme ve yer değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Örnek modelde magma odasının tavanı 4 km derindedir; yüzeyden itibaren 3 km derinlikte alınan yatay profiller boyunca ([Şekil 3.11c, d](#)) yer değiştirme ve stres grafikleri [Şekil 3.11e](#) ve [3.11f](#)'de gösterilmiştir.

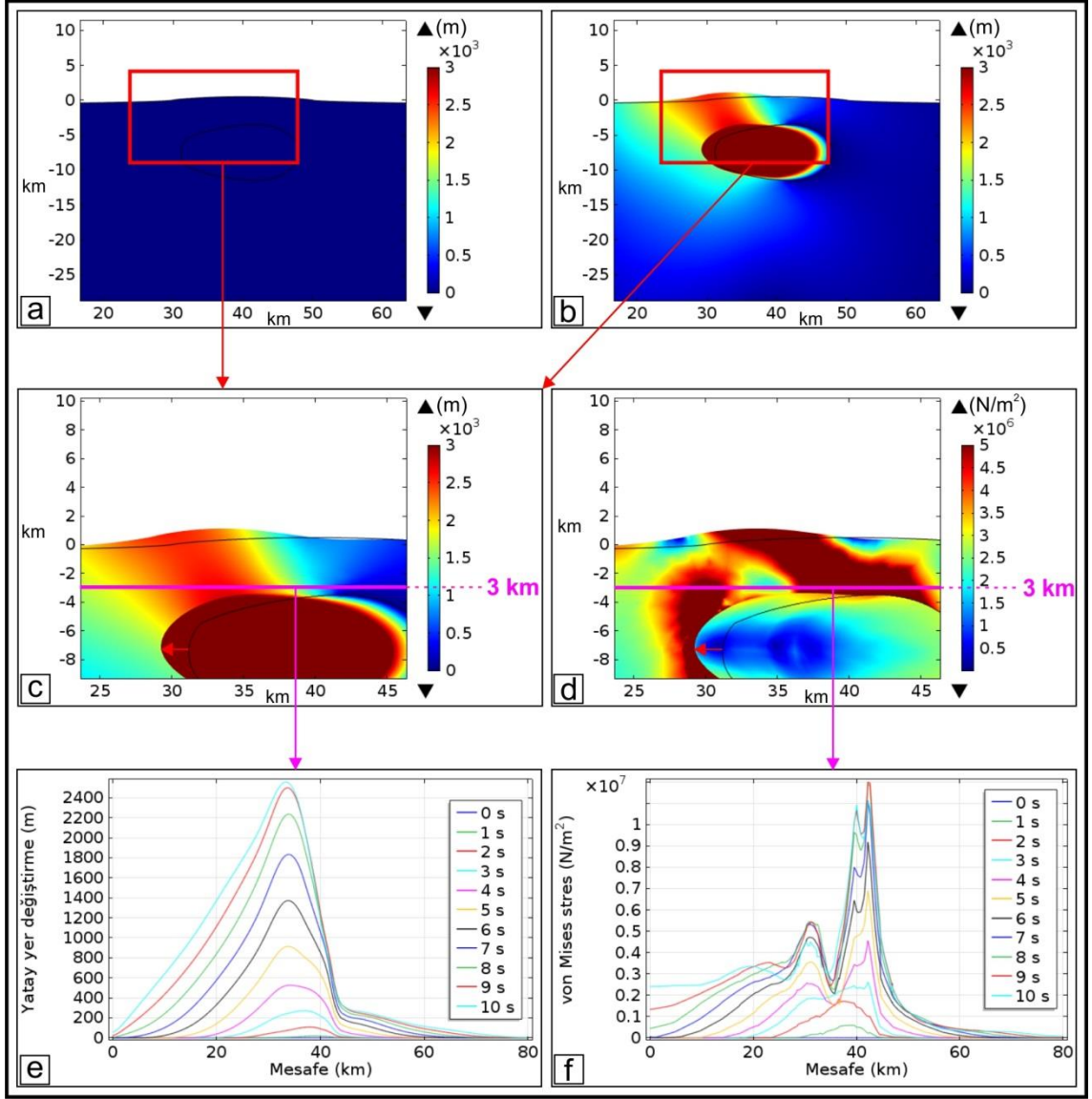
Nümerik modellerde, magma odası şeklinin etkisini incelemek amacıyla 7 farklı şekilde ve boyutta magma odası (dairesel, eliptik ve sil şekilli) oluşturulmuştur ([Şekil 3.12, 3.13](#)).



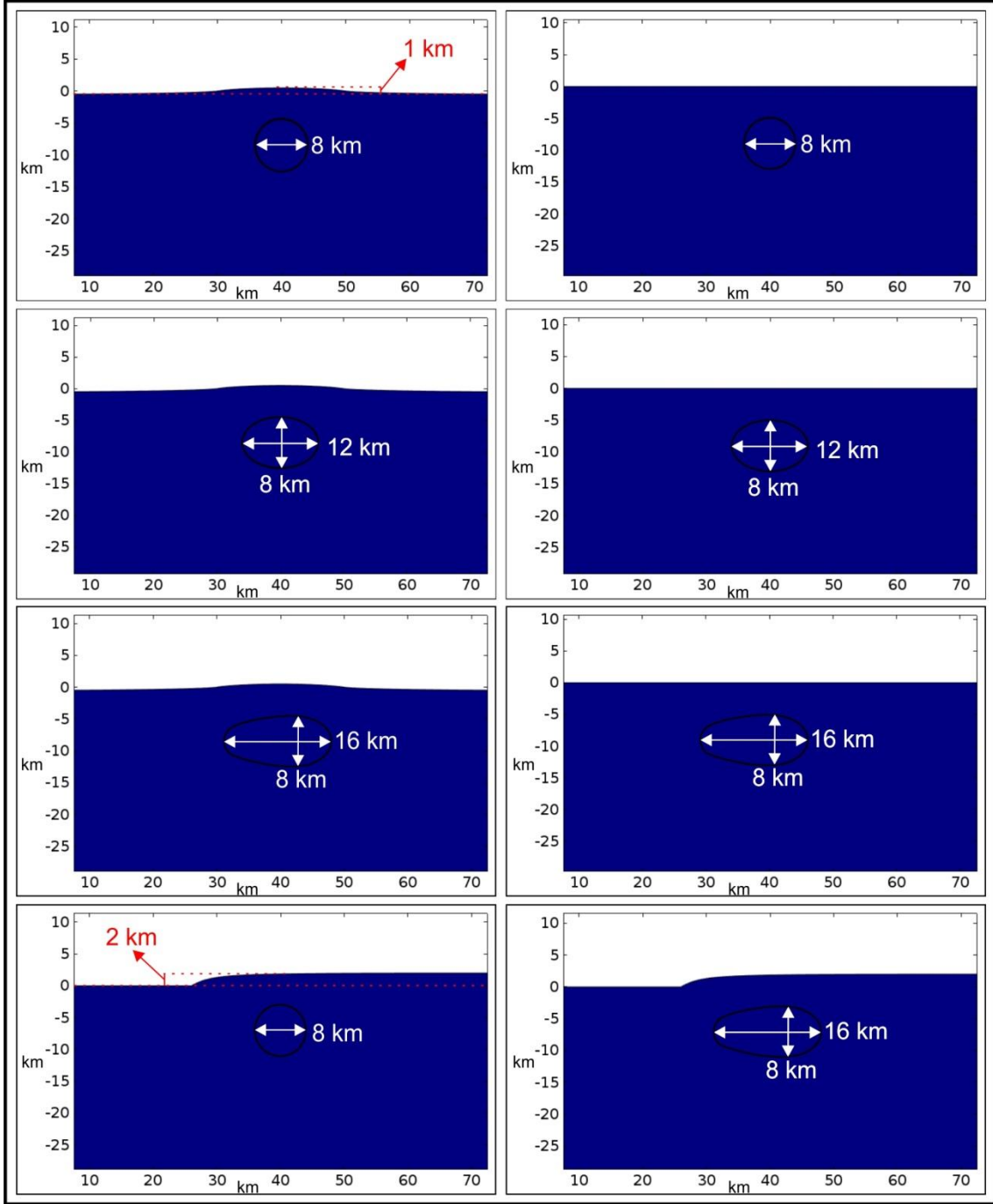
Topoğrafyanın etkisini incelemek için 3 farklı tipte topoğrafya modeli (düz topoğrafya, 1 km ve 2 km yükseklikte volkan konisi ile topoğrafya) oluşturulmuştur (Şekil 3.12).

Derinliğin etkisini incelemek amacıyla magma odaları 4 km, 5 km, 6 km, 7 km, 8 km, 9 km ve 10 km derinlikte olmak üzere modellenmiştir (Şekil 3.14). Buna göre, magma odası derinliği arttıkça, magma odasının yatay hareketine bağlı olarak çatı bloğunda oluşan ve blok fayı oluşturan stres bloğunun yüzeye ulaşamadığı gözlenmiştir. 7 km derinlikten itibaren bu stresin yüzeye kadar ulaşamadığı gözlenmektedir (Şekil 3.14). Her farklı tipte topoğrafya ve magma odası modeli için bu işlemler tekrarlanmıştır.

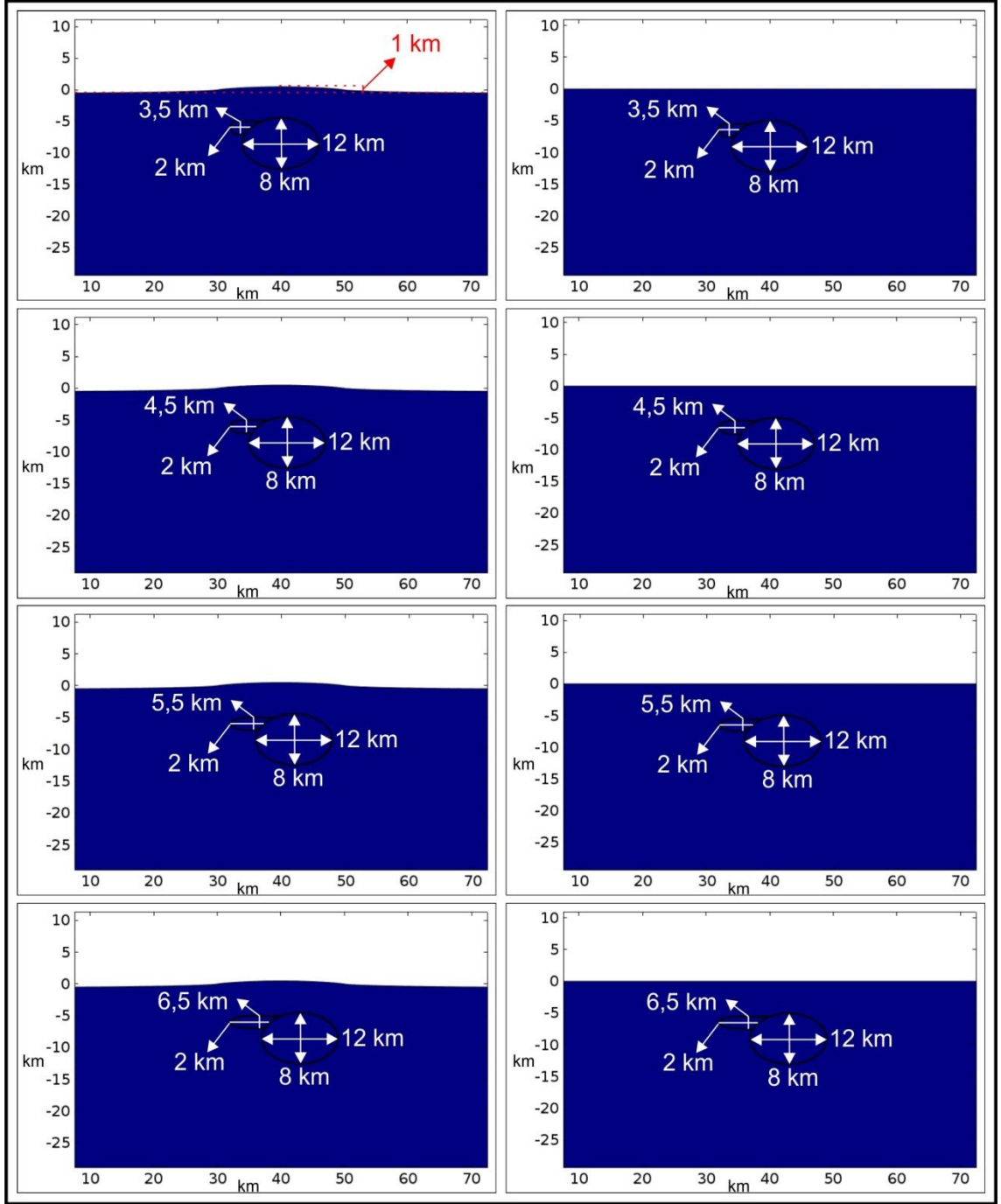
Nümerik model, zamana bağlı bir model olarak tasarlanmıştır. Model 10 saniyede oluşmakta ve nümerik modelleme tamamlandıktan sonra her saniyede bir gerçekleşen değişim incelenebilmektedir. Modeller oluşturulduktan sonra 0 - 10 saniye aralığında gerilme dağılımları (Şekil 3.15) ve yer değiştirme miktarları (Şekil 3.16) incelenmiştir. Magma odasının derinliğine bağlı olarak, bulunduğu derinliğin üzerindeki her km'de bir Von mises gerilme (Şekil 3.17) ve yer değiştirme grafikleri (Şekil 3.18) oluşturulmuştur.



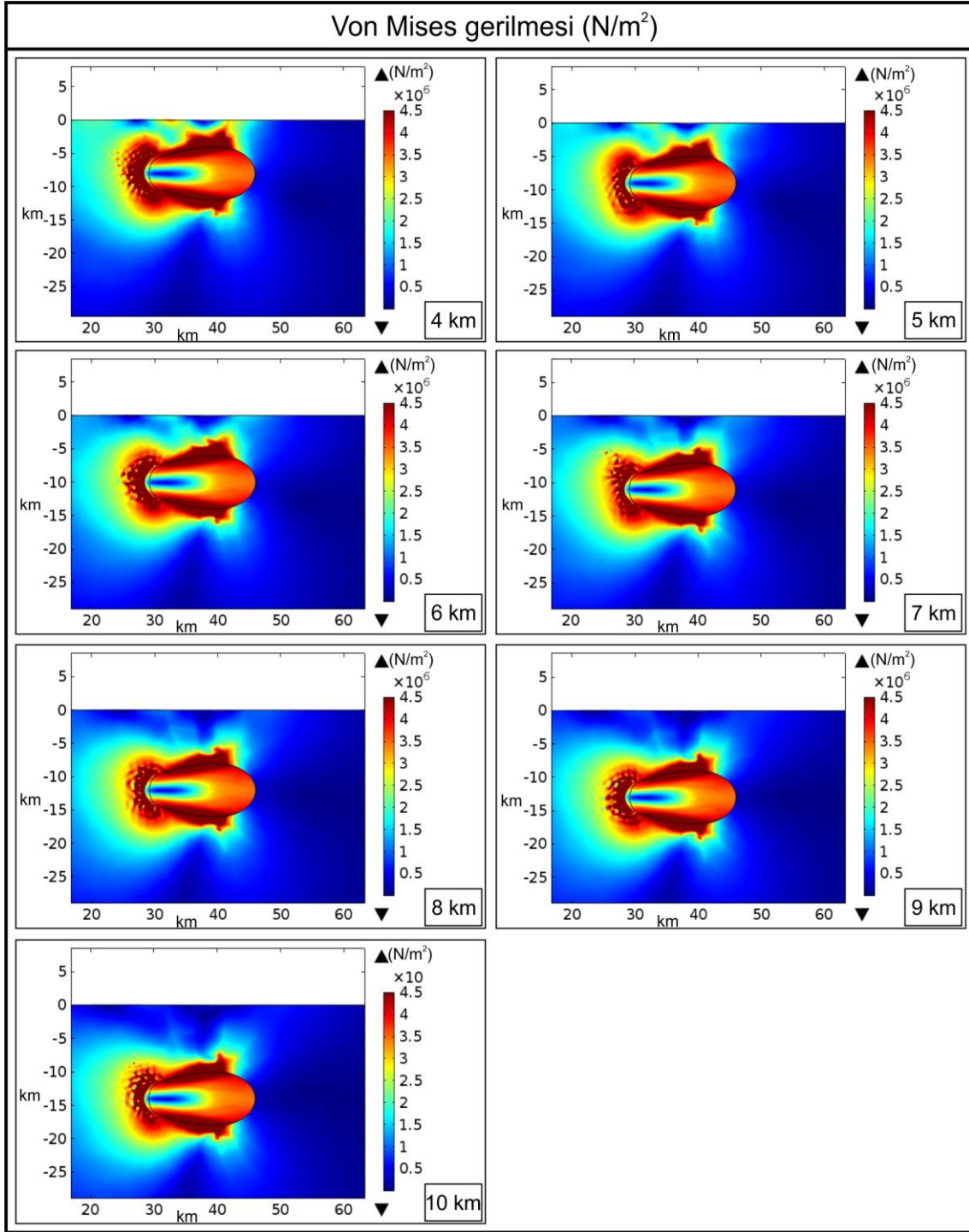
**Şekil 3.11.** Oluşturulan nümerik modellerin işleyişini anlatan şekil; **(a)** topoğrafyanın 0. saniyedeki konumu, **(b)** topoğrafyanın 10. saniyedeki konumu, **(c)** yüzeyden itibaren 3 km derinden alınan yatay yer değiştirme profili, **(d)** yüzeyden itibaren 3 km derinden alınan yatay stres profili, **(e)** yer değiştirme grafiği, **(f)** gerilme grafiği.



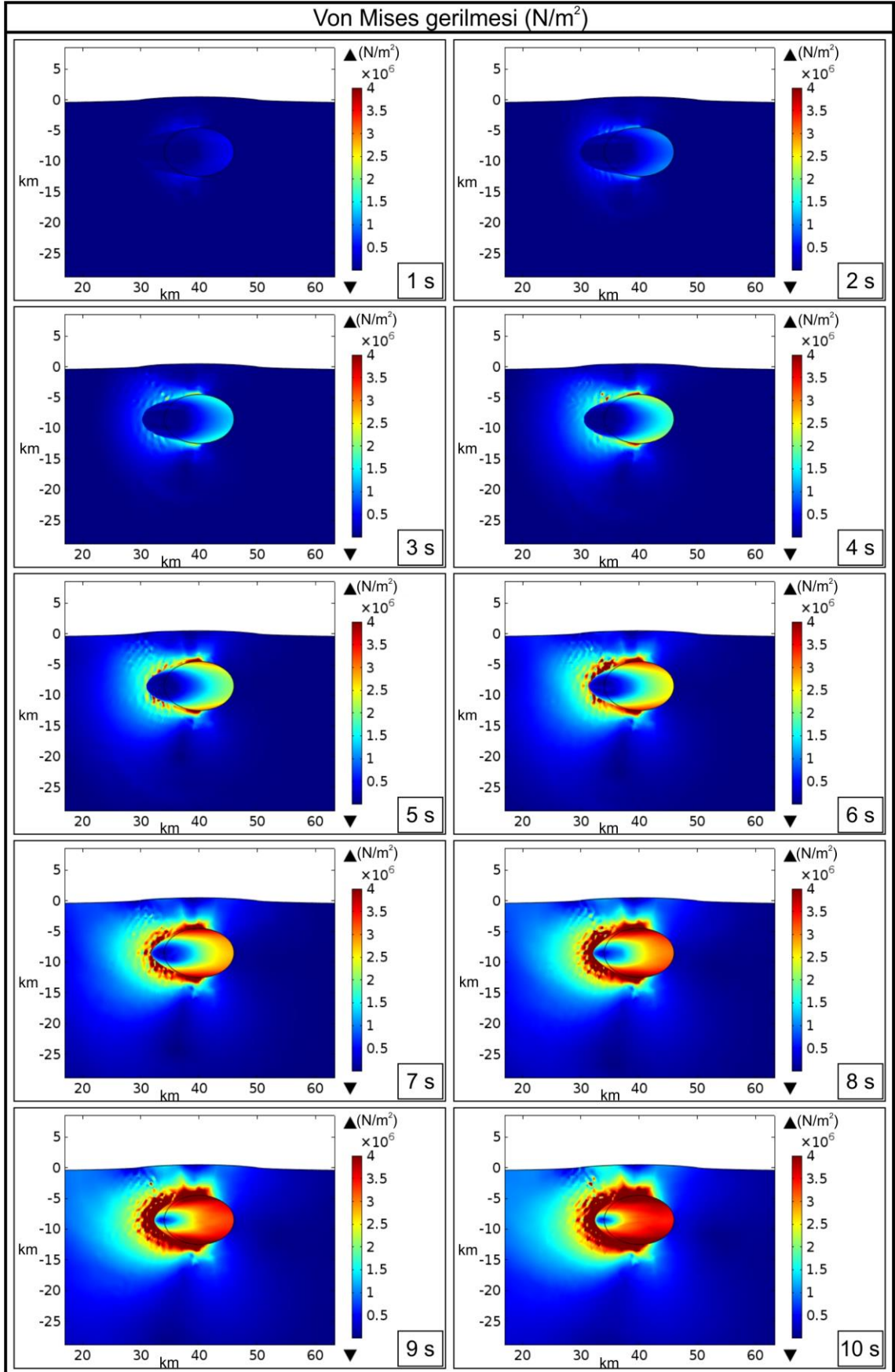
**Şekil 3.12.** Farklı şekil ve boyutlardaki magma odalarının farklı topoğrafyalardaki 0. s’de gösterimi.



**Şekil 3.13.** Farklı boyutlardaki sil tipi magma odasının 5 km derinliğindeki farklı topoğraflarda 0. s’de gösterimi.

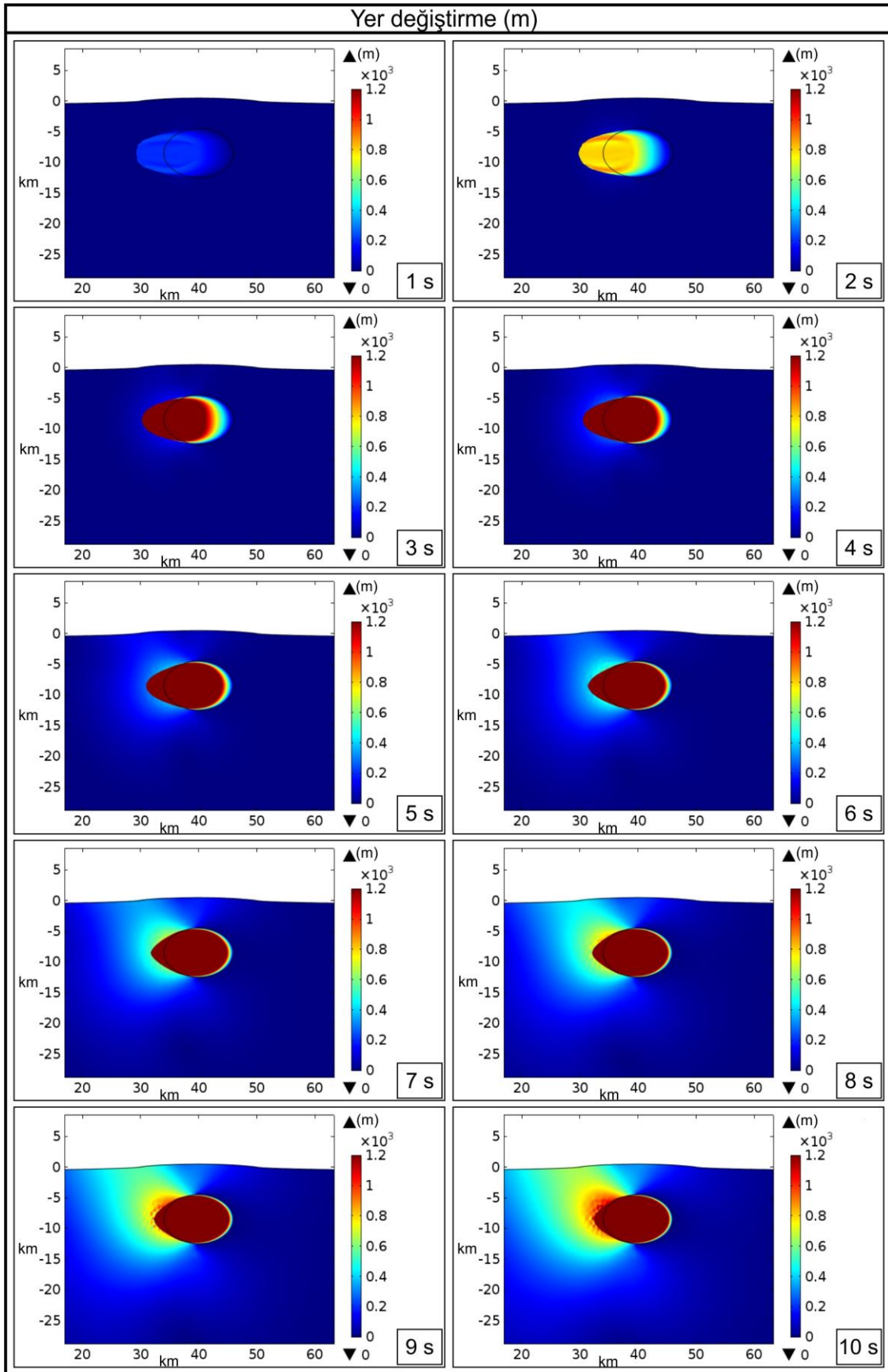


**Şekil 3.14.** 4 km - 10 km derinlikteki eliptik şekilli magma odasının 10. s'deki Von mises gerilme grafikleri.

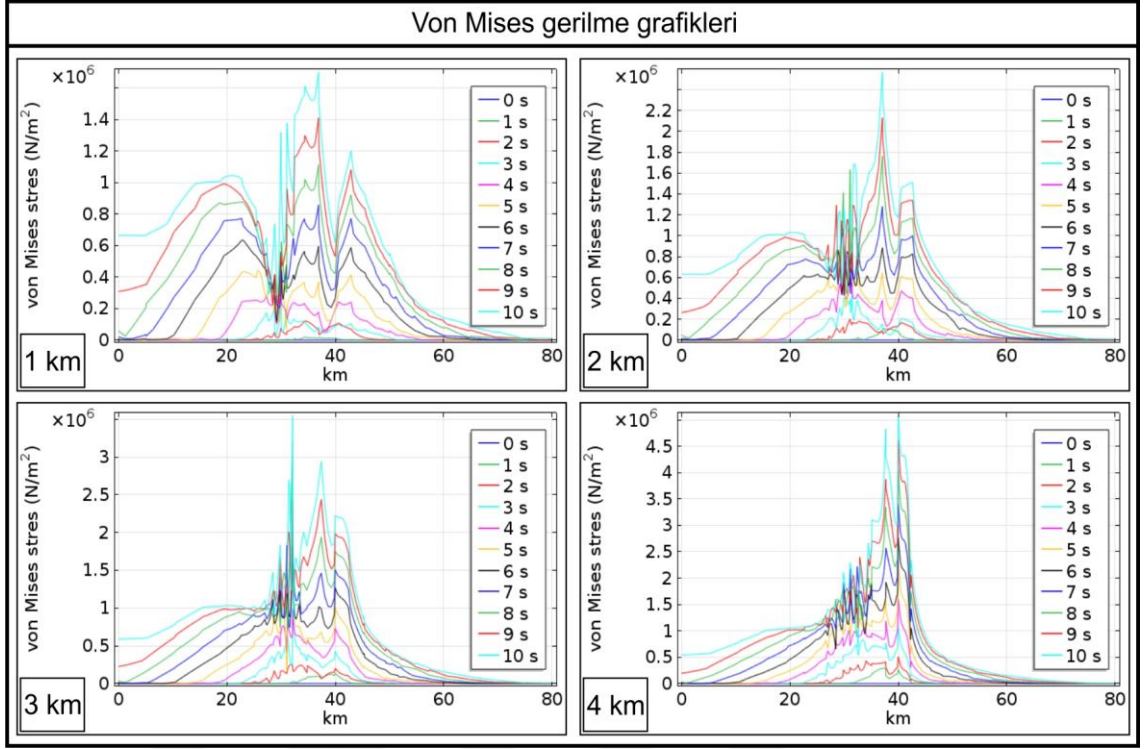


**Şekil 3.15.** 5 km derinlikteki eliptik şekilli magma odasının 0 – 10 s aralığındaki Von mises gerilmesini gösteren şekil.

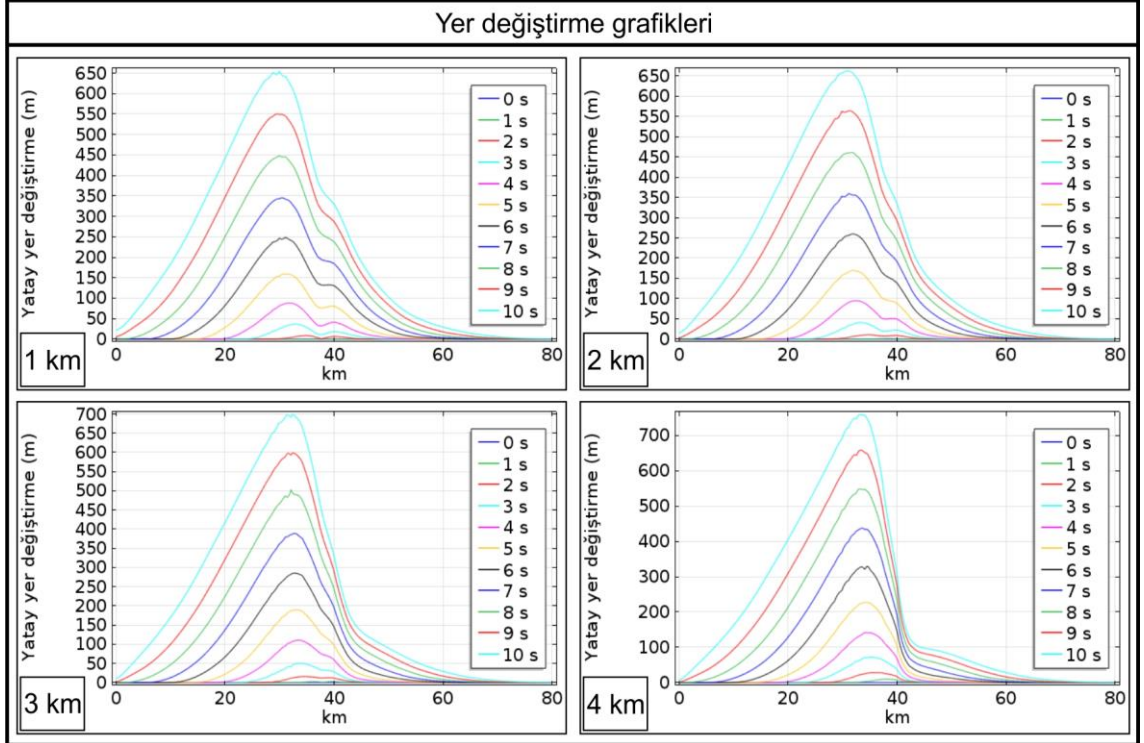




**şekil 3.16.** 5 km derinlikteki eliptik şekilli magma odasının 0 – 10 s aralığında yer değiştirmesini gösteren şekil.

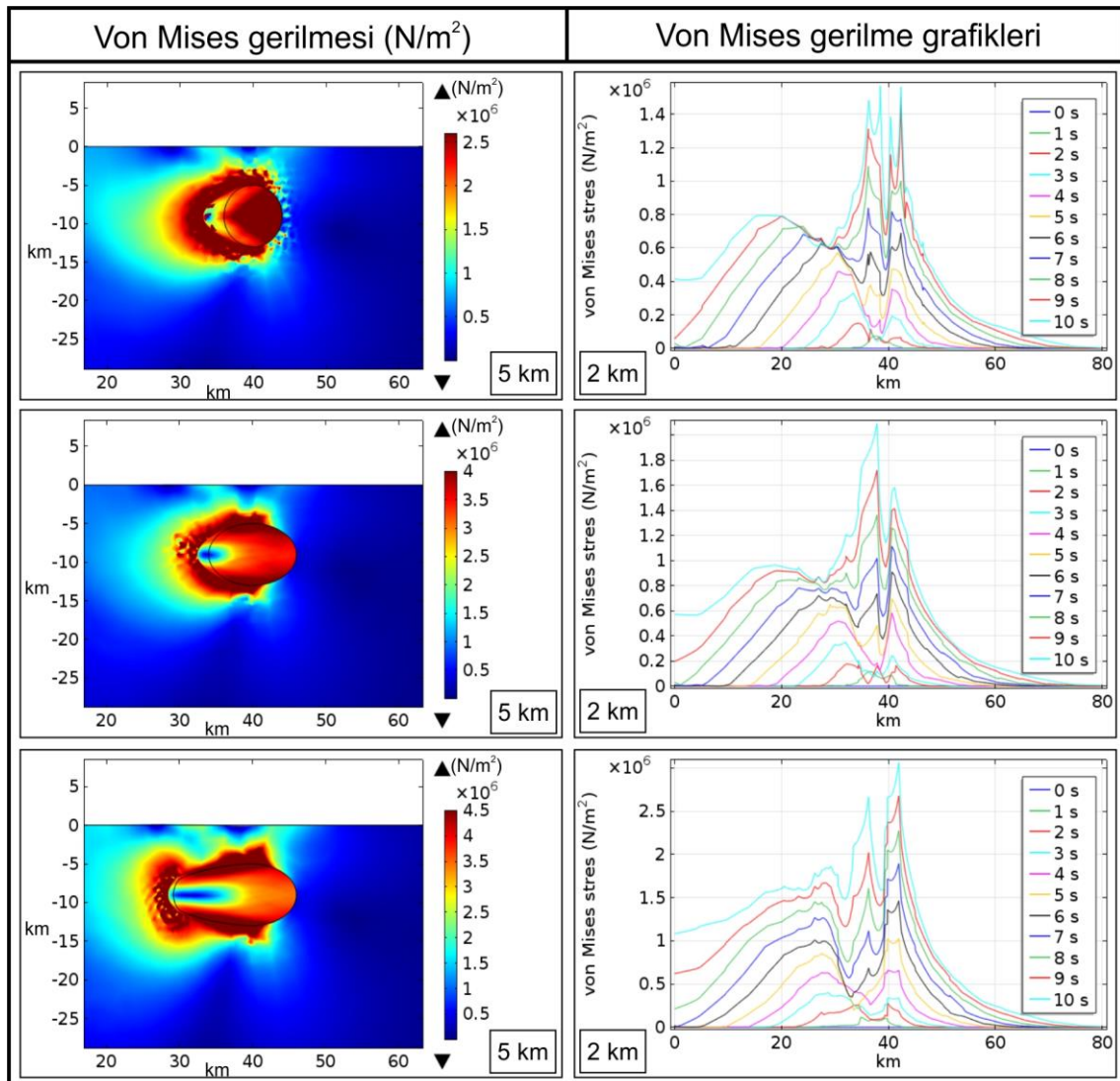


**Şekil 3.17.** 5 km derinlikteki eliptik şekilli magma odasının yüzeyden 1 km – 4 km derinlikte kesit alınarak Von mises gerilmesini gösteren grafikler.



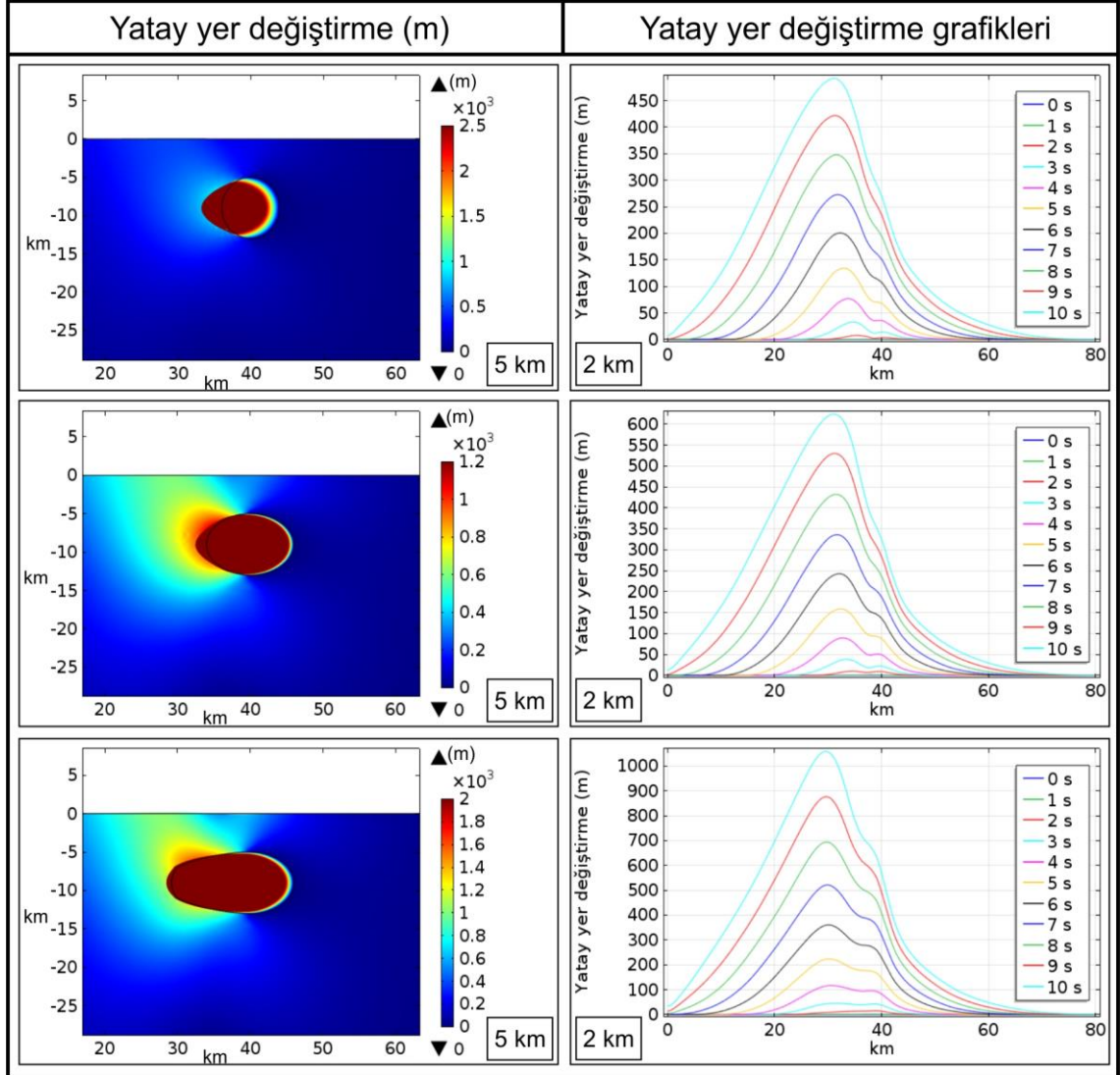
**Şekil 3.18.** 5 km derinlikteki eliptik şekilli magma odasının yüzeyden 1 km – 4 km derinlikte kesit alınarak yatay yer değiştirmesini gösteren grafikler.

Sonuç olarak, magma odasının şeklinin çatı bloğunda oluşturduğu gerilme ve yatay yer değiştirme miktarı, 5 km derindeki dairesel ve 12 km ve 16 km çapında eliptik şekilli magma odası modelleri oluşturularak karşılaştırılmıştır. Buna göre, dairesel magma odasının yüzeyden 2 km derindeki Von Mises gerilmesinin maksimum  $1,6 \times 10^6$  Pa olduğu, 12 km çapında eliptik şekilli magma odasının Von Mises gerilmesinin maksimum  $2,1 \times 10^6$  Pa, 16 km çapında magma odasının ise maksimum  $3,1 \times 10^6$  Pa olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.19). Böylece, dairesel magma odalarının çatı bloğunda oluşturduğu gerilmenin, eliptik şekilli magma odalarına göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.



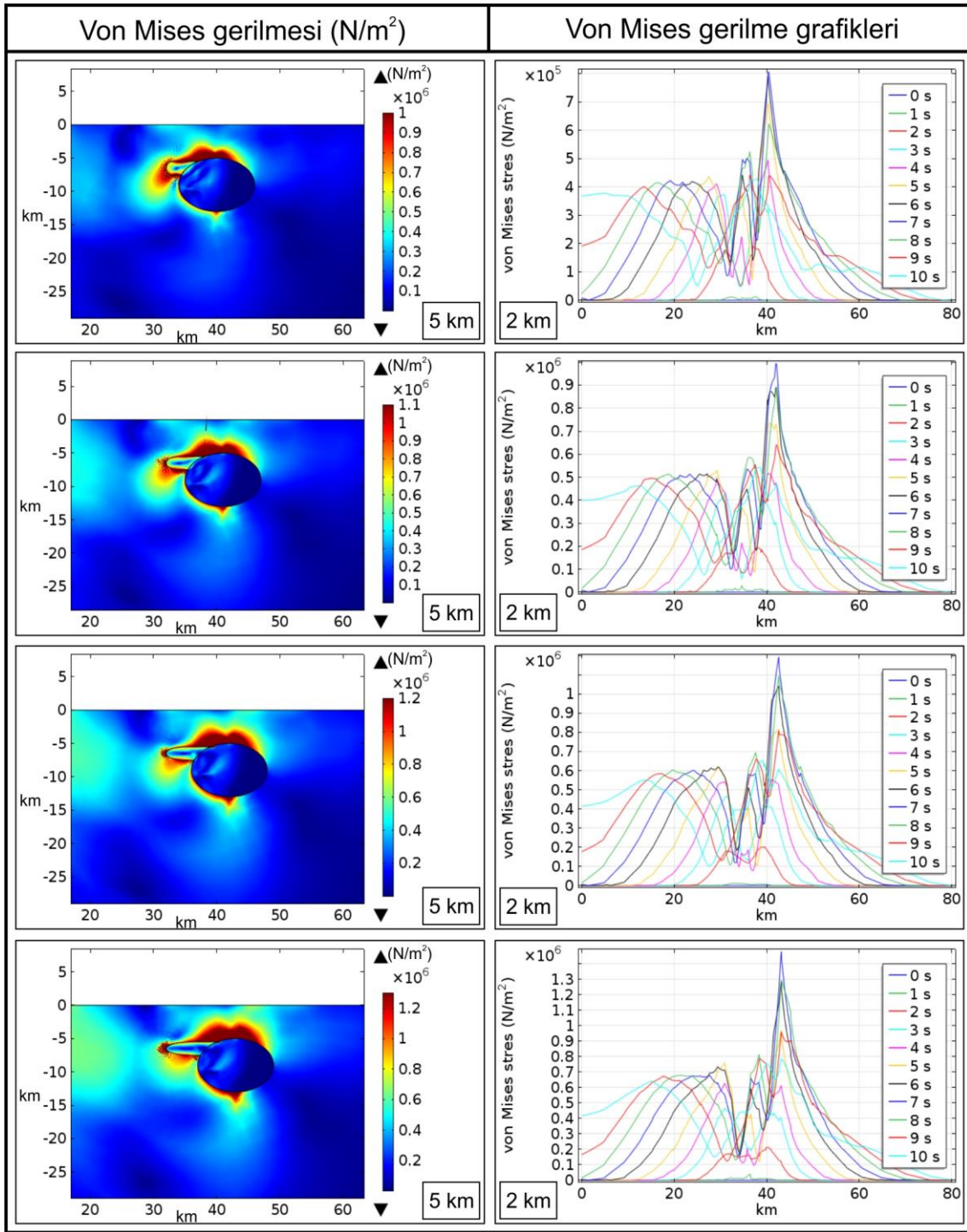
**Şekil 3.19.** Yüzeyden 5 km derindeki dairesel ve eliptik şekilli magma odası modellerinin yüzeyden 2 km derindeki Von Mises gerilmesini gösteren şekil.

Dairesel magma odasının yüzeyden 2 km derindeki yatay yer değiştirmesinin maksimum 0,5 km olduğu, 12 km çapında eliptik şekilli magma odasının maksimum 0,6 km ve 16 km çapında eliptik magma odasının ise maksimum 1,1 km olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.20). Buna göre, dairese magma odalarının çatı bloğunda oluşturduğu yatay yer değiştirmesinin, eliptik şekilli magma odalarına göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.20. Yüzeyden 5 km derindeki dairese ve eliptik şekilli magma odası modellerinin yüzeyden 2 km derindeki yatay yer değiştirmesini gösteren şekil.





**Şekil 3.21.** Yüzeyden 5 km derindeki farklı boyutlarda sil şekilli intrüzyon yapan magma odası modellerinin yüzeyden 2 km derindeki Von Mises gerilmesini gösteren şekil.

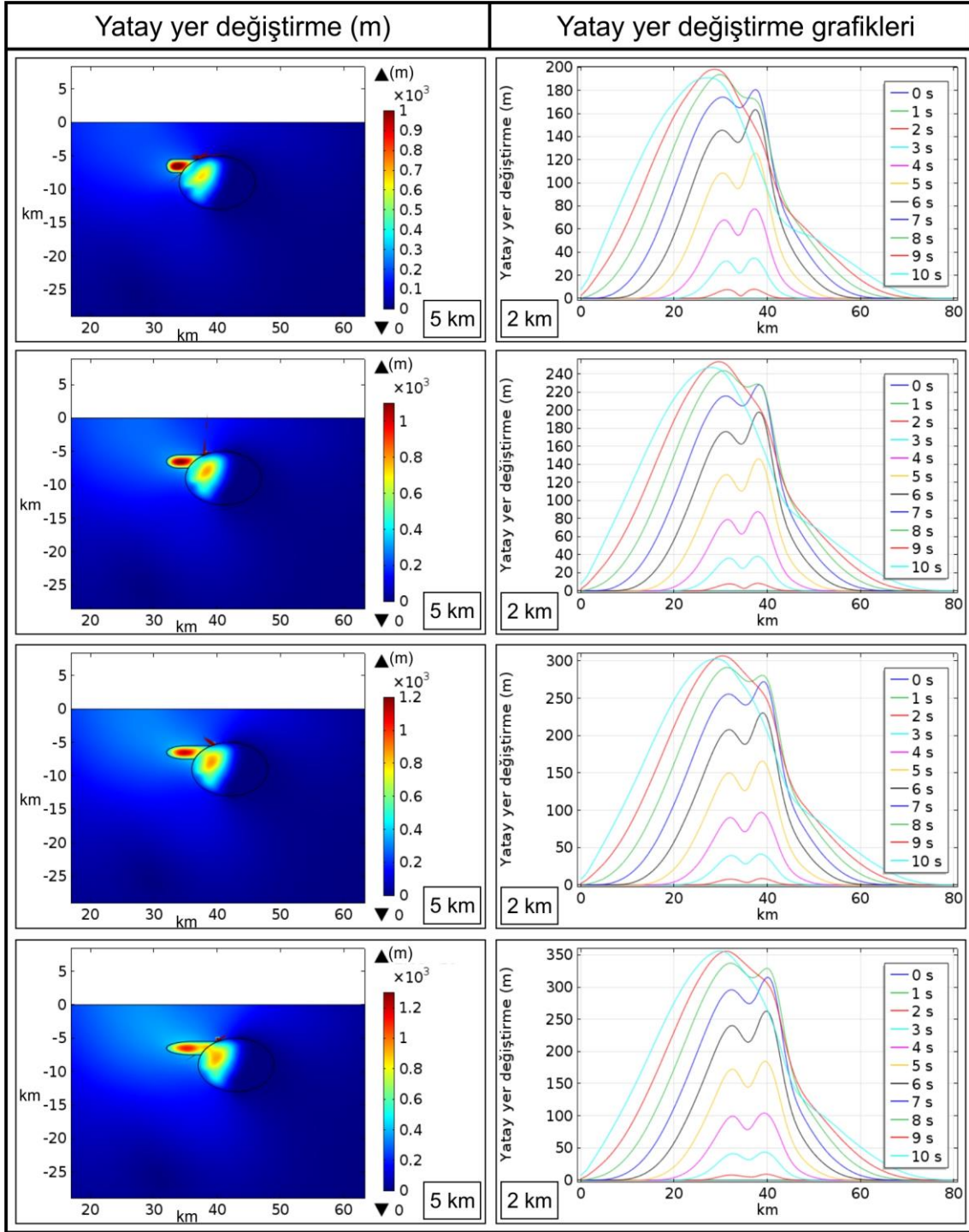
Ek olarak, 5 km derindeki sil şekilli intrüzyon yapan magma odalarının çatı bloğunda oluşturduğu gerilme ve yatay yer değiştirme miktarları farklı boyutlarda sil şekilli magma odası modelleri oluşturularak karşılaştırılmıştır. 3,5 km çapındaki sil şekilli intrüzyon yapan magma odasının yüzeyden 2 km derindeki Von Mises gerilmesinin maksimum  $0,8 \times 10^6$  Pa olduğu, 6,5 km çapındaki sil şekilli magma odasının yüzeyden 2 km derindeki Von Mises gerilmesinin ise maksimum  $1,5 \times 10^6$  Pa olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.21). Buna göre, sil şekilli intrüzyon yapan magma odalarının çapı arttıkça çatı bloğunda oluşturdukları gerilmenin de arttığı tespit edilmiştir.

Yüzeyden 5 km derindeki, 3,5 km çapında sil şekilli intrüzyon yapan magma odasının yüzeyden 2 km derindeki yatay yer değiştirmesinin maksimum 0,2 km olduğu, 6,5 km çapında sil şekilli magma odasının yüzeyden 2 km derindeki yatay yer değiştirmesinin ise maksimum 0,35 km olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.22). Böylece, sil şekilli intrüzyon yapan magma odalarının çapı arttıkça çatı bloğunda oluşturdukları yatay yer değiştirmenin de arttığı tespit edilmiştir.

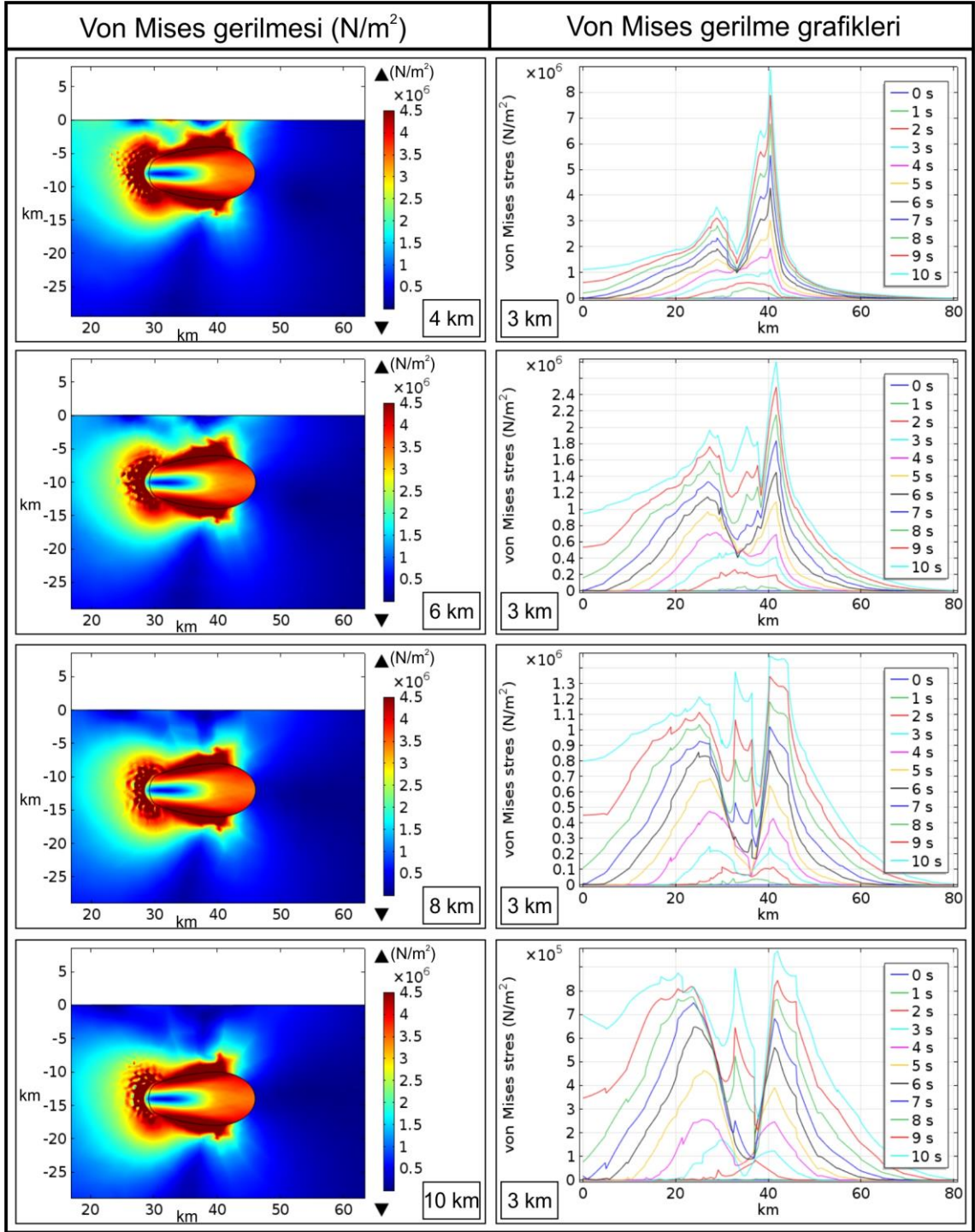
Magma odasının derinliğinin çatı bloğunda oluşturduğu gerilme ve yatay yer değiştirme miktarı 4 km, 6 km, 8 km ve 10 km derindeki eliptik şekilli magma odası modeli oluşturularak karşılaştırılmıştır. Buna göre, 4 km derindeki magma odasının yüzeyden 3 km derindeki Von Mises gerilmesinin maksimum  $9 \times 10^6$  Pa olduğu; 10 km derindeki magma odasının yüzeyden 3 km derindeki Von Mises gerilmesinin ise maksimum  $1 \times 10^6$  Pa olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.23). Böylece, magma odasının derinliği arttıkça çatı bloğunda oluşturduğu çekme geriliminin azaldığı tespit edilmiştir.

4 km derindeki eliptik şekilli magma odasının 3 km derindeki yatay yer değiştirmesinin maksimum 1,3 km olduğu, 10 km derindeki yatay yer değiştirmesinin ise maksimum 0,5 km olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.24). Buna göre, magma odasının derinliği arttıkça çatı bloğunda oluşturduğu yatay yer değiştirmenin azaldığı tespit edilmiştir.

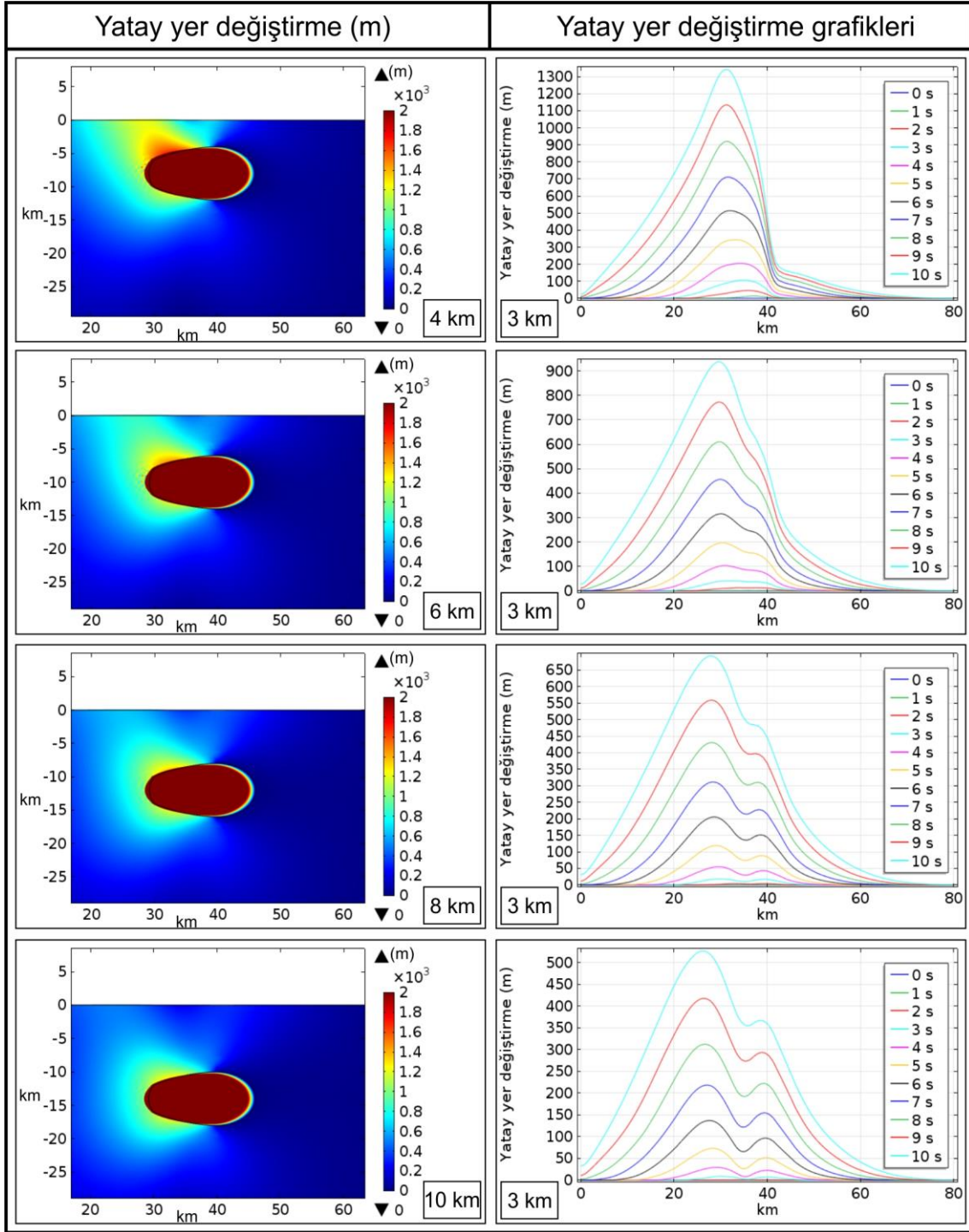




**şekil 3.22.** Yüzeyden 5 km derindeki farklı boyutlarda sil şekilli intrüzyon yapan magma odası modellerinin yüzeyden 2 km derindeki yatay yer değiştirmesini gösteren şekil.



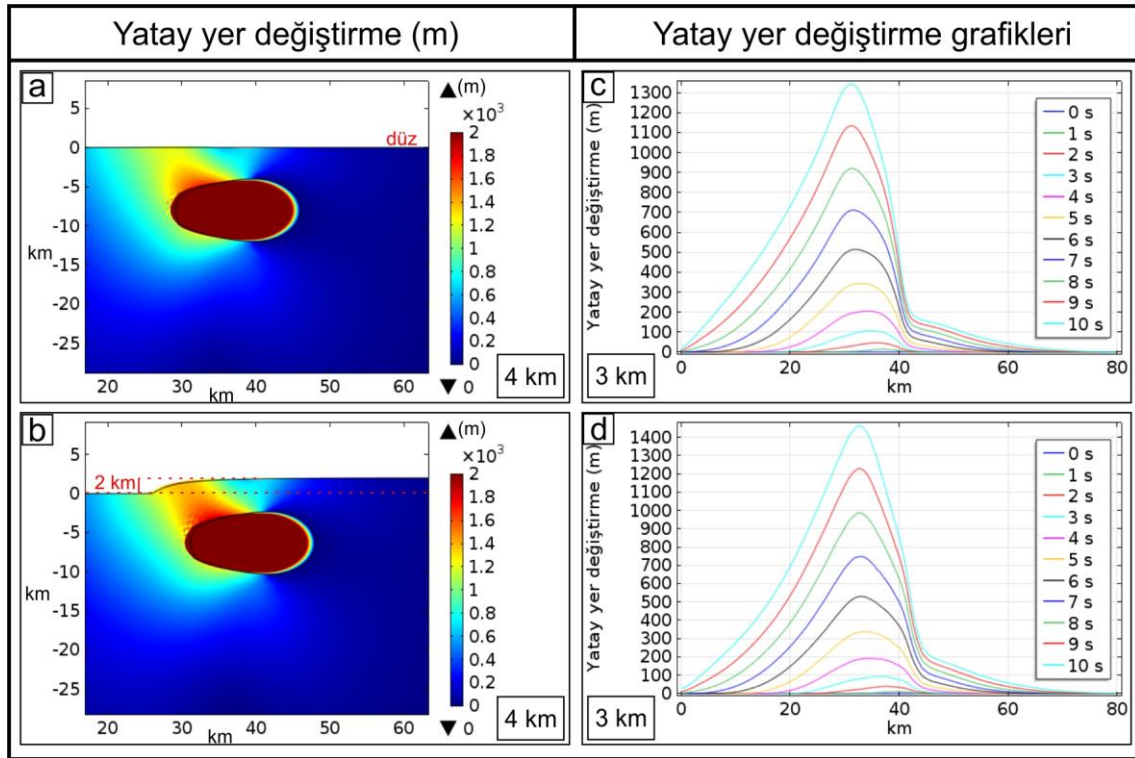
**Şekil 3.23.** Yüzeyden 4 km - 10 km derindeki eliptik şekilli magma odasının yüzeyden 3 km derindeki Von mises gerilmesini gösteren şekil.



**şekil 3.24.** Yüzeyden 4 km – 10 km derindeki eliptik şekilli magma odasının yüzeyden 3 km derindeki yatay yer değiştirmesini gösteren şekil.

Nemrut volkanında gözlenen iki bloklu kaldera çökmesinde Muş baseninin katkısı olup olmadığını incelemek amacıyla, Nemrut'un batısında yer alan Muş basenini simüle eden nümerik modeller oluşturulmuştur. 4-6 km derinliğinde eliptik şekilli magma odasının yanal genişlemesine bağlı olarak yüzeyden 3 km derindeki yer değiştirme ve gerilme miktarları belirlenmiştir (EK-D.1.a, b; EK-D.2.a, b; EK-D.3.a, b). Düz bir topoğrafyada 4 km derindeki eliptik magma odasının yanal genişlemesine bağlı olarak magma odasının çatı bloğunda yaptığı yer değiştirmenin yaklaşık 1,3 km, gerilmenin ise  $9 \times 10^6$  Pa olduğu nümerik modellerle belirlemiştir (Çizelge 3.5; Şekil 3.25a, Şekil 3.26a). Muş basenini simüle eden modelde ise 4 km derindeki magma odasının yanal genişlemesine bağlı olarak çatı bloğunda meydana gelen yer değiştirmenin yaklaşık 1,4 km olduğu ve gerilmenin ise  $10 \times 10^6$  Pa olduğu belirlenmiştir (Çizelge 3.6; Şekil 3.25b, Şekil 3.26b). Buna göre, düz topoğrafya ile Muş basenine doğru gelişen yanal genişleme karşılaştırıldığında, Muş basenine doğru 0,1 km daha fazla yatay yer değiştirme gözlenmektedir (Şekil 3.25c, d). Topoğrafya modelleri arasındaki gerilme karşılaştırıldığında ise Muş basenini simüle eden modelde gerilmenin  $1 \times 10^6$  Pa daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.26c, d). Bu farkların Muş basenini temsil eden topoğrafyanın şekline bağlı olarak farklılık gösterdiği düşünülmektedir. Düz bir topoğrafyaya ziyade, Muş baseninin konumu, Nemrut volkanı üzerinde -magma odasının olası bir batı yönlü genişlemesi neticesinde- fazladan yaklaşık 0,1 km'lik DB yönlü bir açılmaya olanak vermektedir. Bu durum, Nemrut Volkanı'nda KG yönlü sıkışmaya ek olarak gerçekleşen DB yönlü genişlemeye bağlı volkanizma ve bu volkanizmanın oluşturduğu KG ve KKB-GGD yönlü açılma çatlaklarına (Ulusoy ve ark., 2008; Çubukçu ve ark., 2012) ek olarak kalderanın iki plakalı çökmesinin nedenlerinden biri olabilir.

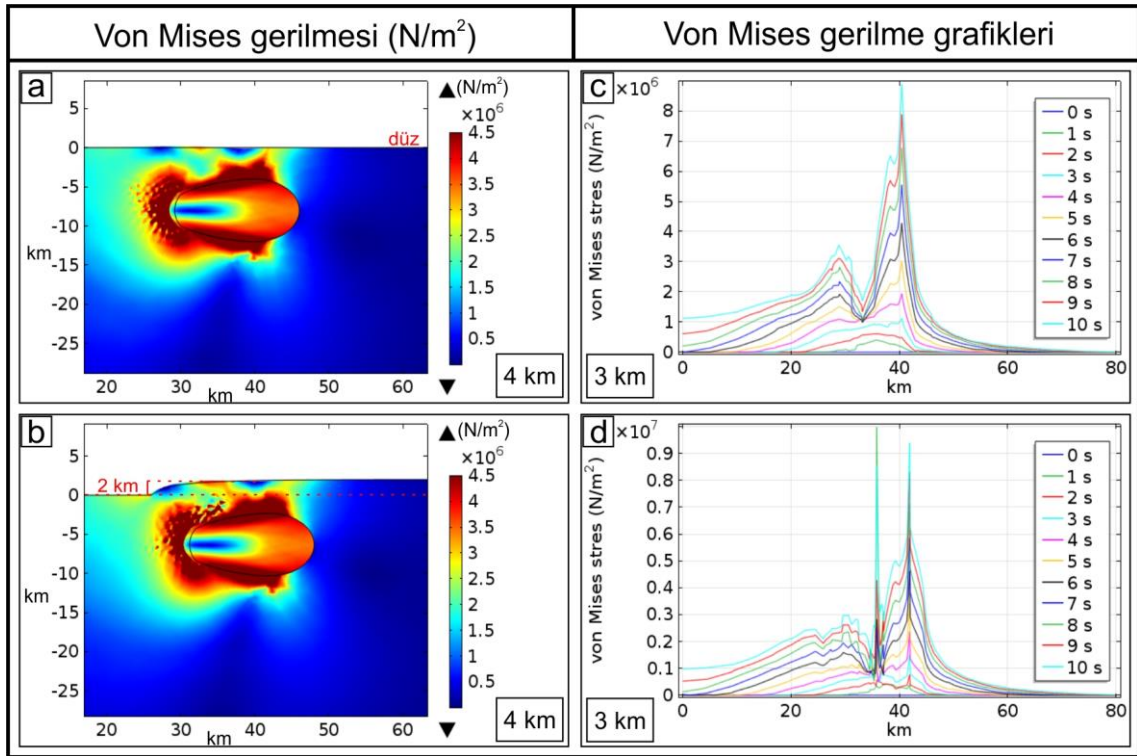




**Şekil 3.25.** 4 km derindeki eliptik magma odasının (a) düz topoğrafya, (b) Muş basenini simüle eden topoğrafya üzerinde (c, d) yüzeyden itibaren 3 km derindeki yatay yer değiştirmesini gösteren şekil.

**Çizelge 3.5.** 4-6 km derindeki eliptik magma odasının düz topoğrafya üzerinde yüzeyden itibaren 3 km derindeki yer değiştirme ve gerilme değerleri.

| Magma odası derinliği | Yer değiştirme (km) | Stres ( $\text{N/m}^2$ ) |
|-----------------------|---------------------|--------------------------|
| 4 km                  | 1,3                 | $9 \times 10^6$          |
| 5 km                  | 1,1                 | $4 \times 10^6$          |
| 6 km                  | 0,9                 | $2,8 \times 10^6$        |



**Şekil 3.26.** 4 km derindeki eliptik magma odasının (a) düz topoğrafya, (b) Muş basinini simüle eden topoğrafya üzerinde (c, d) yüzeyden itibaren 3 km derindeki Von mises gerilmesini gösteren şekil.

**Çizelge 3.6.** 4-6 km derindeki eliptik magma odasının Muş basinini simüle eden topoğrafya üzerinde yüzeyden itibaren 3 km derindeki yer değiştirme ve gerilme değerleri.

| Magma odası derinliği | Yer değiştirme (km) | Stres ( $\text{N/m}^2$ ) |
|-----------------------|---------------------|--------------------------|
| 4 km                  | 1,4                 | $10 \times 10^6$         |
| 5 km                  | 1,2                 | $7 \times 10^6$          |
| 6 km                  | 1                   | $2,6 \times 10^6$        |

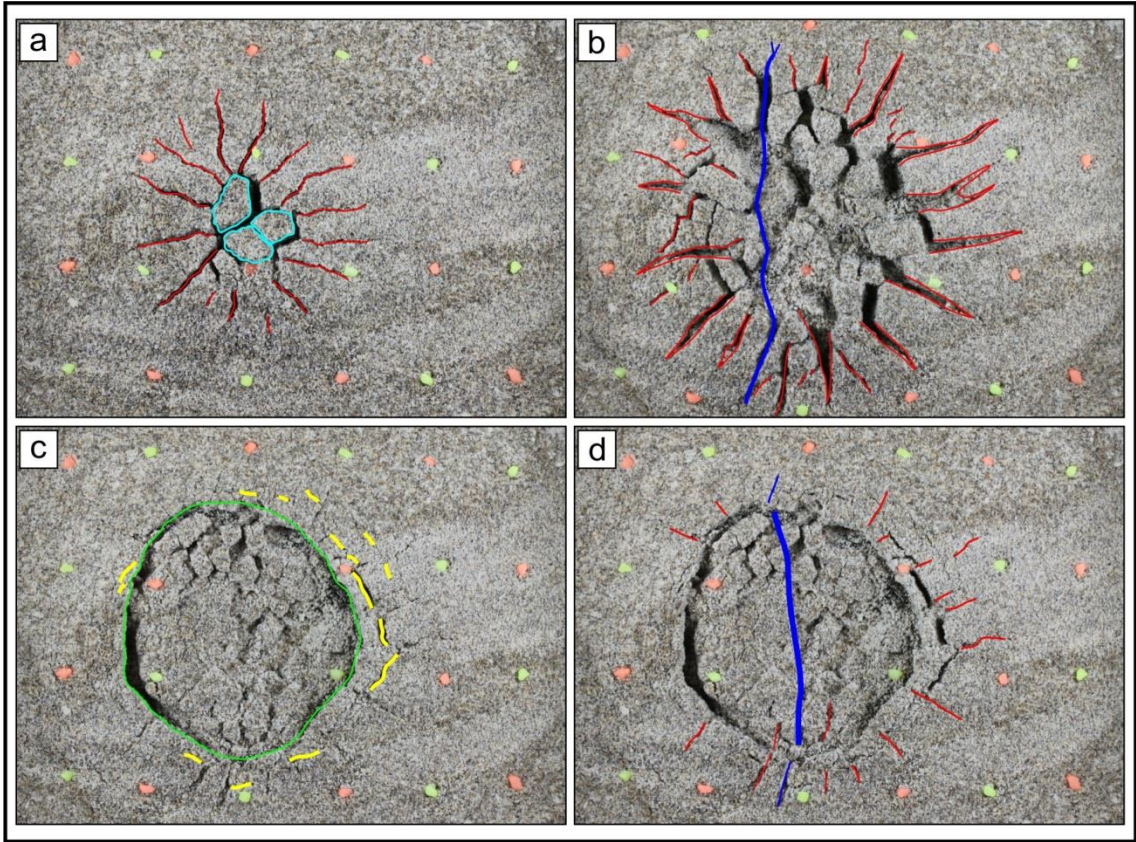


#### 4. TARTIŞMA VE YORUM

Tekrarlanan deneylerle bir volkan konisinin temelini oluşturan kabarma ile başlayan ve kaldera çökmesiyle son bulan analog kaldera modelleri oluşturulmuştur. Kabarma ile birlikte, kabaran domun zirve bölgesinde bloklu yapıların oluştuğu ve literatürde de bahsedildiği gibi (ör. Komuro ve ark., 1984; Walter ve Troll, 2001; Troll ve ark., 2002) çevresinde ışınsal çatlakların ortaya çıktığı görülmüştür (Şekil 4.1a). Sonraki aşamalarda, kabarmanın ilerlemesiyle ışınsal çatlakların volkanın zirve kısmına doğru genişlediği görülmektedir (Şekil 4.1b). Ulusoy ve ark. (2004), Bodrum resürjan kalderasında ışınsal damar kayaçlarının kalınlığının topoğrafik kaldera sınırından uzaklaştıkça azaldığını göstermiştir. Bu ışınsal çatlakların damar kayaçlarının doğal yerleşim alanı olduğunu göz önünde bulundurursak deneysel bulgularımızın ışınsal damar kayaçların oluşumu ve geometrileri ile uyumlu olduğunu söylemek mümkündür. Yine bu aşamada zirvedeki bloklu yapının stabilitesini koruyamayarak deforme olduğu ve buna bağlı olarak volkanın zirve kısmında bir çöküntü alanı oluşturduğu gözlenmiştir (Şekil 4.1b). Bu çöküntü alanı, önceki çalışmalarda da tespit edilmiştir (ör. Komuro ve ark., 1984; Marti ve ark. 1994; Walter ve Troll, 2001). Magma odasının yanal genişlemesine bağlı olarak volkanın çatı bloğunda eşit olmayan bir deformasyon alanı oluşturduğu ve bu deformasyon alanının bir blok fayıyla ayrıldığı gözlenmiştir (Şekil 4.1b: mavi renkle gösterilen fay). Çökme aşamasında kalderanın, bir yapısal kaldera sınır fayı (çember fayı) ile çevrelendiği ve ışınsal çatlakların artakalanlarının topoğrafik kaldera sınırının dışında hala kısmen mevcudiyetini koruduğu görülmektedir (Şekil 4.1c, d). Yine çökme sonucunda, topoğrafik kaldera sınırının dışında kalan ve çember şekilli dairesel kaldera sınır fayı ile uyumlu konsantrik çember fayların oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 4.1c: sarı renkle işaret edilen faylar). Önceki çalışmalardan farklı olarak, kaldera çöküntüsünün son aşamasında, kabarma sırasında oluşan blok fayının gözlenmeye devam edilmesi, çalışmanın ana sonuçlarından birini temsil etmektedir (Şekil 4.1d; Şekil 3.1; Ek-A).

Özetle, yapılan modellemeler sonucunda magma odasının yanal genişlemesine bağlı olarak, çöken çatı bloğunda eşit olmayan bir deformasyon alanı oluşturduğu belirlenmiştir. Çökme esnasında çatı bloğunun farklı derinliklerde ve ayrı bloklar halinde çöktüğü belirlenmiştir. Çöken iki farklı deformasyon alanının doğrusal bir

yapısal sınır tarafından ayrıldığı (blok fayı) gözlenmiştir. Bu çökme yapısı, çift pistonlu parçalı kaldera çökmesi olarak adlandırılmıştır.

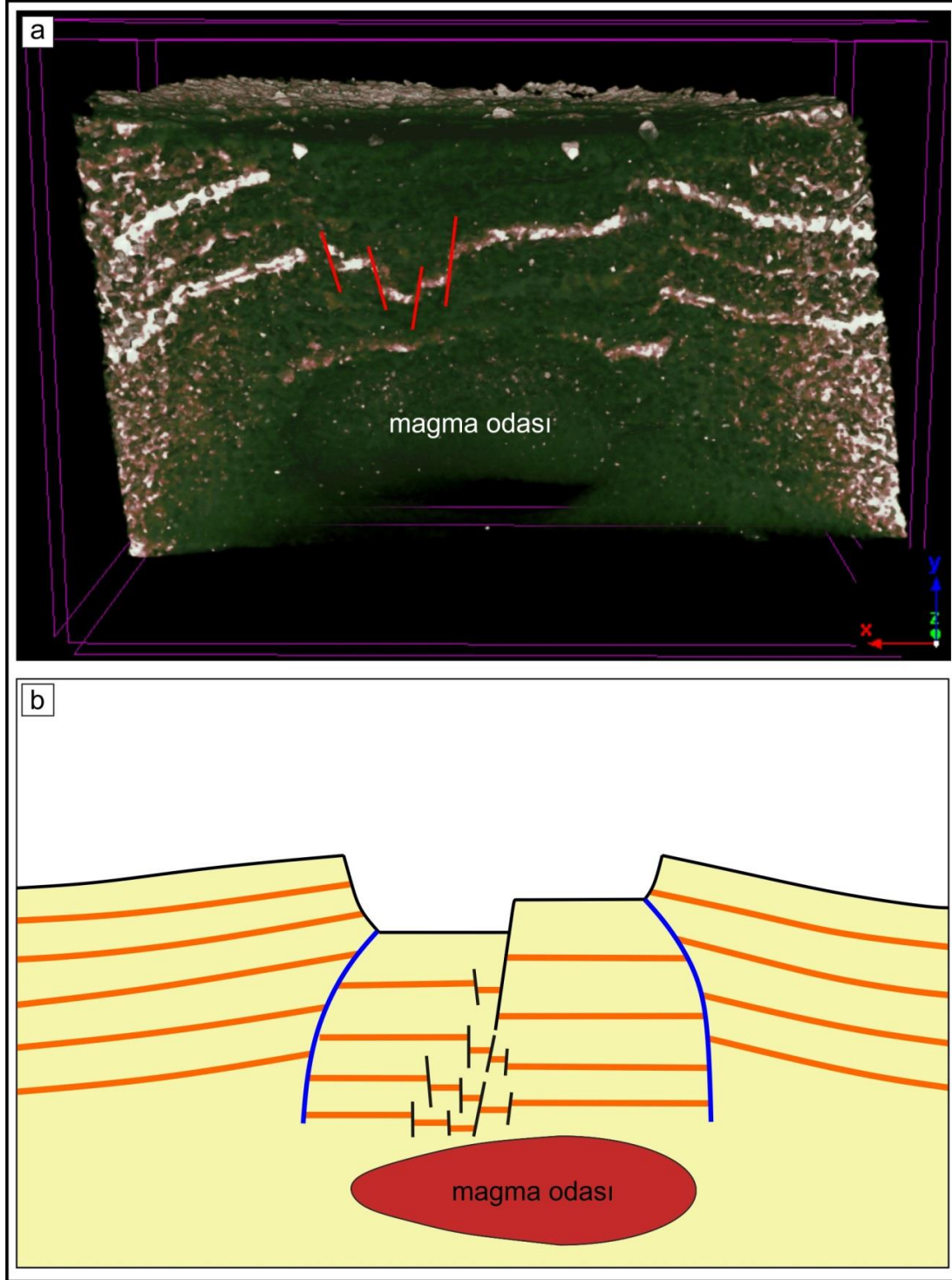


**Şekil 4.1.** Analog kaldera deneylerinde oluşan faylar: **(a)** Kabarma sırasında oluşan ışınal çatlaklar (kırmızı) ve blok yapısı (mavi), **(b)** Kabarmanın ilerleyen aşamalarında gözlenen ışınal çatlaklar (kırmızı) ve blok fayı (koyu mavi), **(c)** Çökme esnasında oluşan sınır fayları (yeşil, sarı), **(d)** Çökme sonrası oluşan blok fayı (koyu mavi) ve ışınal çatlaklar (kırmızı).

Çift pistonlu parçalı kaldera çökmesi, stereofotogrametrik olarak modellediğimiz yüzey modellerinde ayırdedilebildiği gibi, sabitlenmiş kaldera modellerinin tomografisinde de gözlenmektedir.

Sabitlenmiş dairesel modelin x eksenine paralel doğrultuda alınan kesit görüntüsünde, magma odasının x istikametinde yanal genişlemesine bağlı olarak deformasyon alanının iki plakadan oluştuğu ve bu plakaların birbirinden bir blok fayı ile ayrıldığı gözlenmiştir (Şekil 4.2a). Magma odasının x istikametinde genişlediği kısmın üzerinde kalan blok daha fazla çökmüş ve daha fazla deforme olmuştur (Şekil 4.2a). Deformasyon ve

çökmenin en fazla magma odasına yakın derinliklerde ve magma odasının neredeyse ortasına denk gelen kesimin üzerinde gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 4.2; Şekil 3.10). Nümerik modellerde Von Mises geriliminin en yüksek olduğu bölge de burasıdır (bknz. Bölüm 3.2).



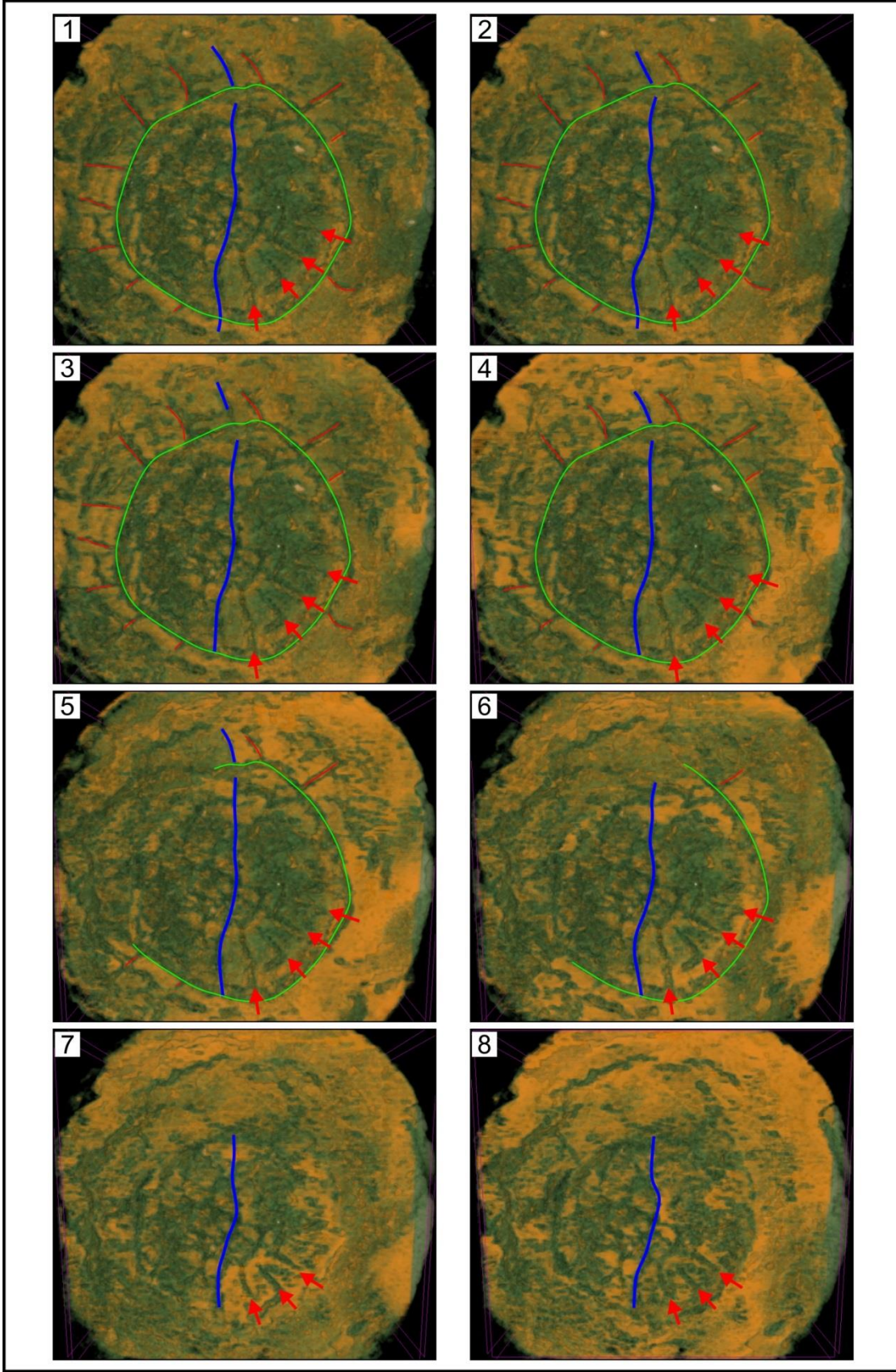
**Şekil 4.2.** Sabitlenmiş dairesel kaldera modelinin z eksenine boyunca alınan (a) X-ışını tomografisi görüntüsü, (b) çizilmiş kesit görüntüsü.



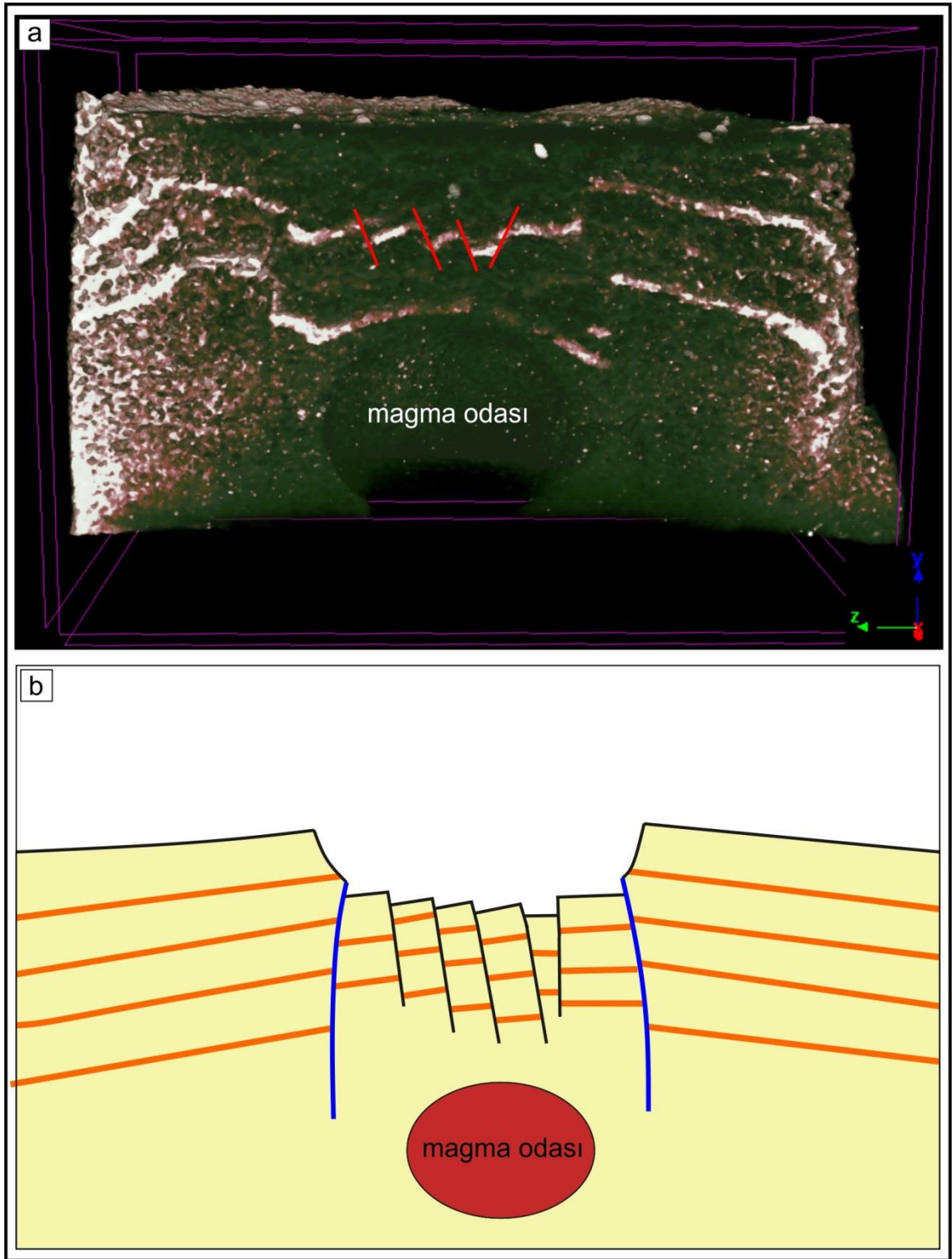
Sabitlenmiş kaldera modelinin X-ışını tomografisi ile elde edilen görüntüleri (yukarıdan aşağıya doğru) yatay kesitlerde incelendiğinde, ışınsal fayların kalderanın üst kesimlerinde gözlemlendiği, derin kesitlere inildikçe ışınsal fayların görünürliğünün ciddi oranda azaldığı görülmüştür. Özellikle derinlerde kaldera sınır fayı dışında ışınsal faylar gözlenmezken sınırlı sayıda ışınsal fay çöken blok içinde gözlenmektedir ([Şekil 4.3: kırmızı oklar](#)). Buna karşı, kaldera sınır fayının (çember fayı) ve çöken bloğu iki ana parçaya bölen blok fayının gözlenmeye devam ettiği tespit edilmiştir ([Şekil 4.3](#)).

Sabitlenmiş kaldera modelinin x-eksenine dik doğrultuda, daha az çöken ve daha az deforme olan bloğa ( $K_1$ ) yakın alınan kesit görüntülerinde çöken blokta basamaklı faylarının olduğu gözlenmiştir ([Şekil 4.4](#)). Bu kesit eksenini magma odasının genişleme eksenine dik olduğu için doğal olarak bu yönlü kesitlerde magma odası da dairesel kesitlidir. Benzer şekilde, tomografisini aldığımız farklı modellerde, x-eksenine dik doğrultudaki (yani magma odasının hareketine dik doğrultuda) kesitlerde, çember şekilli kaldera sınır fayının  $K_1$  bloğuna yakın kesimlerinde ters basamak fayları oluşturduğu gözlenmiştir. Bu olguyu daha iyi gözleyebilmek için sabitlenmiş kaldera modeli kesilerek çeyrek dairesel parçalara bölünmüş, böylece modelin daha yüksek çözünürlüklü X-ışını Mikro-CT görüntüsü alınmıştır. Bu yüksek çözünürlüklü görüntülerde ters basamak faylarının varlığı oldukça belirgindir ([Şekil 4.5](#)).

Ayrıca, önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi modellerin kesit görüntüleri üzerinde gözlenen dışa doğru dalımlı ters fayların x-ekseni boyunca alınan kesit görüntüsündeki dalım açılarının, buna dik eksen boyunca alınan kesit görüntüsündeki dalım açlarına göre daha dike yakın olduğu saptanmıştır (bkz. [Şekil 3.8](#), [Şekil 4.2b](#), [Şekil 4.4b](#)).

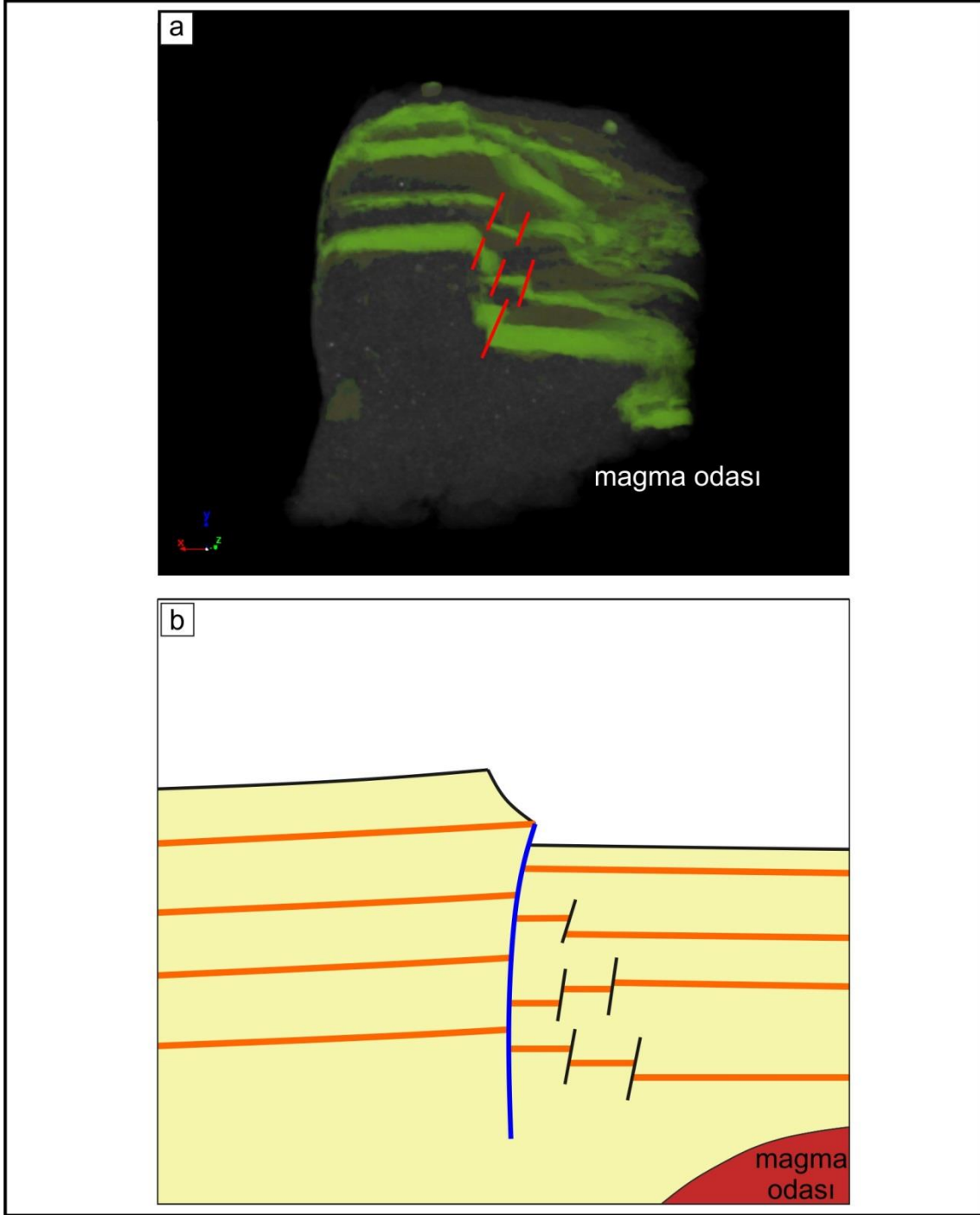


**Şekil 4.3.** Sabitlenmiş dairesel modelin X-ışını tomografisi ile elde edilen üstten görüntüsü (yeşil: sınır fayı (çember fay), kırmızı: ışınsal fay, mavi: blok fayı).



**Şekil 4.4.** Sabitlenmiş dairesel kaldera modelinin x eksenini boyunca alınan **(a)** X-ışını tomografisi görüntüsü, **(b)** çizilmiş kesit görüntüsü.



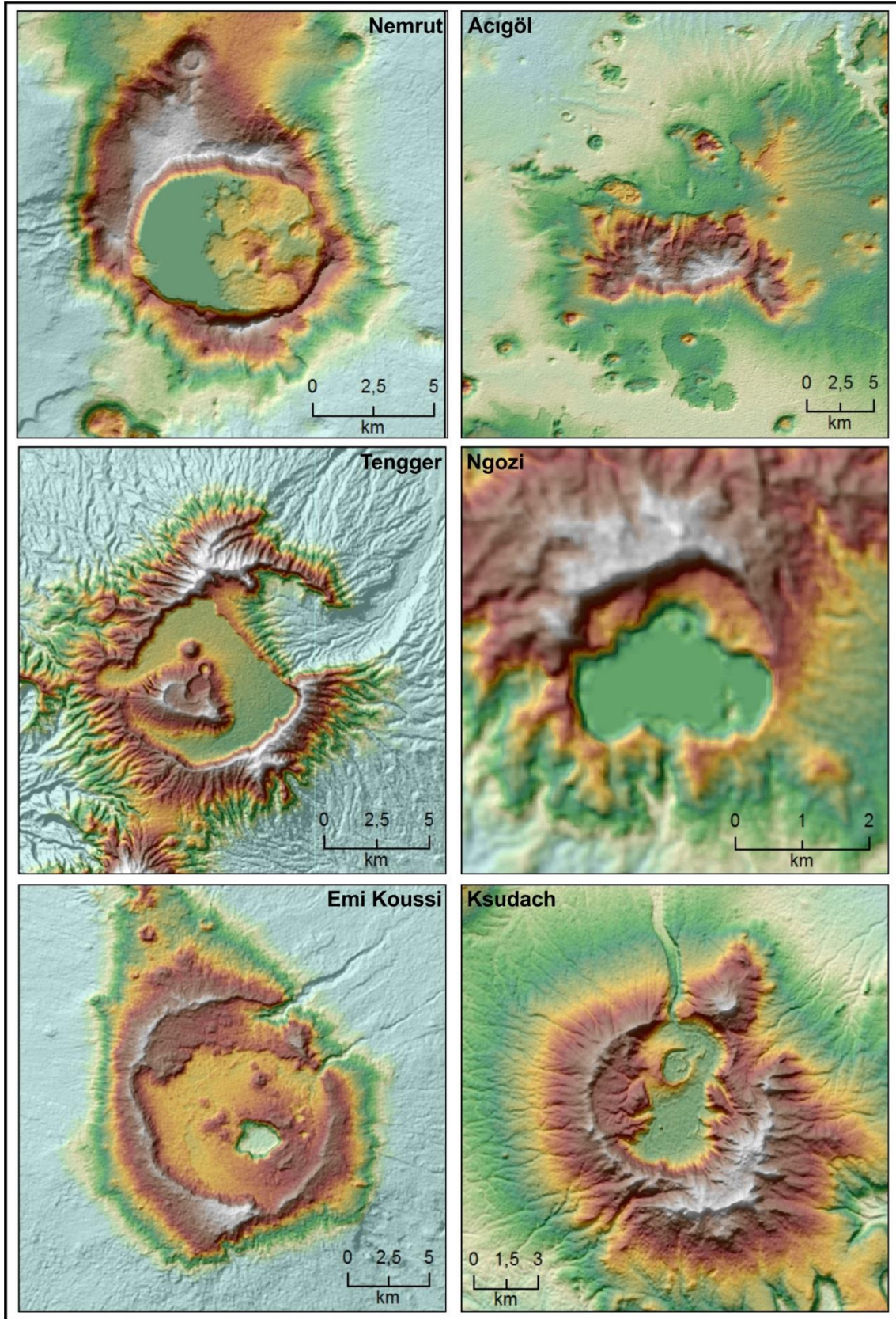


**Şekil 4.5.** Sabitlenmiş çeyrek dairesel kaldera modelinin **(a)** X-ışını Mikro-CT görüntüsü, **(b)** çizilmiş kesit görüntüsü.

Oluşturulan çift pistonlu parçalı kaldera modelleri, Nemrut, Acıgöl, Tengger, Ngozi, Emi Koussi ve Ksudach olmak üzere Dünya'dan 6 farklı doğal kaldera ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.6). Öncelikle, kalderaların uzunluk ( $L$ ) ve genişlikleri ( $g$ ) ölçülerek, uzunluk/genişlik ( $L/g$ ) oranları bulunmuştur (Çizelge 4.1). Böylece, kalderalar ovalliklerine göre sınıflandırılmıştır. Bölüm 3.1.1'de daha önce bahsedildiği gibi uzunluk/genişlik ( $L/g$ ) oranları 1,00 ile 1,05 arasında olanlar dairesel, 1,05 ile 1,10 arasında olanlar yarı eliptik ve 1,10'dan büyük olanlar ise eliptik şekilli kaldera olarak tespit edilmiştir. Buna göre, Ngozi ve Acıgöl dairesel, Nemrut, Ksudach, Emi Koussi ve Tengger kalderaları eliptik şekilli kalderalara örnek olarak düşünülebilir (Çizelge 4.1). Acıgöl kalderası için hesaplamalar Ulusoy ve ark. (2009)'un tanımladığı iki bloklu yapı üzerinden yapılmıştır. Deneysel kaldera modelleri 1:100.000 ölçekte tasarlanmış yani 1 cm, 1 km'yi ifade etmektedir; tüm grafikler ve hesaplamalar bu oran dikkate alınarak oluşturulmuştur.

**Çizelge 4.1.** Doğadaki kalderaların uzunluk/genişlik ( $L/g$ ) oranlarını gösteren çizelge.

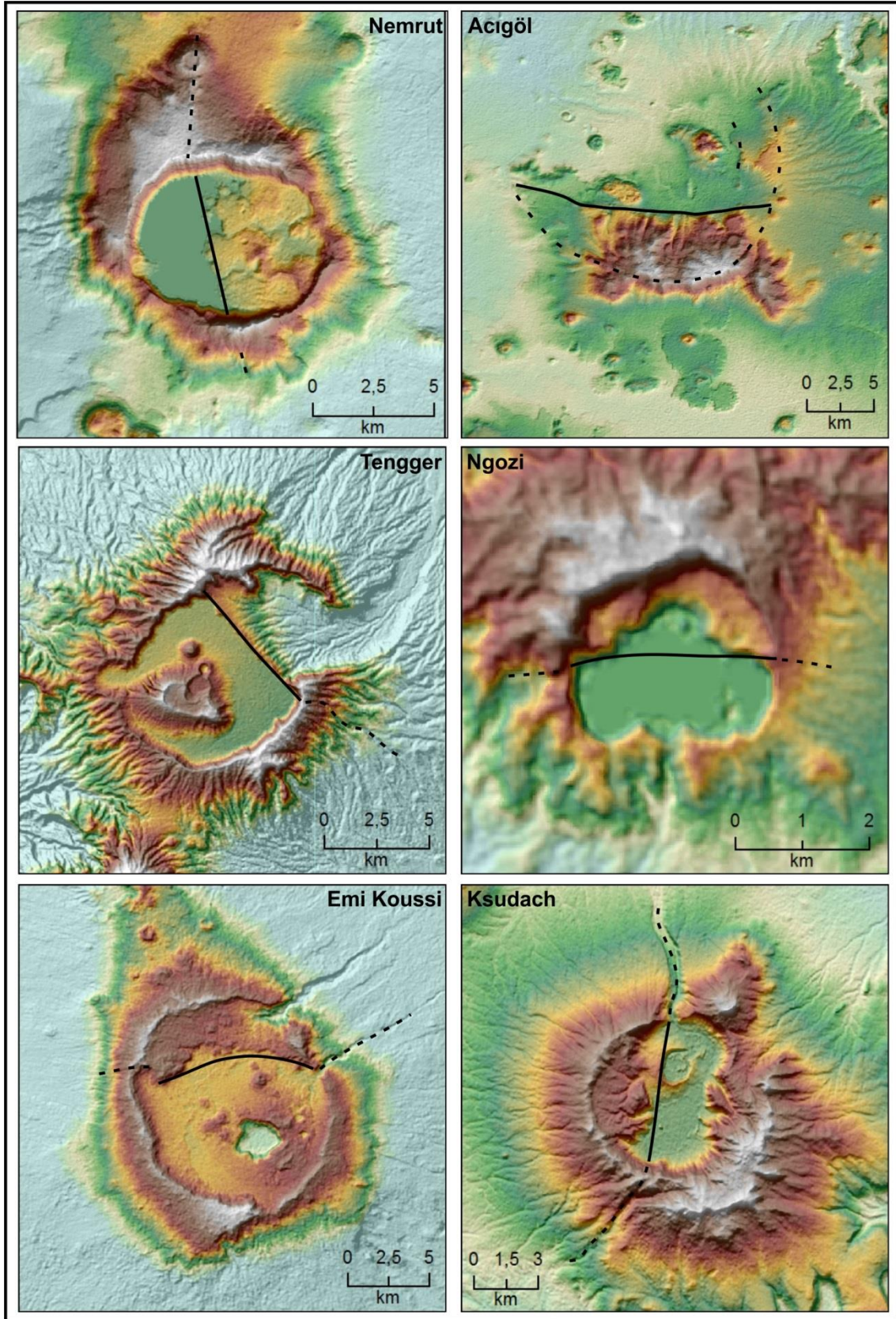
| Dünya'dan<br>Kaldera Örnekleri | Genişlik<br>$g$ (km) | Uzunluk<br>$L$ (km) | Uzunluk/Genişlik<br>$L/g$ |
|--------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Nemrut                         | 7,078                | 8,318               | 1,175                     |
| Acıgöl                         | 14,914               | 15,226              | 1,021                     |
| Ksudach                        | 7,654                | 8,529               | 1,114                     |
| Tengger                        | 7,814                | 10,539              | 1,348                     |
| Ngozi                          | 2,892                | 3,032               | 1,048                     |
| Emi Koussi                     | 11,084               | 13,536              | 1,221                     |



Şekil 4.6. Parçalı kaldera çökmelerine Dünya'dan örnekler.

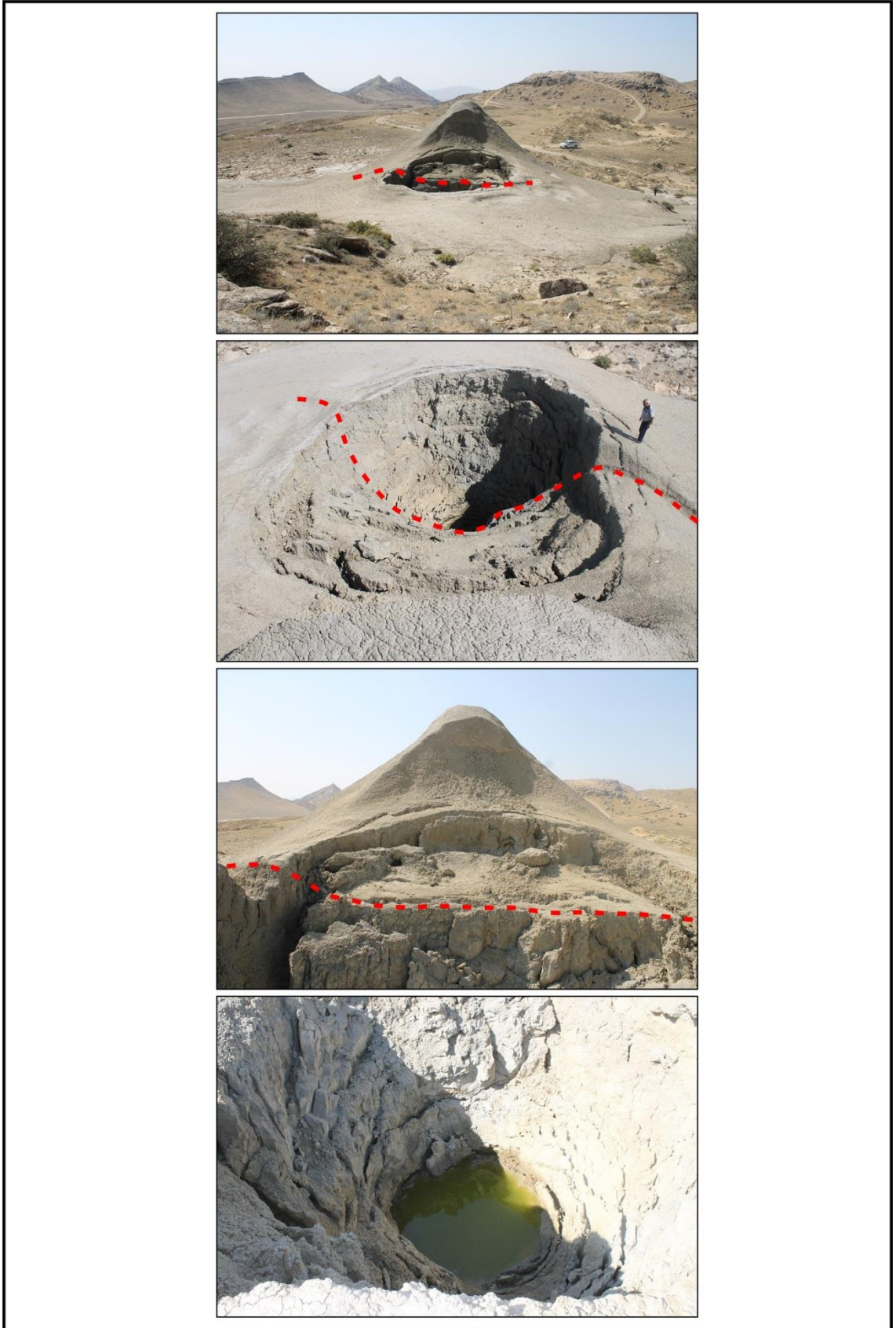


Modellediğimiz kalderalarla benzer şekilde iyi bir kıyaslama için seçtiğimiz doğadaki kaldera örneklerinde de çöken blokta doğrusal bir yapısal sınır (blok fayı) gözlenmektedir. Nemrut, Acıgöl, Tengger, Ngozi, Ksudach kalderalarının (Şekil 4.7) ve Çeyranuçan çamur volkanındaki çökme yapısının (Fotoğraflar izni ile Doç. Dr. Orhan Abbasov'dan alınmıştır; Şekil 4.8) iki farklı deformasyon alanından oluştuğu, bu deformasyon alanlarının doğrusal bir yapısal sınır (blok fayı) tarafından birbirinden ayrıldığı gözlenmektedir. Blok fay tarafından iki bloklu çöktüğü gözlenen bu kalderalarda, bloklardan birinin daha aşağıda olduğu da gözlenmektedir. Çeyranuçan çamur volkanındaki çökme yapısı tam olarak iki bloklu parçalı bir çökmeden ziyade (Acocella, 2007; Holohan ve ark., 2011; Liu ve ark., 2017a; Liu ve ark., 2017b; Liu ve ark., 2019)'in deneysel çalışmalarla destekleyerek gösterdiği iç-içe (nested) kaldera yapısına daha yakın olmasına karşın o yapılarla gözlenmeyen blok fay Çeyranuçan'da gözlenmektedir. Evrimine başta geniş bir ışınsal fay olarak başlayan 'blok fayın' uzantısının kaldera topoğrafik sınırı dışında da gözlenebildiğini kum havuzu modellerinde görmüştük. Nemrut boynunu oluşturan çatlak, Çeyranuçan çamur volkanında blok fayın çökme alanında uzantısının net olarak devam etmesi, diğer doğal örneklerde bu fayın uzantısında devam eden vadiler ve topoğrafik defektler gözlenmesi doğada da benzer bir fayın varlığını desteklemektedir (Şekil 4.7). Bölüm 3.1.1'de önceden bahsedildiği gibi çöküntü alanlarının alt ( $K_3$ ), orta ( $K_2$ ) ve üst ( $K_1$ ) olmak üzere ikisi ana, üç plakadan oluştuğu belirlenmiştir (bkz. Şekil 3.3) ancak doğal örneklerden yalnızca Emi Koussi kalderası üç plakadan oluşmaktadır (Şekil 4.7). Diğer kaldera örneklerinin ise sadece  $K_1$  ve  $K_2$  olmak üzere iki plakadan oluştuğu gözlenmiştir. Plakalar arası çökme miktarları ' $(K_1-K_2)$  ve ' $(K_1-K_3)$ ' hesaplanmıştır (Çizelge 4.2). Nemrut ve Ngozi kaldera göllerinin batimetrik verisi de hesaplamalara eklenerek sonuçlar sunulmuştur. Batimetrik ölçümlere göre, Nemrut kaldera gölünün ortalama derinliği 140 metre (Ulusoy ve ark., 2008), Ngozi kaldera gölünün derinliği de 83 metre (Jolie, 2019) alınmıştır. Böylece, Nemrut'un ( $K_1-K_2$ ) sonucu 0,235 km, Ngozi'nin ( $K_1-K_2$ ) sonucu 0,261 km olarak hesaplanmıştır. Kaldera modellerinde ( $K_1-K_3$ ) miktarı 0,689 – 0,947 cm arasında değişirken, Emi Koussi kalderasında bu miktar 0,384 km olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, oluşturulan kaldera modellerinin sonuçları (Çizelge 3.2) ile bir grafik üzerinde karşılaştırılmıştır (Şekil 4.9). Buna göre, kalderaların aspekt oranının artmasıyla,  $K_1$  ve  $K_2$  bloklarının bağıl çökme miktarının -kaba bir bağıntı ile de olsa- eksponansiyel olarak azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.9). Yani, kalderaların eliptikliği arttıkça,  $K_1$  ve  $K_2$  blokları arasındaki çökme miktarı azalmaktadır.



**Şekil 4.7.** Doğadaki kaldera örneklerinin yapısal unsurlarını gösteren şekil (Acigöl kalderasının topoğrafik kaldera sınırı **Ulusoy ve ark. (2009)**'dan alınarak belirlenmiştir).



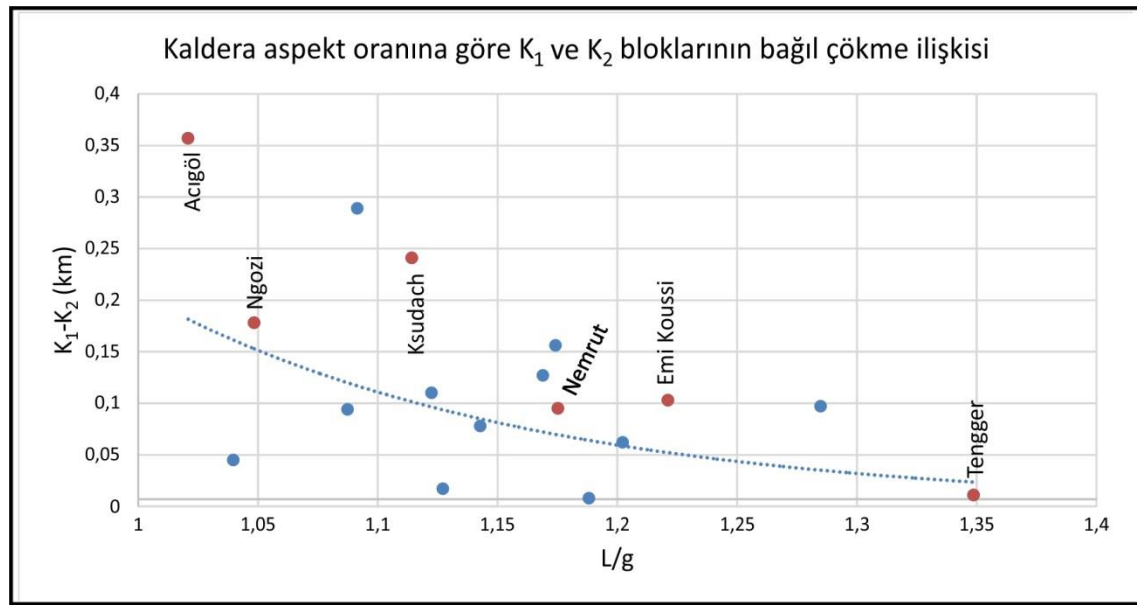


**Şekil 4.8.** Çeyranuçan çamur volkanının iki farklı deformasyon alanının yapısal bir sınır tarafından ayrıldığını gösteren şekil (Fotoğraf: Doç. Dr Orhan Abbasov).



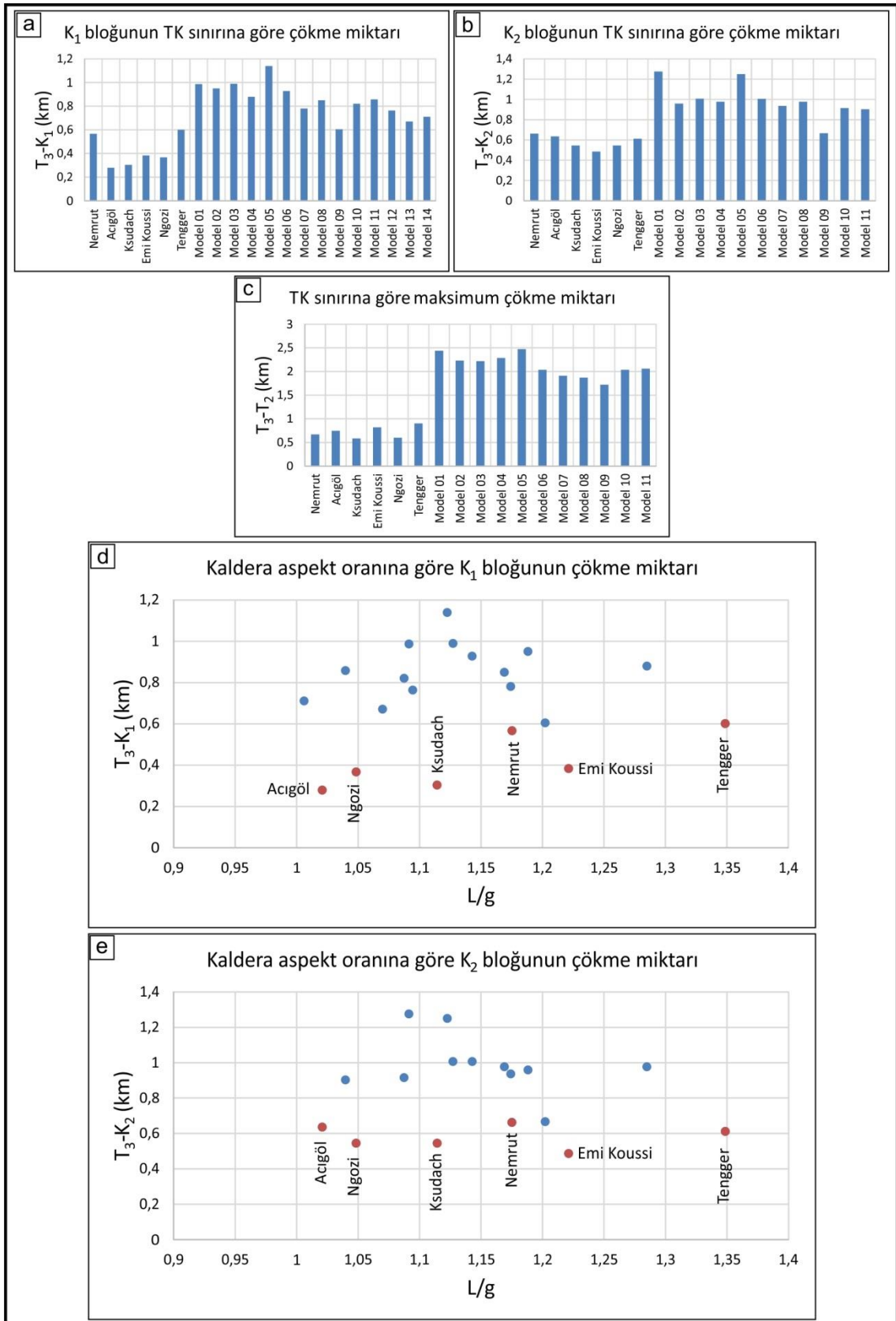
**Çizelge 4.2.** Doğadaki kaldera örneklerinin plakaları arasındaki çökme miktarını gösteren çizelge.

| Kalderalar | $K_1$ (km) | $K_2$ (km) | $K_3$ (km) | $K_1-K_2$ (km) | $K_1-K_3$ (km) |
|------------|------------|------------|------------|----------------|----------------|
| Nemrut     | 2,35       | 2,255      | -          | 0,235          | -              |
| Acıgöl     | 1,693      | 1,336      | -          | 0,357          | -              |
| Ksudach    | 0,664      | 0,423      | -          | 0,241          | -              |
| Tengger    | 2,124      | 2,113      | -          | 0,011          | -              |
| Ngozi      | 2,257      | 2,079      | -          | 0,261          | -              |
| Emi Koussi | 3,066      | 2,963      | 2,682      | 0,103          | 0,384          |



**Şekil 4.9.** Kaldera aspekt oranına göre  $K_1$  ve  $K_2$  bloklarının bağıl çökme ilişkisini gösteren grafik (kırmızı renkli noktalar doğadaki kalderaları, mavi renkli noktalar kaldera modellerini göstermektedir).

Kalderaların topoğrafik çökme miktarı ile kaldera modellerinin topoğrafik çökme miktarını karşılaştırmak amacıyla Bölüm 3.1.1’de bahsedildiği gibi çeşitli parametreler belirlenmiştir (bkz. Şekil 3.2). Buna göre,  $T_2$  çökmenin maksimum olduğu noktayı ve  $T_3$  kaldera sınırının maksimum yüksekliğini belirtmektedir (Çizelge 4.3). Buna göre,  $(T_3-T_2)$  değeri ile doğadaki kaldera örneklerinin topoğrafik kaldera sınırındaki maksimum çökme miktarları hesaplanmıştır. Sonuçlar, oluşturulan kaldera modellerinin sonuçları (Çizelge 3.3) ile bir grafik oluşturularak karşılaştırılmıştır (Şekil 4.10c).



**Şekil 4.10.** Kaldera modelleri ile doğadaki kalderaların çökme miktarlarını karşılaştıran şekil (kırmızı renkli noktalar doğadaki kalderaları, mavi renkli noktalar kaldera modellerini göstermektedir, TK: topoğrafik kaldera).

**Çizelge 4.3.** Doğadaki kaldera örneklerinin topoğrafik çökme miktarlarını gösteren çizelge.

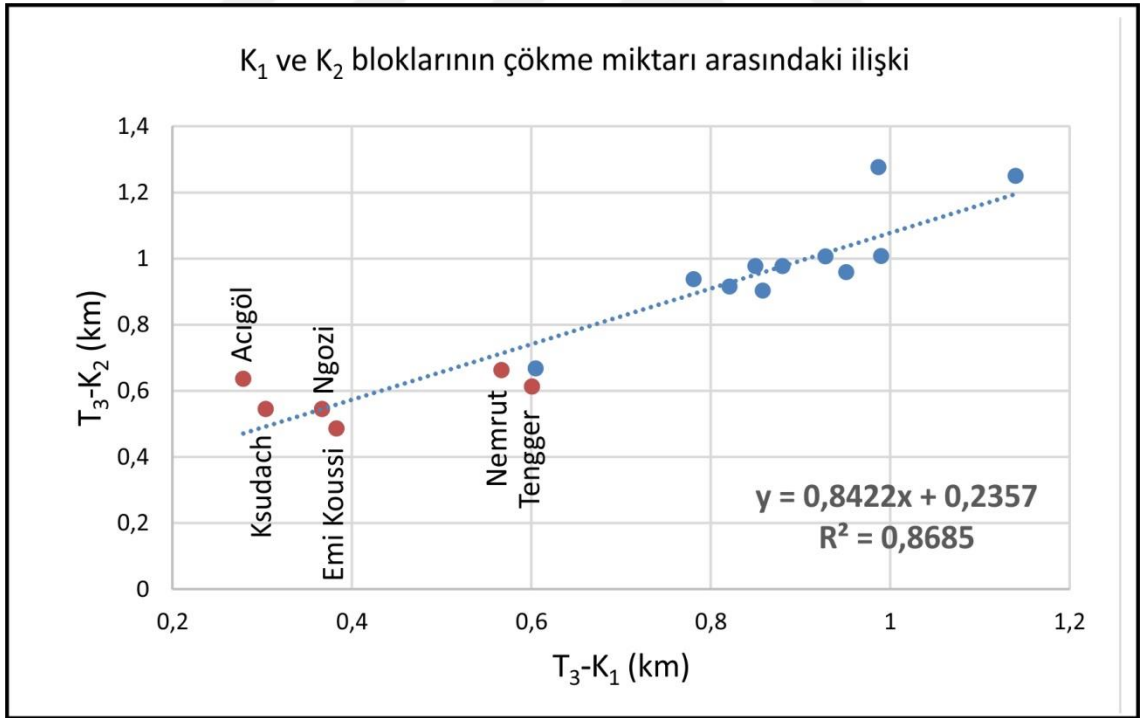
| Kalderalar | T <sub>2</sub> (km) | T <sub>3</sub> (km) | T <sub>3</sub> -T <sub>2</sub> (km) |
|------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|
| Nemrut     | 2,245               | 2,917               | 0,672                               |
| Acıgöl     | 1,225               | 1,972               | 0,747                               |
| Ksudach    | 0,382               | 0,968               | 0,586                               |
| Tengger    | 1,821               | 2,725               | 0,904                               |
| Ngozi      | 2,022               | 2,624               | 0,602                               |
| Emi Koussi | 2,627               | 3,449               | 0,822                               |

Plakaların çökme yüksekliklerine dair hesaplamalara devam etmek için Bölüm 3.1.1’de bahsedildiği gibi K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> ve K<sub>3</sub> plakalarının ortalama yükseklikleri sayısal yükseklik modellerinden hesaplanmıştır (Şekil 3.2). (T<sub>3</sub>-K<sub>1</sub>) üst plakanın maksimum topoğrafik çökme yüksekliğini verirken, (T<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>) orta plakanın ve (T<sub>3</sub>-K<sub>3</sub>) alt plakanın maksimum topoğrafik çökme yüksekliğini belirtmektedir (Çizelge 4.4). Nemrut ve Ngozi kaldera göllerinin derinliği yine hesaplamalara eklenmiştir. Bu iki kaldera gölünün derinliği dahil edildiğinde Nemrut kaderası için (T<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>) değeri 0,802 km, Ngozi kalderası için (T<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>) değeri 0,628 km olarak hesaplanmıştır ve grafik üzerinde bu değerler dikkate alınarak sunulmuştur. Yalnızca Emi Koussi kalderasının üç plakadan oluşmasına bağlı olarak (T<sub>3</sub>-K<sub>3</sub>) miktarı, kaldera modellerinde 1,294 – 1,98 cm arasında değişirken, Emi Koussi kalderasında bu miktar 0,767 km olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, deneysel kaldera modellerinin sonuçları (Çizelge 3.4) ile grafikler üzerinde karşılaştırılmıştır (Şekil 4.10a, b). Modellerdeki çökme miktarları doğadakinden daha yüksek sonuç vermektedir. Bunun temel nedenlerinden biri doğadaki erozyon ve kaldera oluşumu sonrası kaldera içi faaliyetin de kaldera içi dolgu oluşturmalarıdır (Şekil 4.10a, b, c). Deneysel modellerde ise model oluşumundan hemen sonra, en derin çatlaklar ve en keskin topoğrafik sınırlar henüz yıkılmamışken model topoğrafyası ölçülmüştür. Örneğin Nemrut kalderasında gölün ortalama derinliği 140 metre olmasına rağmen ölçülen maksimum derinlik 178 metredir (Ulusoy ve ark., 2008). Bu en derin noktaya göre hesaplanacak olsa, (T<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>) değeri Nemrut için 0,700 olacaktır. Buna bağlı olarak kaldera aspekt oranına göre K<sub>1</sub> ve K<sub>2</sub> bloklarının topoğrafik çökme miktarı arasında önemli bir bağıntı gözlenememiştir (Şekil 4.10d, e).

**Çizelge 4.4.** Doğadaki kaldera örneklerinin plakalarının maksimum topoğrafik çökme yüksekliklerini gösteren çizelge.

| Kalderalar | K <sub>1</sub> (km) | K <sub>2</sub> (km) | K <sub>3</sub> (km) | T <sub>3</sub> (km) | T <sub>3</sub> -K <sub>1</sub> (km) | T <sub>3</sub> -K <sub>2</sub> (km) | T <sub>3</sub> -K <sub>3</sub> (km) |
|------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Nemrut     | 2,35                | 2,255               | -                   | 2,917               | 0,567                               | 0,802                               | -                                   |
| Acıgöl     | 1,693               | 1,336               | -                   | 1,972               | 0,279                               | 0,636                               | -                                   |
| Ksudach    | 0,664               | 0,423               | -                   | 0,968               | 0,304                               | 0,545                               | -                                   |
| Tengger    | 2,124               | 2,113               | -                   | 2,725               | 0,601                               | 0,612                               | -                                   |
| Ngozi      | 2,257               | 2,079               | -                   | 2,624               | 0,367                               | 0,628                               | -                                   |
| Emi Koussi | 3,066               | 2,963               | 2,682               | 3,449               | 0,383                               | 0,486                               | 0,767                               |

Doğadaki kalderalar ile kaldera modellerinin K<sub>1</sub> ve K<sub>2</sub> blokları arasındaki çökme miktarlarını karşılaştırmak amacıyla T<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>'ye karşılık T<sub>3</sub>-K<sub>1</sub> grafiği oluşturulmuştur (Şekil 4.11). Buna göre, K<sub>1</sub> ve K<sub>2</sub> bloklarının çökme miktarı arasında doğrusal bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 4.11.** Kalderaların K<sub>1</sub> ve K<sub>2</sub> bloklarının çökme miktarı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (kırmızı renkli noktalar doğadaki kalderaları, mavi renkli noktalar kaldera modellerini göstermektedir).

## 5. SONUÇLAR

Analog ve nümerik yöntemlerle kaldera modelleri oluşturularak parçalı kaldera çökmesi ve magma odasının yanal genişlemesine bağlı olarak çatı bloğunda oluşan deformasyon incelenmiştir. Bu tez ile ülkemizde ilk kez deneysel yöntemle kaldera oluşumu modelleri üzerine bir çalışma yapılmıştır.

Kum havuzu deneyleriyle analog kaldera modelleri oluşturulmuş ve Hareketten-Yapı Çok-bakılı Stereofotogrametri (HY-ÇBS) yöntemi ile yüksek çözünürlüklü üç boyutlu yüzey modelleri elde edilmiştir. Stereografik modelleme tekniği ile kaldera oluşumunun yüzeysel modellemesi Liu ve ark. (2017a) ile birlikte Dünya’da ilk kez bu çalışma ile gerçekleştirilmiştir; ilk sonuçlar iki uluslararası kongrede poster olarak (Ulusoy ve ark., 2016a; Aydın ve ark., 2018), bir yurtiçi çalıştayda da sözlü olarak (Ulusoy ve ark., 2016b) sunulmuştur.

Analog kaldera modellerinin oluşum evreleri, sayısal yükseklik modelleri ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimi gösteren modeller oluşturularak incelenmiştir. Yükseklik modelleri, kalderaların şekli, topoğrafik çökme miktarı, plakaların çökme yükseklikleri gibi sayısal yöntemlerle kıyaslanarak model yüzeyinde oluşan yapısal unsurlar incelenmiştir. Buna göre, çökme dairesele doğru gittikçe huni tipine benzer çökme gözlenmeye başlamış, K<sub>3</sub> bloğu çöken yapının orta kısmına denk gelmiştir. Çökme eliptik şekle doğru gittikçe iki ana bloktan oluşan parçalı bir çökme gözlendiği ve K<sub>3</sub> bloğunun daha aşağı çöken K<sub>2</sub> bloğu içinde kaldığı gözlenmiştir.

Oluşturulan analog modeller ile magma odasının yanal genişlemesine bağlı olarak, çatı bloğunda eşit olmayan bir deformasyon olduğu belirlenmiştir. Çökme esnasında bu çatı bloğunun farklı derinliklerde ve ayrı bloklar halinde çöktüğü ve çift pistonlu parçalı kalderalar oluşturduğu gözlenmiştir. Çöken iki farklı deformasyon alanının doğrusal bir yapısal sınır tarafından ayrıldığı belirlenmiştir, bu yapısal sınır ‘blok fayı’ olarak adlandırılmıştır.



Sayısal parçacık takip algoritmalarıyla oluşturulan analog modellerin yüzey deformasyonu incelenmiştir. Diğer modellerde de gözlemlendiği gibi magma odasının yanal hareketine bağlı olarak yüzeyde iki farklı deformasyon alanının oluştuğu belirlenmiştir.

Kum havuzu deneyleriyle oluşturulan sabitlenmiş analog modellerin X-ışını Tomografi / X-ışını Mikro-CT yöntemi ile iç yapısal unsurları üç boyutta incelenmiştir. Bu yapısal unsurların içe doğru dalımlı normal faylar, dışa doğru dalımlı ters faylar, ışınsal faylar ve kalderayı çevreleyen sınır faylarından (çember fayı) oluştuğu gözlenmiştir. Modelin kesit görüntüleri üzerinde de deformasyon incelenmiş ve yer değiştirme miktarı belirlenmiştir. X-ışınları bilgisayarlı tomografi yöntemi kaldera deneylerinde çok yeni uygulamaları denenen bir yöntemdir. Bir mikro kalderanın oluşumunu izleyen (Kervyn ve ark., 2010)'un çalışması, magma intrüzyonlarını modellemeye çalışan (Poppe ve ark., 2019)'un çalışması ile beraber bu çalışma (ör., Aydın ve ark., 2018), volkanolojik deneylerin X-ışınları bilgisayarlı tomografi ile gözlenmesinin Dünya'daki ilk örneklerindendir. Oluşturduğumuz deney düzeneğinin kendine özgü yenilikleri vardır: kum havuzu deney düzeneğinin sabitlenmesi ve farklı yoğunluktaki malzemelerin kontrastıyla fay sistemlerinin bu boyutta bir örnekle incelenmesi Dünya'da ilk kez bu tez çalışması kapsamında uygulanmıştır.

Böylece, yapılan kum havuzu deneyleri sonucunda magma odasının yanal hareketinin çift pistonlu parçalı kaldera çökmelerinin oluşumunda etkili olduğu belirlenmiştir.

Modellerin gerçek boyutlar, parametreler ve fiziksel koşullar altında incelenmesi amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak nümerik modellemeler oluşturulmuştur. Sonuçta oluşan stres dağılımları ve yüzey deformasyonu sayısal olarak incelenmiştir. Von mises gerilme ve yer değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Magma odasının şeklinin, derinliğinin ve topoğrafyanın çatı bloğundaki gerilme ve yer değiştirme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Buna göre, magma odasının şeklinin etkisi incelendiğinde, dairesel magma odalarının çatı bloğunda oluşturduğu gerilmenin ve yer değiştirmenin eliptik şekilli magma odalarına göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Magma odasının derinliğinin etkisi incelendiğinde ise, magma odasının derinliği arttıkça çatı bloğunda oluşturduğu gerilme ve yer değiştirmenin azaldığı ve 7 km derinlikten itibaren gerilmenin yüzeye kadar ulaşamadığı belirlenmiştir.

Oluşturulan modeller doğada parçalı çökme ile oluşan Nemrut, Acıgöl, Tengger, Ngozi, Emi Koussi, Ksudach kalderaları ve Çeyranuçan çamur volkanı çöküntüsü ile karşılaştırılmıştır. Analog kaldera modellerinde olduğu gibi doğadaki bazı kaldera örneklerinde de çökme esnasında çatı bloğunun farklı derinliklerde ve ayrı bloklar halinde çöktüğu görülebilmektedir ve çöken bu iki farklı deformasyon alanının doğrusal bir yapısal sınır tarafından ayrıldığı (blok fayı) gözlenmektedir. Doğadaki kaldera örneklerinde ve oluşturduğumuz modelde kaldera duvarındaki en yüksek topoğrafik noktaya göre iki bloğun bağıl olarak çökme miktarlarında ilişki olduğu gösterilmiştir.



## 6. KAYNAKLAR

- Acocella, V., Understanding caldera structure and development: An overview of analogue models compared to natural calderas, *Earth-Science Reviews*, 85, 125–160, **2007**.
- Acocella, V., Cifelli, F., Funiciello, R., Analogue models of collapse calderas and resurgent domes, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 104, 81–96, **2000**.
- Acocella, V., Cifelli, F., Funiciello, R., Formation of nonintersecting nested calderas: Insights from analogue models. *Terra Nova*, 13, 58–63, **2001**.
- Acocella, V., Funiciello, R., Marotta, E., Orsi, G., de Vita, S., The role of extensional structures on experimental calderas and resurgence, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 129, 199–217, **2004**.
- Agisoft, Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition. Copyright © 2018 Agisoft LLC 127, **2018**.
- Aramaki, S., Formation of the Aira Caldera, southern Kyushu, ~22 000 years ago, *Journal of Geophysical Research*, 89, 8485–8501, **1984**.
- Aydın, E., Ulusoy, İ., Akkaş, E., Analogue and Numerical modelling of double-piston piecemeal calderas. *Cities on Volcanoes 10*, Napoli, Italy, Miscellanea, INGV Abstracts Volume of the International meeting 43, Sept. 2-7, **2018**.
- Baker, D., Robert, G., Rivers, M., Allard, E. and Larocque, J., Advanced Photon Source Activity Report for 2003: Bubble Size Distributions in Silicate Foams Measured by X-ray Microtomography, **2003**.
- Bathke, H., Nikkhoo, M., Holohan, E.P., Walter, T.R., Insights into the 3D architecture of an active caldera ring-fault at Tendürek volcano through modeling of geodetic data, *Earth and Planetary Science Letters*, 422, 157–168, **2015**.

- Bemis, S.P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M.R., Akciz, S., T. Thiele, S., Bangash, H.A., Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology, *Journal of Structural Geology*, 69, 163–178, **2014**.
- Bianchi, R., Coradini, A., Federico, C., Giberti, G., Sartoris, G., Scandone, R., Modelling of surface ground deformations in the Phlegraean Fields volcanic area, Italy, *Bulletin of Volcanology*, 47 (2), 321–330, **1984**.
- Boutelier, D., TecPIV-A MATLAB-based application for PIV-analysis of experimental tectonics, *Computers & Geosciences*, 89, 186–199, **2016**.
- Branney, M.J., Downsag and extension at calderas: new perspectives on collapse geometries from ice-melt, mining, and volcanic subsidence. *Bulletin of Volcanology*, 57, 303–318, **1995**.
- Branney, M.J., Kokelaar, P., Volcanotectonic faulting, soft-state deformation, and rheomorphism of tuffs during development of a piecemeal caldera, English Lake District, *Geological Society of America Bulletin*, 106, 507–530, **1994**.
- Browning, J., Thermo-Mechanical Effects of Magma Chambers and Caldera Faults, PhD Thesis, Department of Earth Sciences Royal Holloway, University of London, **2015**.
- Browning, J., Gudmundsson, A., Surface displacements resulting from magma-chamber roof subsidence, with application to the 2014-2015 Bardarbunga-Holuhraun volcanotectonic episode in Iceland, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 308, 82–98, **2015**.
- Cailleau, B., Walter, T.R., Janle, P., Hauber, E., Modeling volcanic deformation in a regional stress field: Implications for the formation of graben structures on Alba Patera, Mars, *Journal of Geophysical Research*, 108, 15–1, **2003**.
- Charco, M., del Sastre, P.G., Efficient inversion of three-dimensional finite element models of volcano deformation, *Geophysical Journal International*, 196, 1441–1454, **2014**.
- Chen, J., Clarke, K.C., Rapid 3D Modeling Using Photogrammetry Applied to Google Earth, 14–27, **2001**.

- Cnudde, V. and Boone, M.N., High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. *Earth-Science Reviews*, 123: 1-17, **2013**.
- Cole, J.W., Milner, D.M., Spinks, K.D., Calderas and caldera structures: A review, *Earth-Science Reviews*, 69, 1–26, **2005**.
- Comsol, COMSOL Multiphysics Reference Manual, COMSOL 5.5, p.1742, **2013**.
- Corbi, F., Rivalta, E., Pinel, V., Maccaferri, F., Bagnardi, M., Acocella, V., How caldera collapse shapes the shallow emplacement and transfer of magma in active volcanoes, *Earth and Planetary Science Letters*, 431, 287–293, **2015**.
- Çubukçu, H.E., Ulusoy, I., Aydar, E., Ersoy, O., Şen, E., Gourgand, A., Guillou, H., Mt. Nemrut volcano (Eastern Turkey): Temporal petrological evolution, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 209–210, 33–60, **2012**.
- de Silva, S.L., Mucek, A.E., Gregg, P.M., Pratomo, I., Resurgent Toba—field, chronologic, and model constraints on time scales and mechanisms of resurgence at large calderas. *Frontiers in Earth Science*, 3, 1–17, **2015**.
- Dhatt, G., Touzot, G., Lefrançois, E., Finite element method, ISTE Ltd. and John Wiley & Sons Inc., <http://dx.doi.org/10.1002/9781118569764>, **2012**.
- Dieterich, J.H., Decker, R.W., Finite element modeling of surface deformation associated with volcanism, *Journal of Geophysical Research*, 80 (29), 4094–4102, <http://dx.doi.org/10.1029/JB080i029p04094>, **1975**.
- Dutton, C. E., Hawaiian volcanoes, Fourth annual report of the United States Geological Survey, 1882–83, Government Printing Office, Washington, D.C., 75–219, **1884**.
- Favalli, M., Fornaciai, A., Isola, I., Tarquini, S., Nannipieri, L., Multiview 3D reconstruction in geosciences, *Computers & Geosciences*, 44, 168–176, **2012**.
- Flannery, B.P., Deckman, H.W., Roberge, W.G. and D'Amico, K.L., Three-dimensional X-ray microtomography, *Science*, 237: 1439-1445, **1987**.
- Fleming, Z., Pavlis, T., An orientation based correction method for SfM-MVS point clouds—Implications for field geology, *Journal of Structural Geology*, 113, 76–89, **2018**.
- Fouqué, F. A., Santorin et ses éruptions, Paris, G. Masson, **1879**.



- Furukawa, Y., Ponce, J., Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 32, 1362–1376, **2010**.
- Galetto, F., Acocella, V., Caricchi, L., Caldera resurgence driven by magma viscosity contrasts, *Nature Communications*, 8, 1–11, **2017**.
- Galgana, G., McGovern, P., Grosfils, E., Coupled Models of Lithospheric Flexure and Magma Chamber Pressurization at Large Volcanoes on Venus, *COMSOL Conference*, Boston, **2009**.
- Geyer, A., Folch, A., Martí, J., Relationship between caldera collapse and magma chamber withdrawal: An experimental approach, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 157, 375–386, **2006**.
- Geyer, A., Martí, J., The new worldwide collapse caldera database (CCDB): A tool for studying and understanding caldera processes, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175, 334–354, **2008**.
- Gong, Y., Wang, Y.F., Multi-view stereo point clouds visualization, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 6938 LNCS, 281–290, **2011**.
- Gregg, P.M., Grosfils, E.B., de Silva, S.L., Catastrophic caldera-forming eruptions II: The subordinate role of magma buoyancy as an eruption trigger, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 305, 100–113, **2015**.
- Gudmundsson, A., Conceptual and numerical models of ring-fault formation, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 164, 142–160, **2007**.
- Gurioli, L., Harris, A., Houghton, B., Polacci, M. and Ripepe, M., Textural and geophysical characterization of explosive basaltic activity at Villarrica volcano, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B8), **2008**.
- Hickey, J., Gottsmann, J., Benchmarking and developing numerical Finite Element models of volcanic deformation, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 280, 126–130, **2014**.
- Holohan, E.P., Troll, V.R., Walter, T.R., Münn, S., McDonnell, S., Shipton, Z.K., Elliptical calderas in active tectonic settings: An experimental approach, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 144, 119–136, **2005**.

- Holohan, E.P., Schöpfer, M.P.J., Walsh, J.J., Mechanical and geometric controls on the structural evolution of pit crater and caldera subsidence, *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 116, 1–23, **2011**.
- James, M.R., Robson, S., Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application, *Journal of Geophysical Research*, 117, 1–17, **2012**.
- Javernick, L., Brasington, J., Caruso, B., Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry, *Geomorphology*, 213, 166–182, **2014**.
- Jolie, E., Detecting gas-rich hydrothermal vents in Ngozi Crater Lake using integrated exploration tools, *Scientific Reports*, 9, 1–5, **2019**.
- Kennedy, B., Stix, J., Vallance, J.W., Lavallée, Y., Longpré, M.A., Controls on caldera structure: Results from analogue sandbox modeling, *Geological Society of America Bulletin*, 116, 515–524, **2004**.
- Kervyn, M., Boone, M.N., de Vries, B. van W., Lebas, E., Cnudde, V., Fontijn, K., Jacobs, P., 3D imaging of volcano gravitational deformation by computerized X-ray micro-tomography, *Geosphere*, 6, 482–498, **2010**.
- Komuro, H., Experiments on cauldron formation: a polygonal cauldron and ring fractures, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31, 139–149, **1987**.
- Komuro, H., Fujita, Y., Kodama, K., Numerical and experimental models on the formation mechanism of collapse basins during the Green Tuff orogenesis of Japan, *Bulletin of Volcanology*, 47, 649–666, **1984**.
- Landis, E.N. and Keane, D.T., X-ray microtomography, *Materials Characterization*, 61(12): 1305-1316, **2010**.
- Lavallée, Y., Stix, J., Kennedy, B., Richer, M., Longpré, M.A., Caldera subsidence in areas of variable topographic relief: Results from analogue modeling, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 129, 219–236, **2004**.
- Lipman, P.W., Caldera-collapse breccias in the western San Juan Mountains, Colorado, *Geological Society of America Bulletin*, 87, 1397–1410, **1976**.

- Lipman, P.W., The roots of ash flow calderas in western North America: windows into the tops of granitic batholiths, *Journal of Geophysical Research*, 89, 8801–8841, **1984**.
- Lipman, P.W., Subsidence of ash-flow calderas; role of magma chamber geometry, *IUGG General Assembly*, 21 (Week A), 452, **1995**.
- Lipman, P.W., Subsidence of ash-flow calderas: Relation to caldera size and magma-chamber geometry, *Bulletin of Volcanology*, 59, 198–218, **1997**.
- Liu, Y.K., Ruch, J., Bathke, H., Jonsson S., Ring fault activity at subsiding calderas studied from analogue experiments and numerical modeling, *AGU Fall Meeting*, New Orleans, **2017a**.
- Liu, Y.K., Ruch, J., Bathke, H., Jonsson S., Contemporaneous Ring Fault Activity and Surface Deformation at Subsiding Calderas studied using Analogue Experiments, *EGU General Assembly*, Vienna, Austria, **2017b**.
- Liu, Y.K., Ruch, J., Vasyura-Bathke, H., Jónsson, S., Influence of ring faulting in localizing surface deformation at subsiding calderas, *Earth and Planetary Science Letters*, 526, 115784, **2019**.
- Lockwood, J.P., Hazlett, R.W., *Volcanoes: Global Perspectives*, Wiley-Blackwell, p.550, **2010**.
- Long, Y., Long, Z., Cen, S., *Advanced Finite Element Method in Structural Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-00316-5>, **2009**.
- Lowe, D.G., Distinctive image features from scale-invariant Keypoints, *International Journal of Computer Vision*, 60, 91-110, doi:10.1023/b:visi.0000029664.99615.94, **2004**.
- Lyell, C., *A Manual of Elementary Geology* (5th edition), New York, D. Appleton and Company, **1855**.
- Marshak, S., Haq, S.S.B., Sen, P., Ramp initiation in fold-thrust belts: Insight from PIV analysis of sandbox models, *Journal of Structural Geology*, 118, 308–323, **2019**.
- Marti, J., Ablay, G.J., Redshaw, L.T., Sparks, R.S.J., Experimental studies of collapse calderas, *Journal of Geological Society*, London, 151, 919–929, **1994**.

- Mogi K., Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them, Bulletin of the Earthquake Research Institute, 36: 99-134, **1958**.
- Natale, G. De, Perillo, G., Troise, C., Gasparini, P., Vesuviano, I., Diocleziano, V., The Campi Flegrei Deep Drilling Project 'CFDDP': understanding the magma-water interplay at large calderas, Comsol Conference, Stuttgart, **2011**.
- Pepe, S., Tizzani, P., Manconi, A., Numerical Inversion of Surface Deformation at Long Valley Caldera (California) By Using 3D Mechanical Models, Comsol Conference, Paris, 2–6, **2010**.
- Pinel, V., Influence of pre-existing volcanic edifice geometry on caldera formation, Geophysical Research Letters, 38, 1–6, **2011**.
- Polacci, M., Baker, D.R., Mancini, L., Tromba, G. and Zanini, F., Three-dimensional investigation of volcanic textures by X-ray microtomography and implications for conduit processes, Geophysical Research Letters, 33(13), **2006**.
- Poppe, S., Holohan, E.P., Galland, O., Buls, N., Van Gompel, G., Keelson, B., Tournigand, P.Y., Brancart, J., Hollis, D., Nila, A., Kervyn, M., An inside perspective on magma intrusion: Quantifying 3d displacement and strain in laboratory experiments by dynamic X-ray computed tomography, Frontiers in Earth Science, 7, 1–20, **2019**.
- Roche, O., Druitt, T.H., Merle, O., Experimental study of caldera formation, Journal of Geophysical Research, 105, 395–416, **2000**.
- Rockafellar, R.T., Wets, R.J-B., Variational Analysis, Springer-Verlag, p. 117, ISBN 3-540-62772-3, **2005**.
- Scandura, D., Currenti, G., Negro, C. Del, Finite Element Models of Elasto-Plastic Deformation in Volcanic Areas, COMSOL Conference, Hannover, **2008**.
- Scarfe, W.C. and Farman, A.G., What is Cone-Beam CT and How Does it Work? Dental Clinics of North America, 52(4): 707-730, **2008**.
- Scarfe, W.C., Levin, M.D., Gane, D. and Farman, A.G., Use of Cone Beam Computed Tomography in Endodontics, International Journal of Dentistry, 2009: 634567, **2009**.

- Sigurdsson, H., Encyclopedia of volcanoes, Houghton B., McNutt S., Rymer H., Stix J. (Eds.), Academic Press, **2000**.
- Smith, R.L., Bailey, R.A., Resurgent cauldrons, Geological Society of America, 116: 83–104, **1968**.
- Tavani, S., Granado, P., Corradetti, A., Girundo, M., Iannace, A., Arbués, P., Muñoz, J.A., Mazzoli, S., Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran), Computers & Geosciences, 63, 44–53, **2014**.
- Thielicke, W., The Flapping Flight of Birds - Analysis and Application, Phd thesis, Rijksuniversiteit Groningen, <http://irs.ub.rug.nl/ppn/382783069>, **2014a**.
- Thielicke, W., PIVlab – Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB: PIVlab tutorial, [https://pivlab.blogspot.com/p/blog-page\\_19.html](https://pivlab.blogspot.com/p/blog-page_19.html), (Erişim tarihi: **9 Nisan 2019**), **2014b**.
- Thielicke, W. and Stamhuis, E.J., PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB, Journal of Open Research Software, 2(1):e30, DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jors.bl>, **2014a**.
- Thielicke, W. and Stamhuis, E. J., PIVlab - Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB, <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1092508>, **2014b**.
- Troiano, A., Giulia, M., Giuseppe, D., Troise, C., Natale, G. De, Perillo, G., Numerical Evidences of Unrest Related Electromagnetic Effects in the Campi Flegrei Caldera, Comsol Conference, Grenoble, **2015**.
- Troll, V.R., Walter, T.R., Schmincke, H.U., Cyclic caldera collapse: Piston or piecemeal subsidence? Field and experimental evidence, Geology, 30, 135–138, **2002**.
- Ullman, S., The interpretation of structure from motion, Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 203, 405–426, doi:10.1098/rspb.1979.0006, **1979**.
- Ulusoy, İ., Bodrum Kalderasının Yapısal-Volkanolojik İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2002**.

- Ulusoy, I., Cubukcu, E., Aydar, E., Labazuy, P., Gourgaud, A., Vincent, P.M., Volcanic and deformation history of the Bodrum resurgent caldera system (southwestern Turkey), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 136, 71–96, **2004**.
- Ulusoy, I., Labazuy, P., Aydar, E., Ersoy, O., Çubukçu, E., Structure of the Nemrut caldera (Eastern Anatolia, Turkey) and associated hydrothermal fluid circulation, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 174, 269–283, **2008**.
- Ulusoy, I., Labazuy, P., Aydar, E., Atak, O., Yürür, T., Artuner, H., Dahlin, T., Multisource geophysical investigation of the Acigöl caldera structure (central Turkey): preliminary results, *EGU General Assembly Conference Abstracts Vienna, Austria*, vol. 11, pp: 7746, **2009**.
- Ulusoy, İ., Aydın, E., Çubukçu, H.E., Topographic modelling of caldera analogues using Structure from Motion – Multi-view stereophotogrammetry, *EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria, Geophysical Research Abstracts Vol. 18*, **2016a**.
- Ulusoy, İ., Aydın, E., Çubukçu, H.E., Parçalı kaldera oluşumunun analog ve nümerik modellemesi, 1. Türkiye Volkanoloji Çalıştayı, MTA, Ankara, **2016b**.
- Ulusoy, İ., Şen, E., Tuncer, A., Sönmez, H., Bayhan, H., 3D Multi-view Stereo Modelling of an Open Mine Pit Using a Lightweight UAV, *Türkiye Jeoloji Bülteni/Geology Bulletin of Turkey*, 60, 223-242, **2017**.
- Verbeek, R. D. M., Krakatau, Batavia, Dutch East Indies, Landsdrukkerij, (Republished in 1886 as Krakatau, Batavia, Dutch East Indies, Imprimerie de l’Etat.), **1885**.
- von Buch, L., Über die Zusammensetzung der Basaltischen Inseln und über Erhebungs Cratere, A lecture delivered before the Prussian Academy on Sciences in May 1818, Berlin, **1820**.
- Voxler, Voxler 4: 3D Well & Volumetric Data Visualisation Quick Start Guide, Golden Software, LCC, (www.goldensoftware.com), **2015**.
- Walker, G.P.L., Downsag calderas, ring faults, caldera sizes, and incremental caldera growth, *Journal of Geophysical Research*, 89B, 8407– 8416, **1984**.
- Walter, T.R., Troll, V.R., Formation of caldera periphery faults: An experimental study, *Bulletin of Volcanology*, 63, 191–203, **2001**.



- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M., “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology*, 179, 300–314, **2012**.
- Williams, H., Calderas and their origin, *Bulletin of the Department of Geology Science*, vol. 25, University of California publications, p. 239–346, **1941**.
- Williams, H., McBirney, A.R., *Volcanology*, Freeman, Cooper and Company, San Francisco, Berkeley, CA, 397 pp, **1979**.
- Yang, X.M., Davis, P.M., Dieterich, J.H., Deformation From Inflation of a dipping finite prolate spheroid in an elastic half-space as a model for volcanic stressing, *Journal of Geophysical Research*, 93 (B5), 4249–4257, <https://doi.org/10.1029/JB093iB05p04249>, **1988**.
- Yokoyama, S., Mena, M., Structure of La Primavera caldera, Jalisco, Mexico, deduced from gravity anomalies and drilling results, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 47: 183–193, **1991**.

## **EKLER**

### **EK-A. Analog kaldera modelleri**

EK-A.1. Model 01'in sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

EK-A.2. Model 02'nin sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

EK-A.3. Model 03'ün sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

EK-A.4. Model 04'ün sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

EK-A.5. Model 05'in sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

EK-A.6. Model 06'nın sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

EK-A.7. Model 07'nin sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

EK-A.8. Model 08'in sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

EK-A.9. Model 09'un sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

EK-A.10. Model 10'un sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

EK-A.11. Model 11'in sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

EK-A.12. Model 12'nin sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

EK-A.13. Model 13'ün sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

EK-A.14. Model 14'ün sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

#### **EK-B. Düz topoğrafyaya sahip nümerik modeller**

EK-B.1.a. 8 km çapında, 4 km derindeki dairesel magma odasının 0-10 s aralığındaki yer değiştirme ve stres dağılımını gösteren şekil.

EK-B.1.b. 8 km çapında, 4 km derindeki dairesel magma odasının, yüzeyden itibaren 1-3 km derinlikteki yer değiştirme ve stres grafikleri.

#### **EK-C. 1000 m yükseltili topoğrafyaya sahip nümerik modeller**

EK-C.1.a. 12 km çapında, 4 km derindeki eliptik şekilli magma odasının 0-10 s aralığındaki yer değiştirme ve stres grafikleri.

EK-C.1.b. 12 km çapında, 4 km derindeki eliptik şekilli magma odasının, yüzeyden itibaren 1-3 km derinlikteki yer değiştirme ve stres grafikleri.

#### **EK-D. 2000 m yükseltili topoğrafyaya sahip nümerik modeller**

EK-D.1.a. 16 km çapında, 4 km derindeki eliptik şekilli magma odasının 0-10 s aralığındaki yer değiştirme ve stres grafikleri.

EK-D.1.b. 16 km çapında, 4 km derindeki eliptik şekilli magma odasının, yüzeyden itibaren 1-3 km derinlikteki yer değiştirme ve stres grafikleri.

EK-D.2.a. 16 km çapında, 5 km derindeki eliptik şekilli magma odasının 0-10 s aralığındaki yer değiştirme ve stres grafikleri.

EK-D.2.b. 16 km çapında, 5 km derindeki eliptik şekilli magma odasının, yüzeyden itibaren 1-4 km derinlikteki yer değiştirme ve stres grafikleri.

EK-D.3.a. 16 km çapında, 6 km derindeki eliptik şekilli magma odasının 0-10 s aralığındaki yer değiştirme ve stres grafikleri.

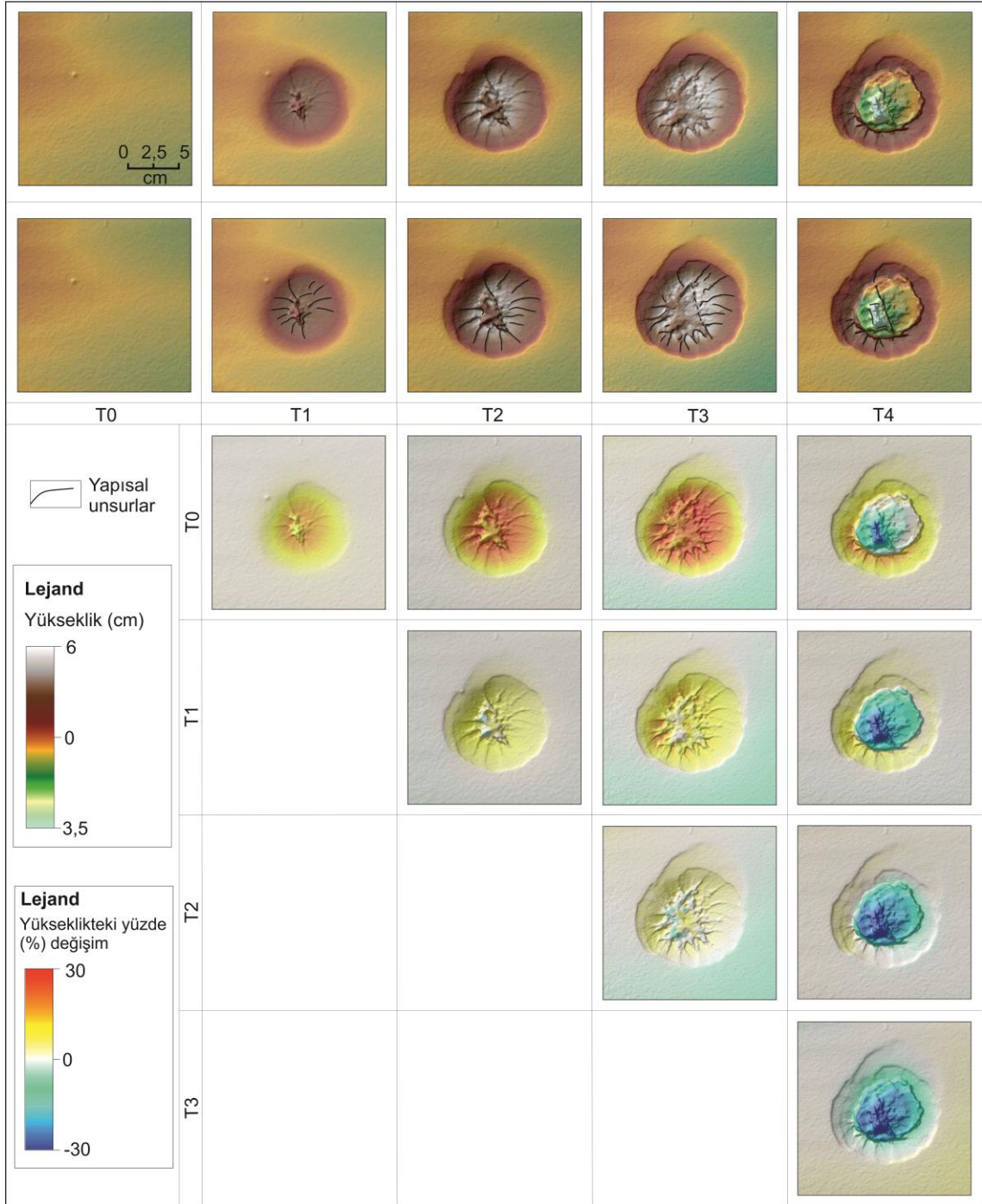
EK-D.3.b. 16 km çapında, 6 km derindeki eliptik şekilli magma odasının, yüzeyden itibaren 1-5 km derinlikteki yer değiştirme ve stres grafikleri.

#### **EK-E. Nümerik modellerin tamamı (Dijital Ek, CD).**

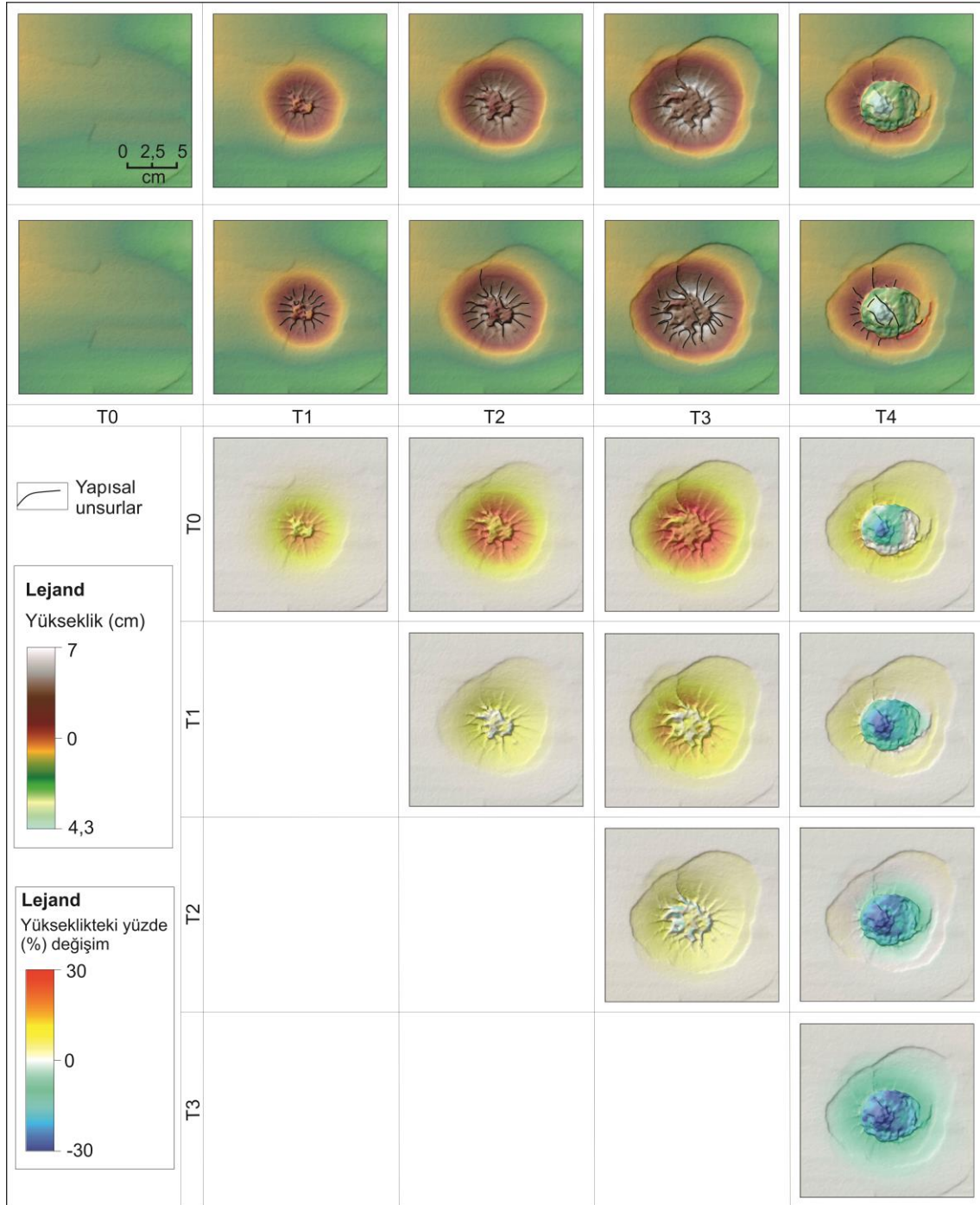
#### **EK-F. Tezden Türetilmiş Bildiriler**

## EK-A. Analog kaldera modelleri

**EK-A.1.** Model 01'in sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.



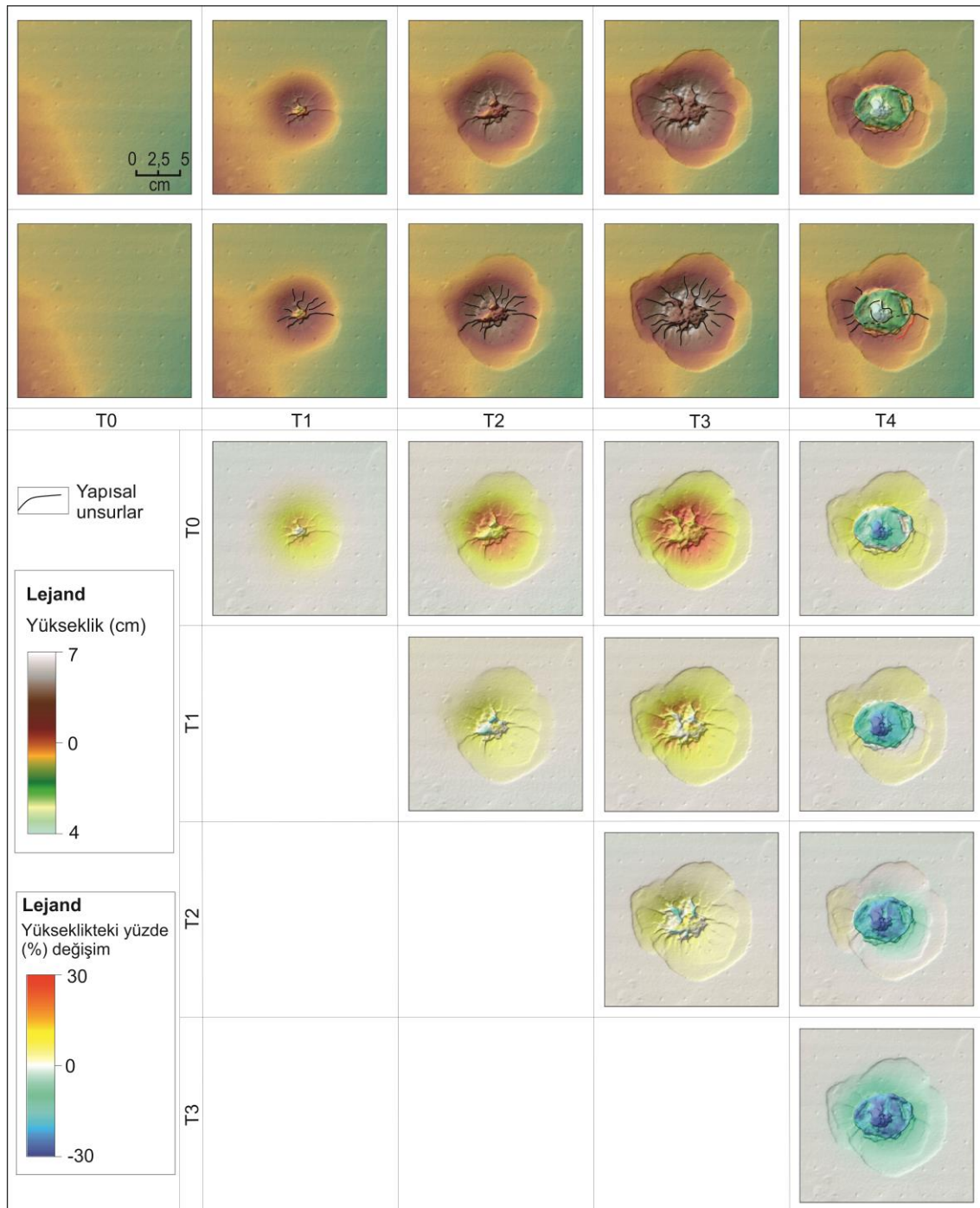
**EK-A.2.** Model 02'nin sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.



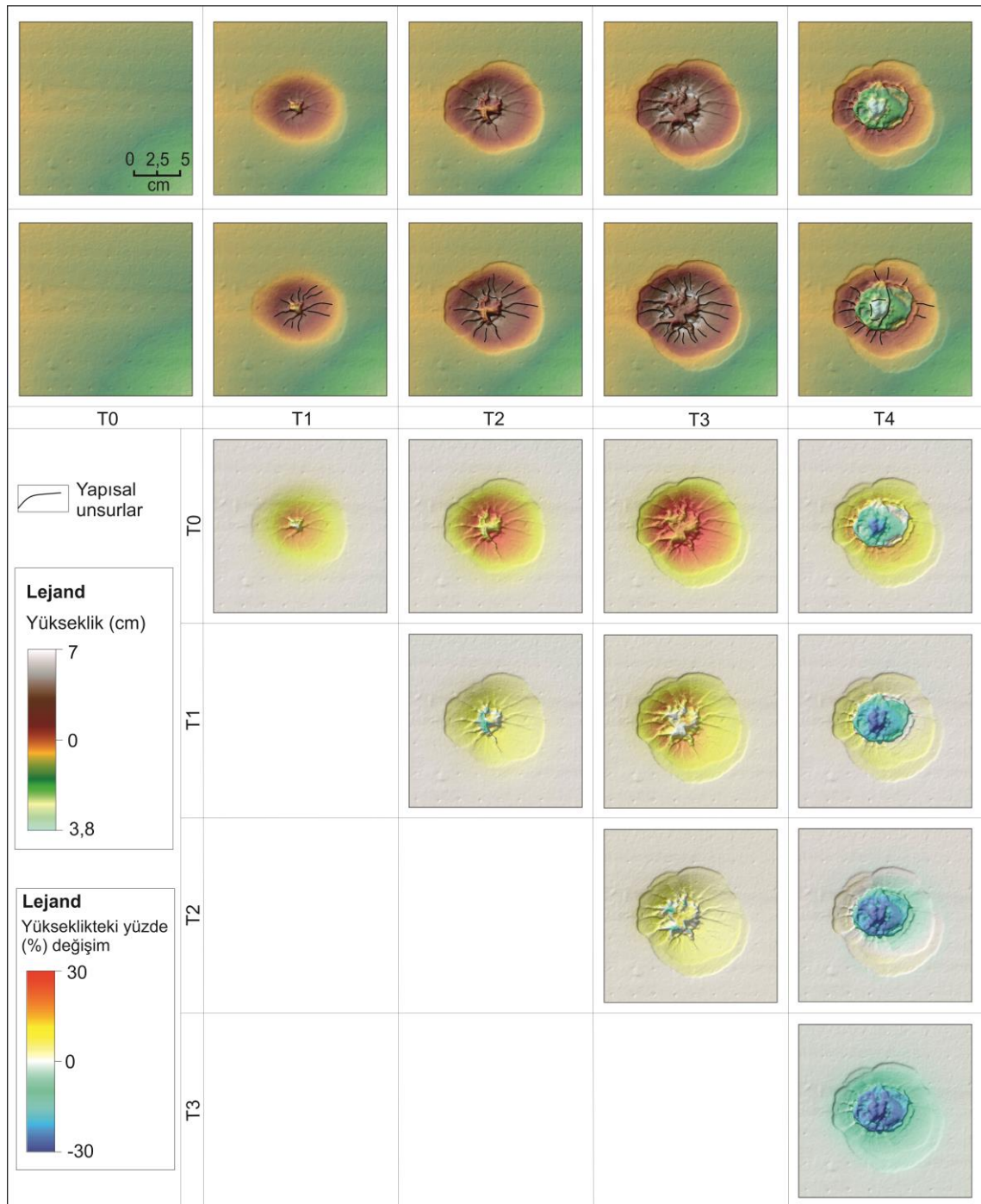
|                                                      |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|------------------------------------------------------|--|----|--|----|--|----|--|----|--|
|                                                      |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
| T0                                                   |  | T1 |  | T2 |  | T3 |  | T4 |  |
| Yapısal unsurlar                                     |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
| <b>Lejand</b><br>Yükseklik (cm)<br>                  |  | T0 |  | T1 |  | T2 |  | T3 |  |
| <b>Lejand</b><br>Yükseklikteki yüzde (%) değişim<br> |  | T0 |  | T1 |  | T2 |  | T3 |  |



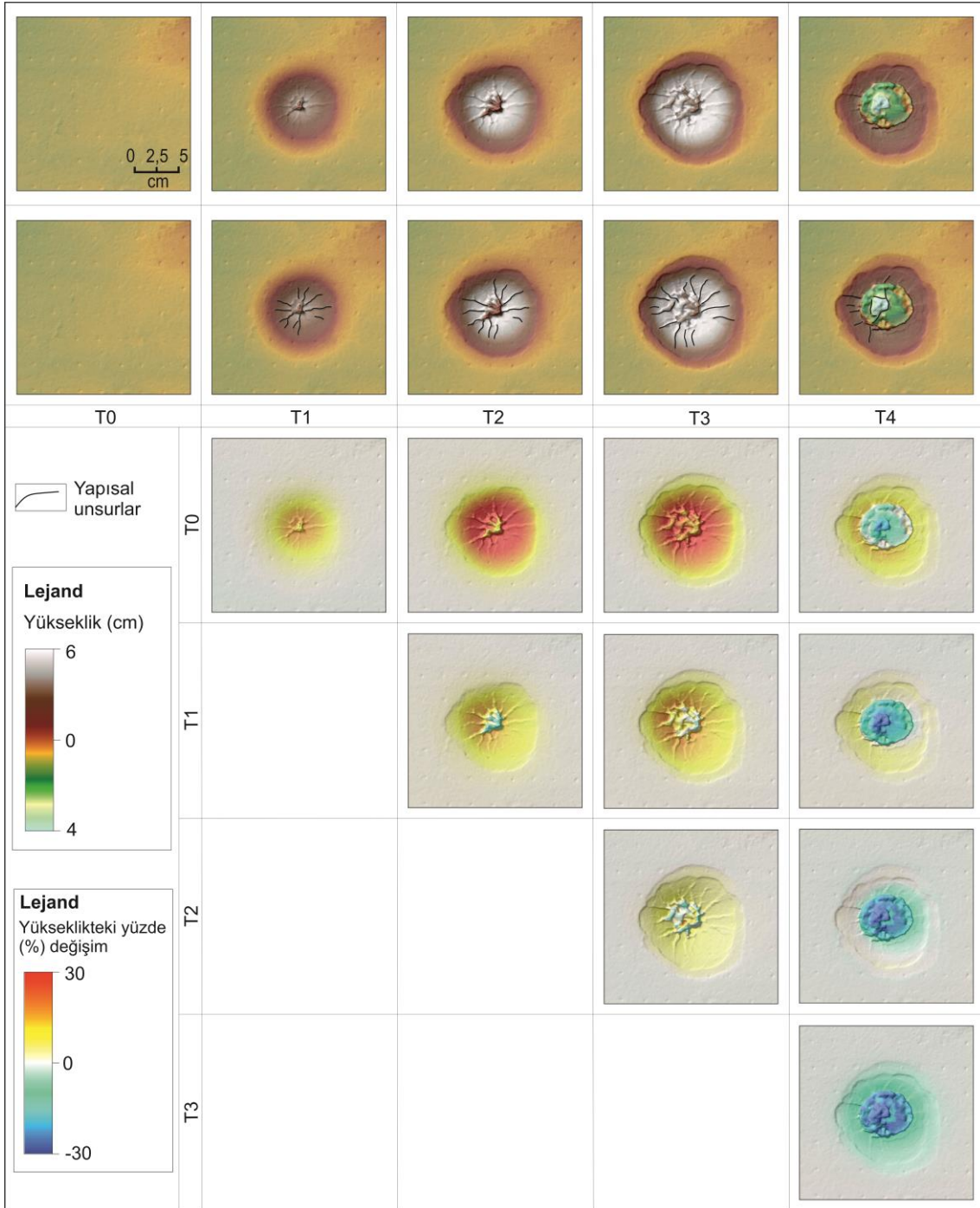
**EK-A.4.** Model 04'ün sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdeler (%) değişimini gösteren şekil.



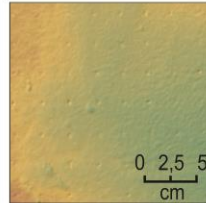
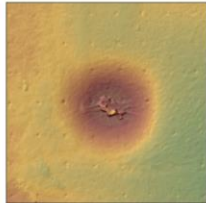
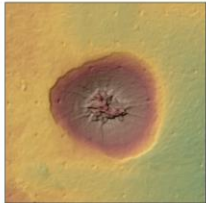
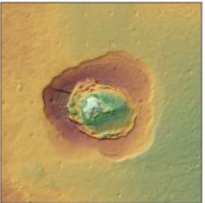
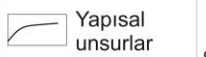
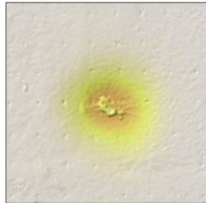
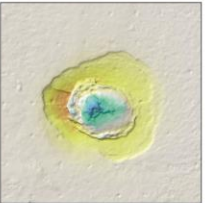
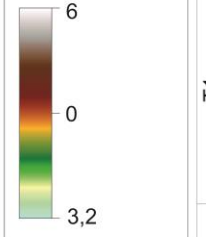
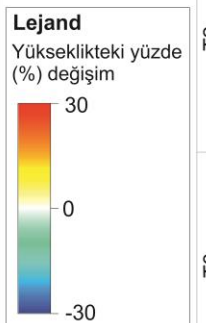
**EK-A.5.** Model 05'in sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.



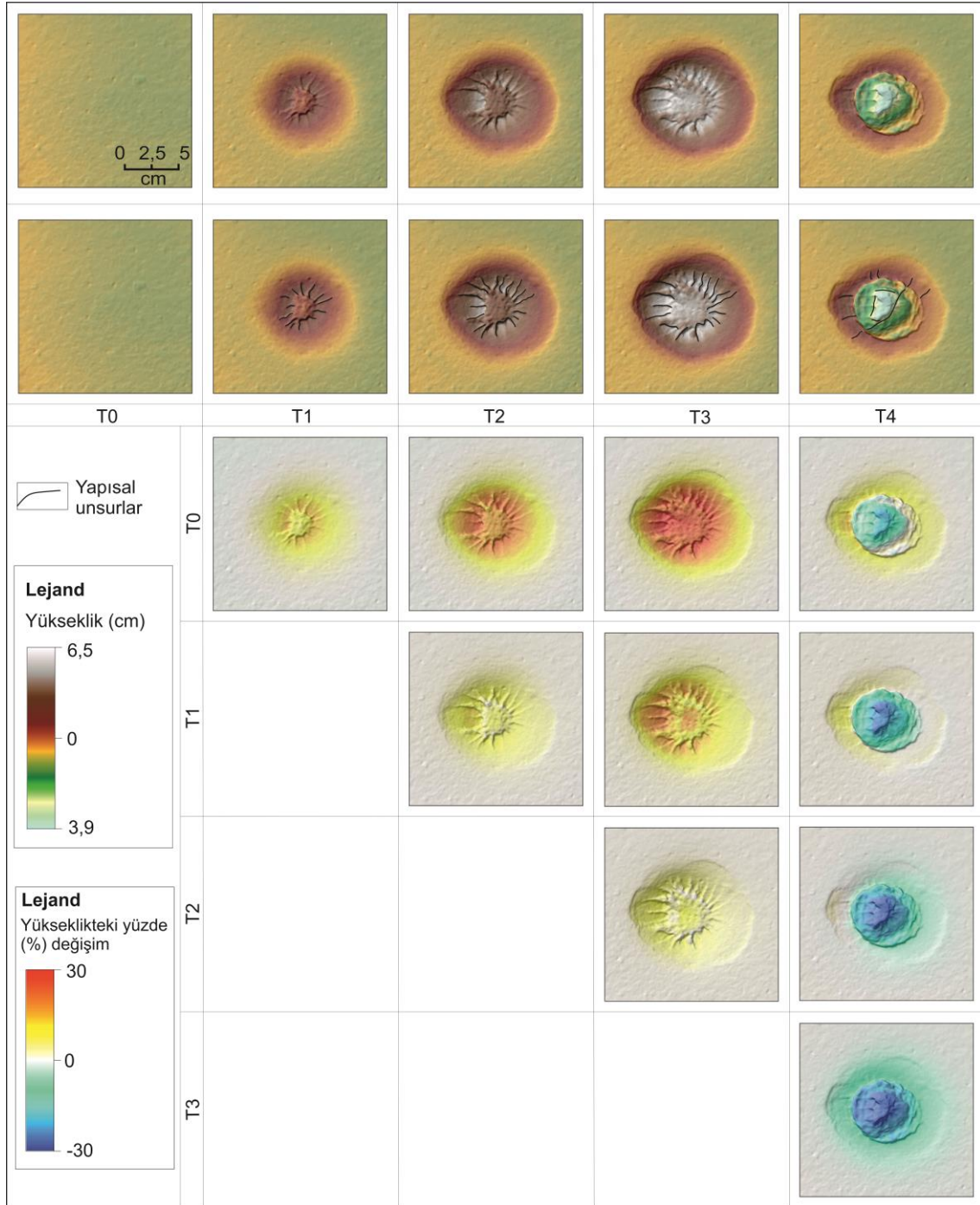
**EK-A.6.** Model 06'nın sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.



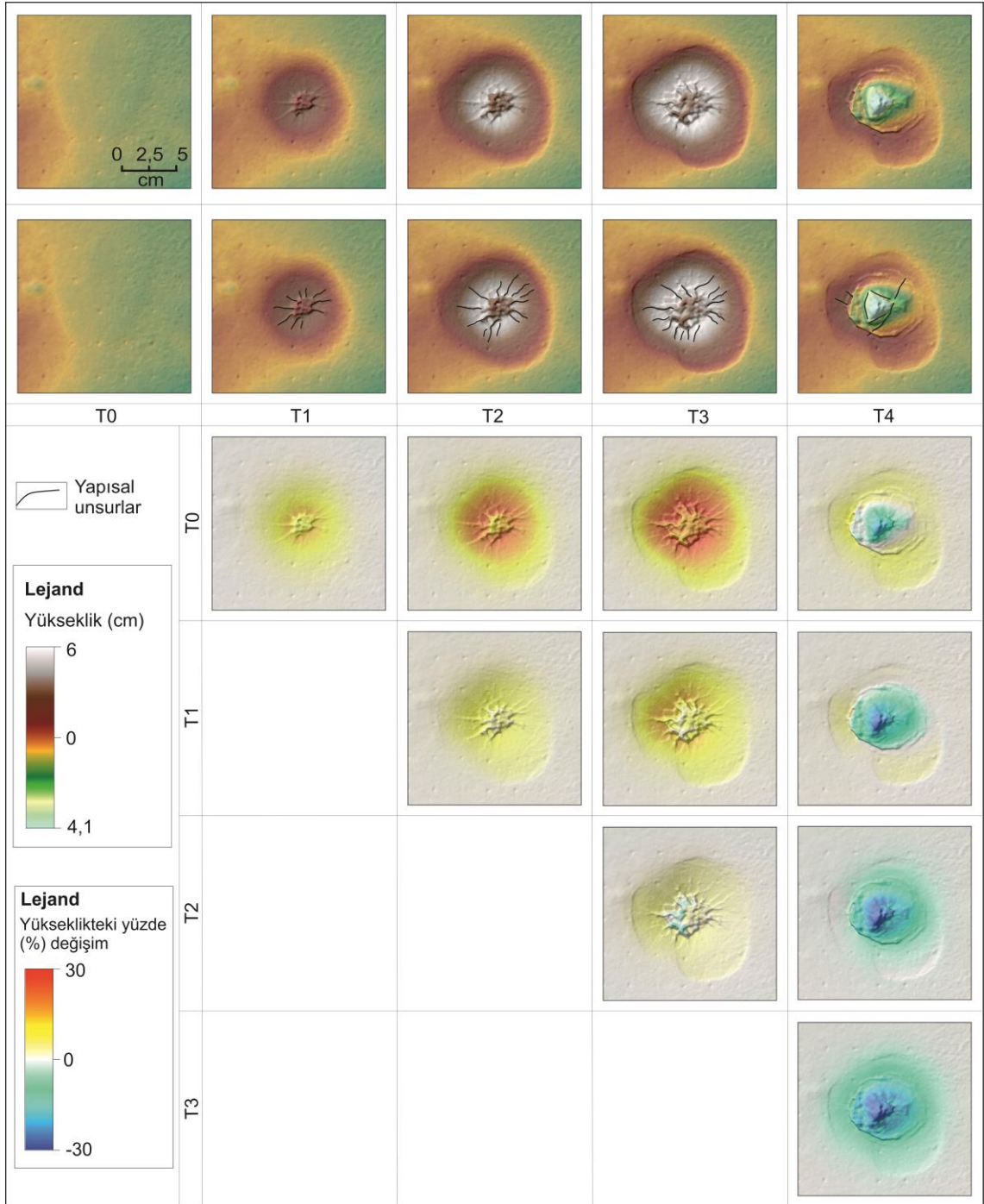


|                                                                                                                                         |  |                                                                                    |  |                                                                                    |  |                                                                                     |  |                                                                                      |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------------------------------------------------|--|
|                                                        |  |   |  |   |  |   |  |   |  |
| T0                                                                                                                                      |  | T1                                                                                 |  | T2                                                                                 |  | T3                                                                                  |  | T4                                                                                   |  |
|                                                        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>Lejand</b><br>Yükseklik (cm)<br>                  |  | T0                                                                                 |  | T1                                                                                 |  | T2                                                                                  |  | T3                                                                                   |  |
| <b>Lejand</b><br>Yükseklikteki yüzde (%) değişim<br> |  | T1                                                                                 |  | T2                                                                                 |  | T3                                                                                  |  | T4                                                                                   |  |

**EK-A.8.** Model 08'in sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

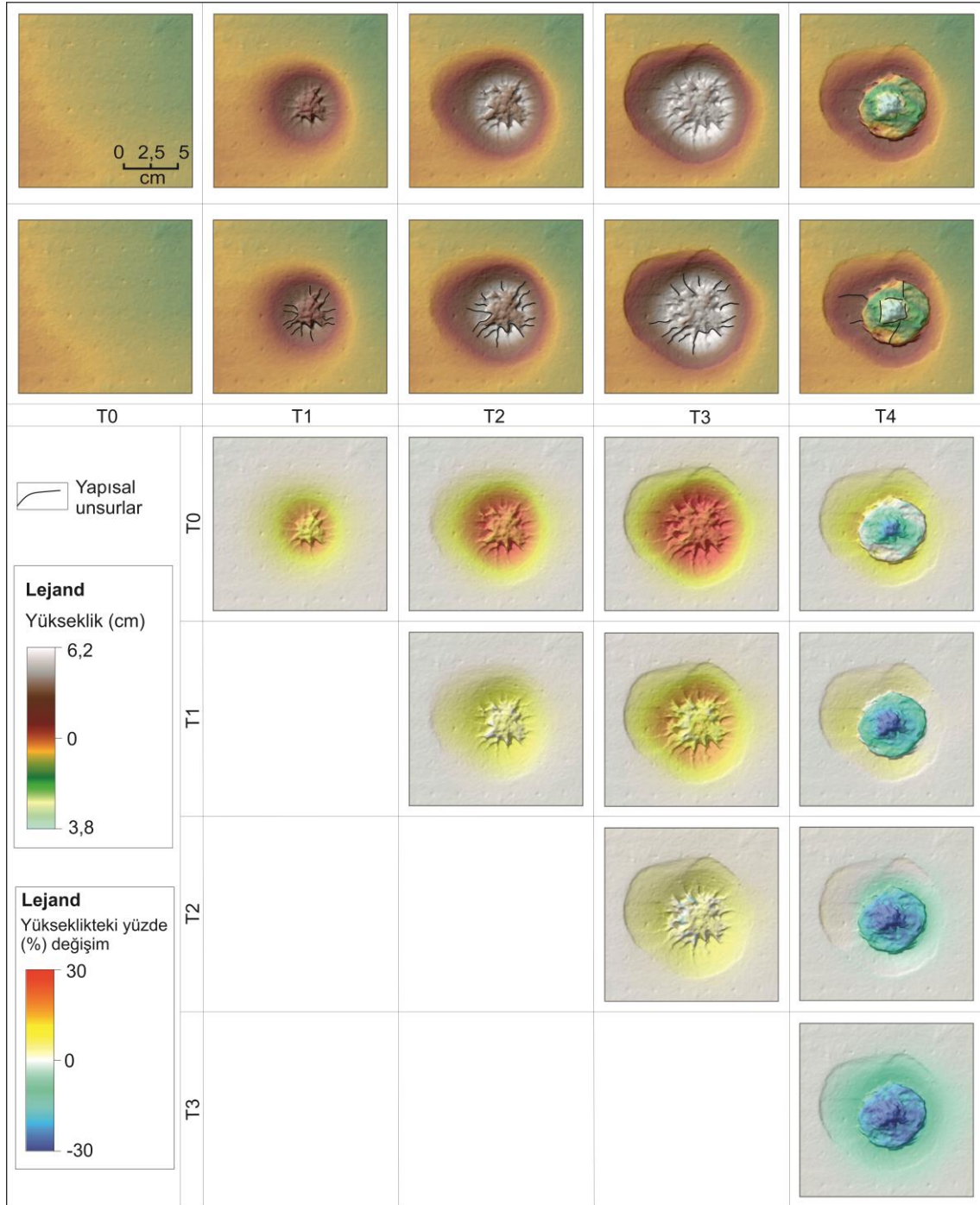


**EK-A.9.** Model 09'un sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.



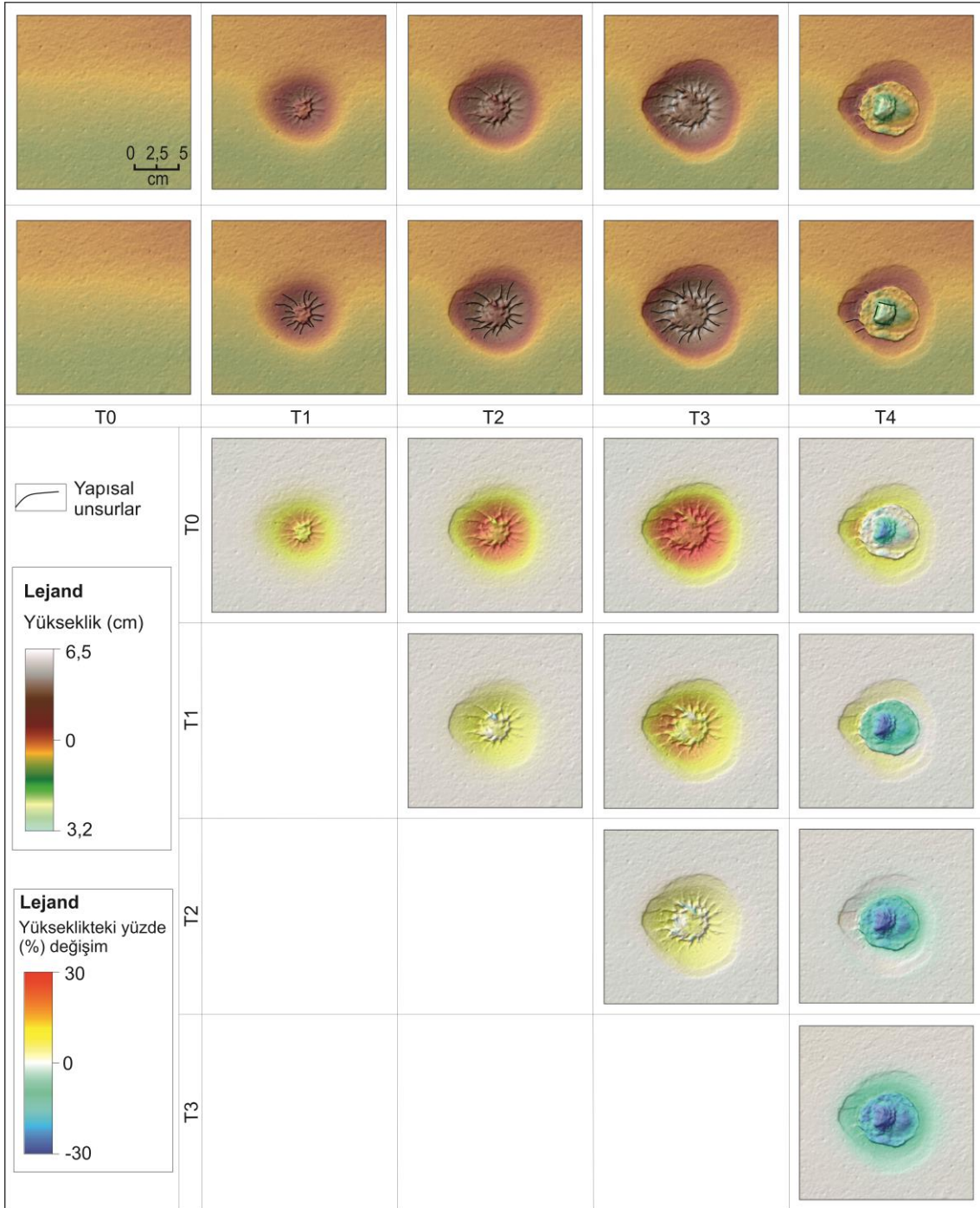


**EK-A.10.** Model 10'un sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.



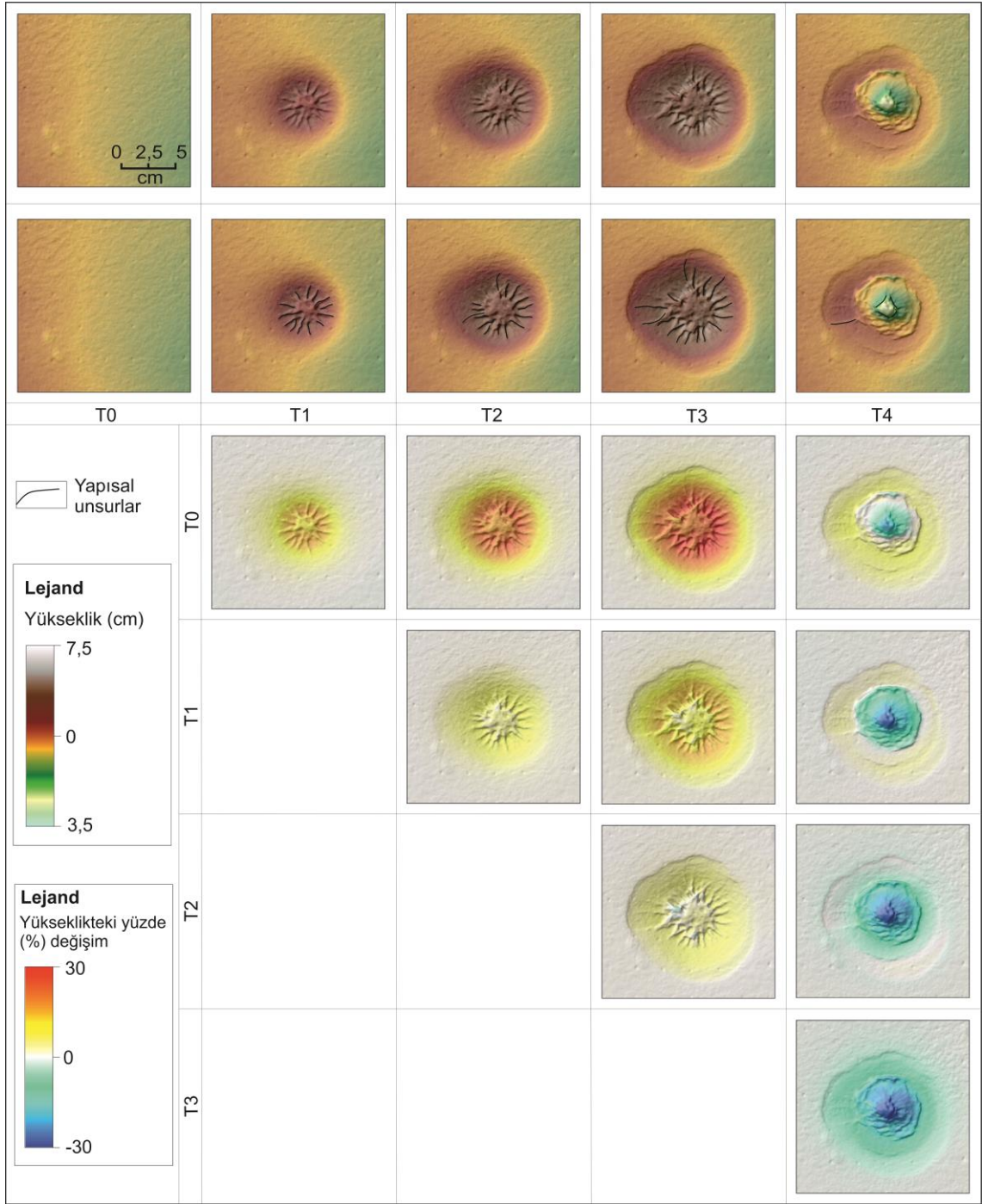
|                                                                                                                                                                                |    |    |  |    |  |    |  |    |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|--|----|--|----|--|----|--|
|                                                                                                                                                                                |    |    |  |    |  |    |  |    |  |
| T0                                                                                                                                                                             |    | T1 |  | T2 |  | T3 |  | T4 |  |
| <p><b>Yapısal unsurlar</b></p> <p><b>Lejand</b><br/>Yükseklik (cm)</p> <p>6<br/>0<br/>3,5</p> <p><b>Lejand</b><br/>Yükseklikteki yüzde (%) değişim</p> <p>30<br/>0<br/>-30</p> | T0 |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                                                                                                                                                                                | T1 |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                                                                                                                                                                                | T2 |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                                                                                                                                                                                | T3 |    |  |    |  |    |  |    |  |

**EK-A.12.** Model 12'nin sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

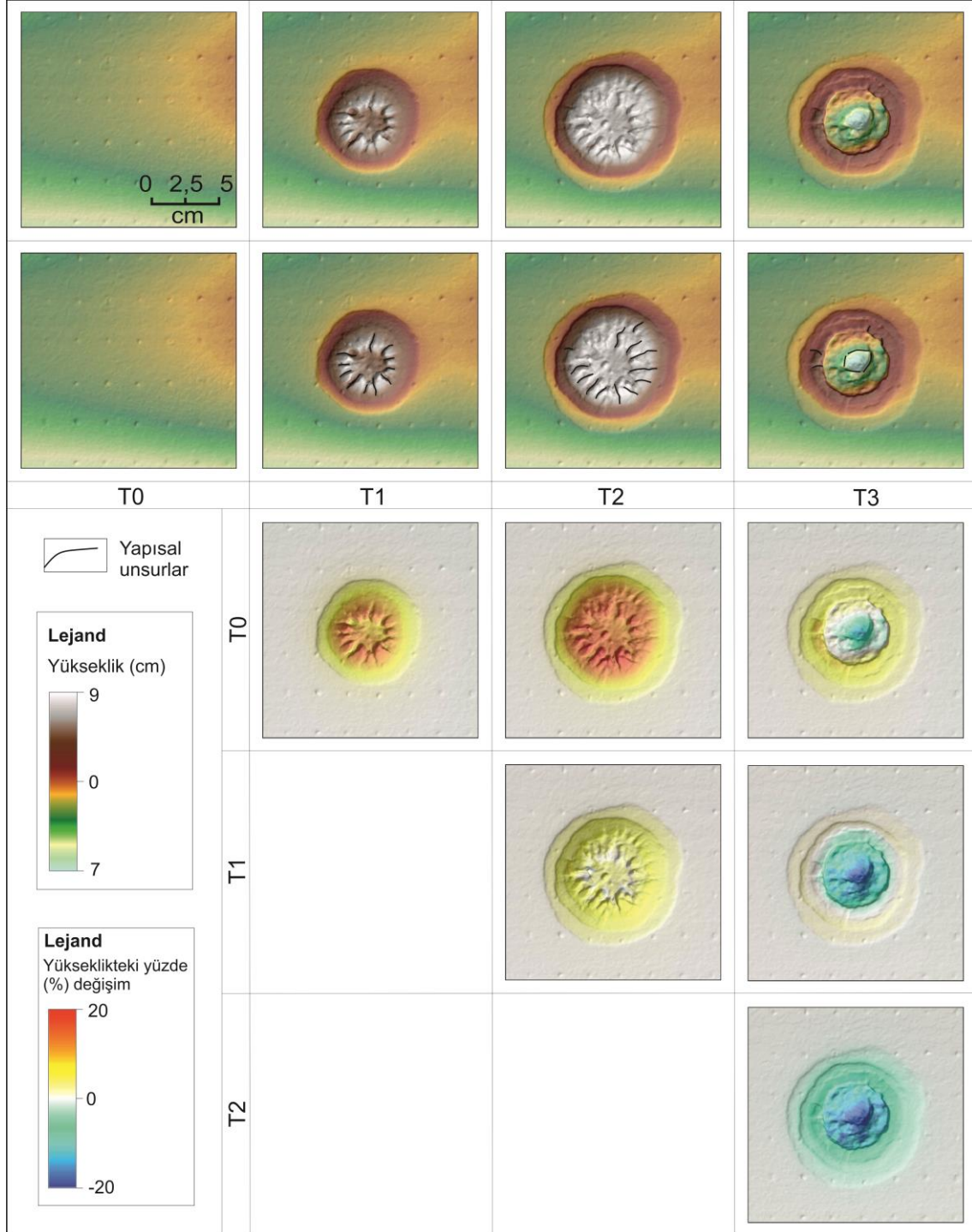




**EK-A.13.** Model 13'ün sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

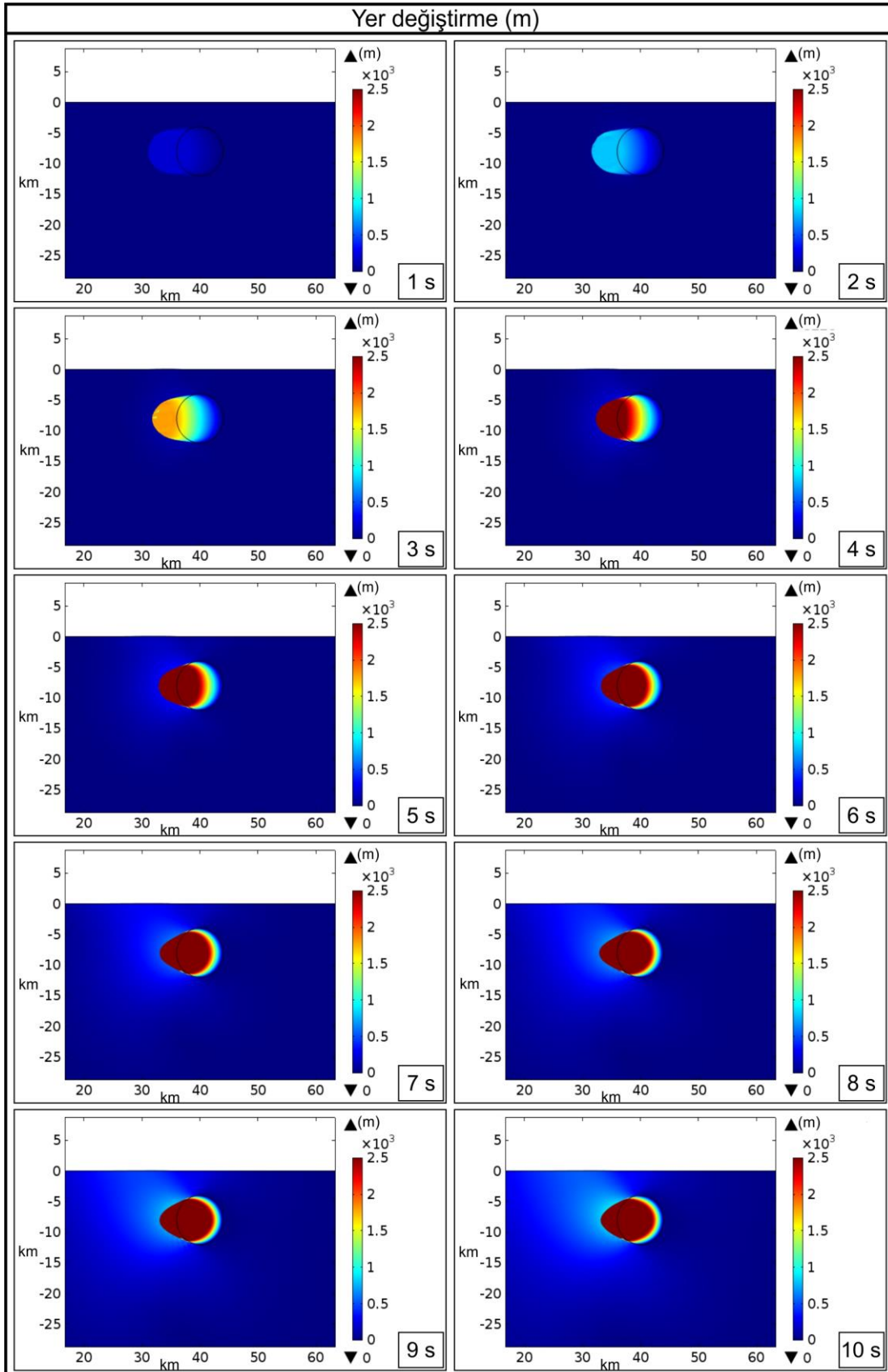


**EK-A.14.** Model 14'ün sayısal yükseklik modeli ve yükseklikteki yüzdelik (%) değişimini gösteren şekil.

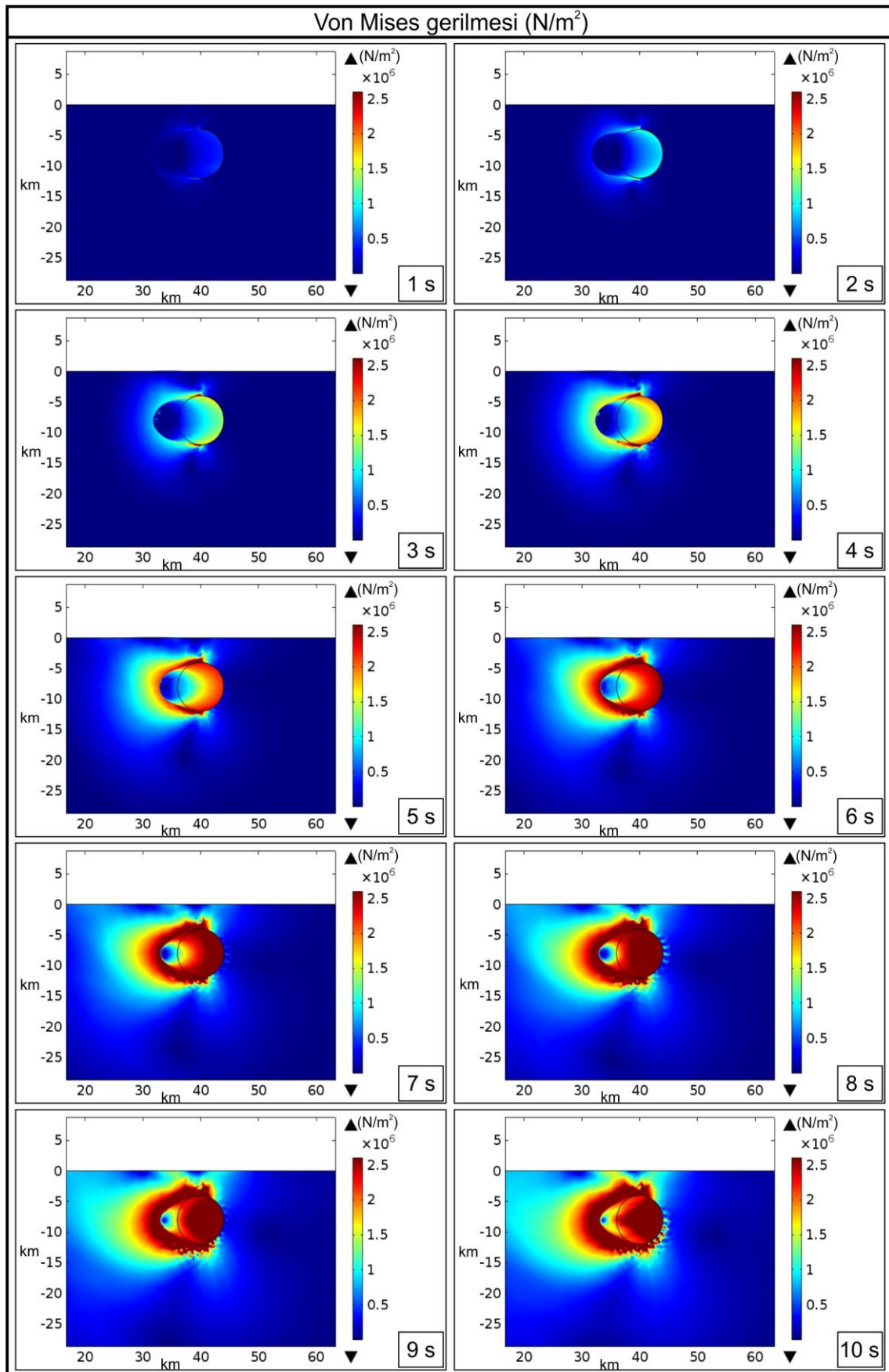


## EK-B. Düz topoğrafyaya sahip nümerik modeller

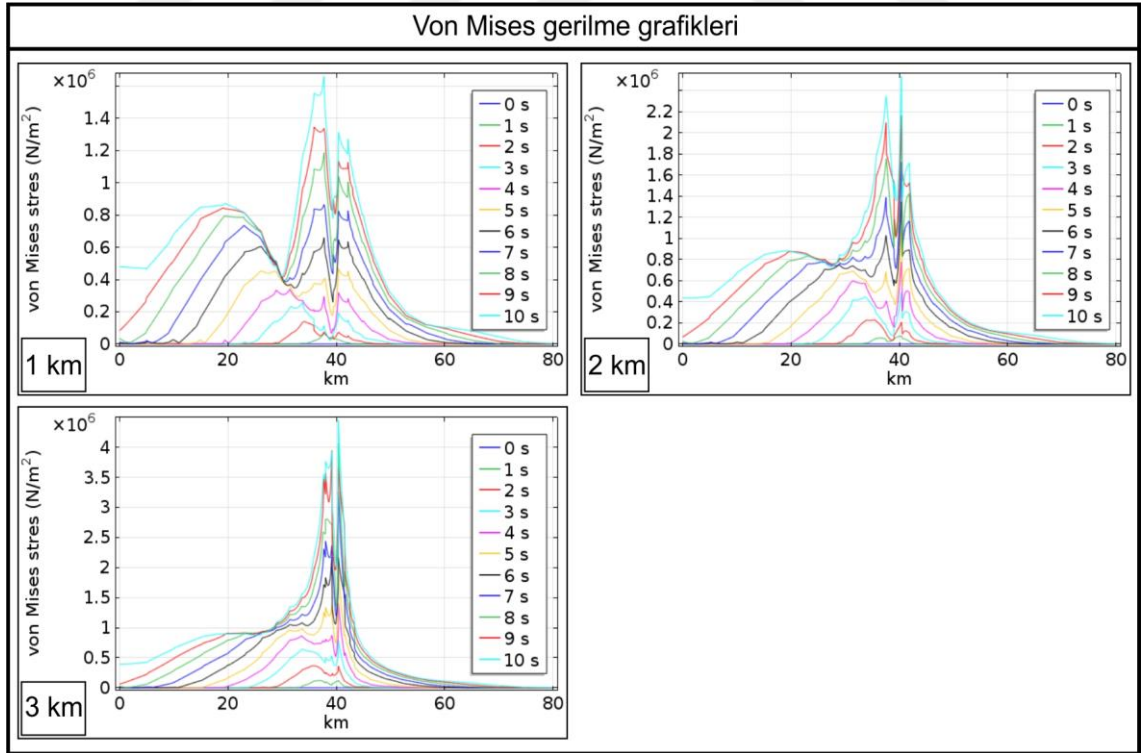
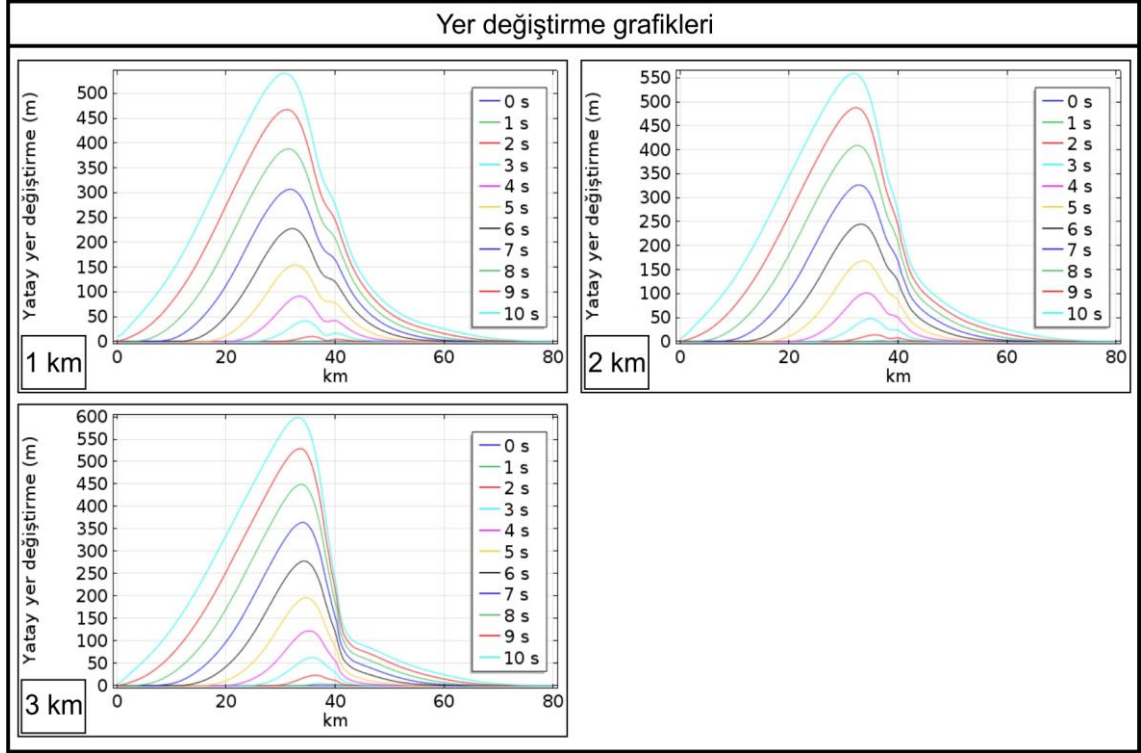
**EK-B.1.a.** 8 km çapında, 4 km derindeki dairesel magma odasının 0-10 s aralığındaki yer değiştirme ve stres grafikleri.





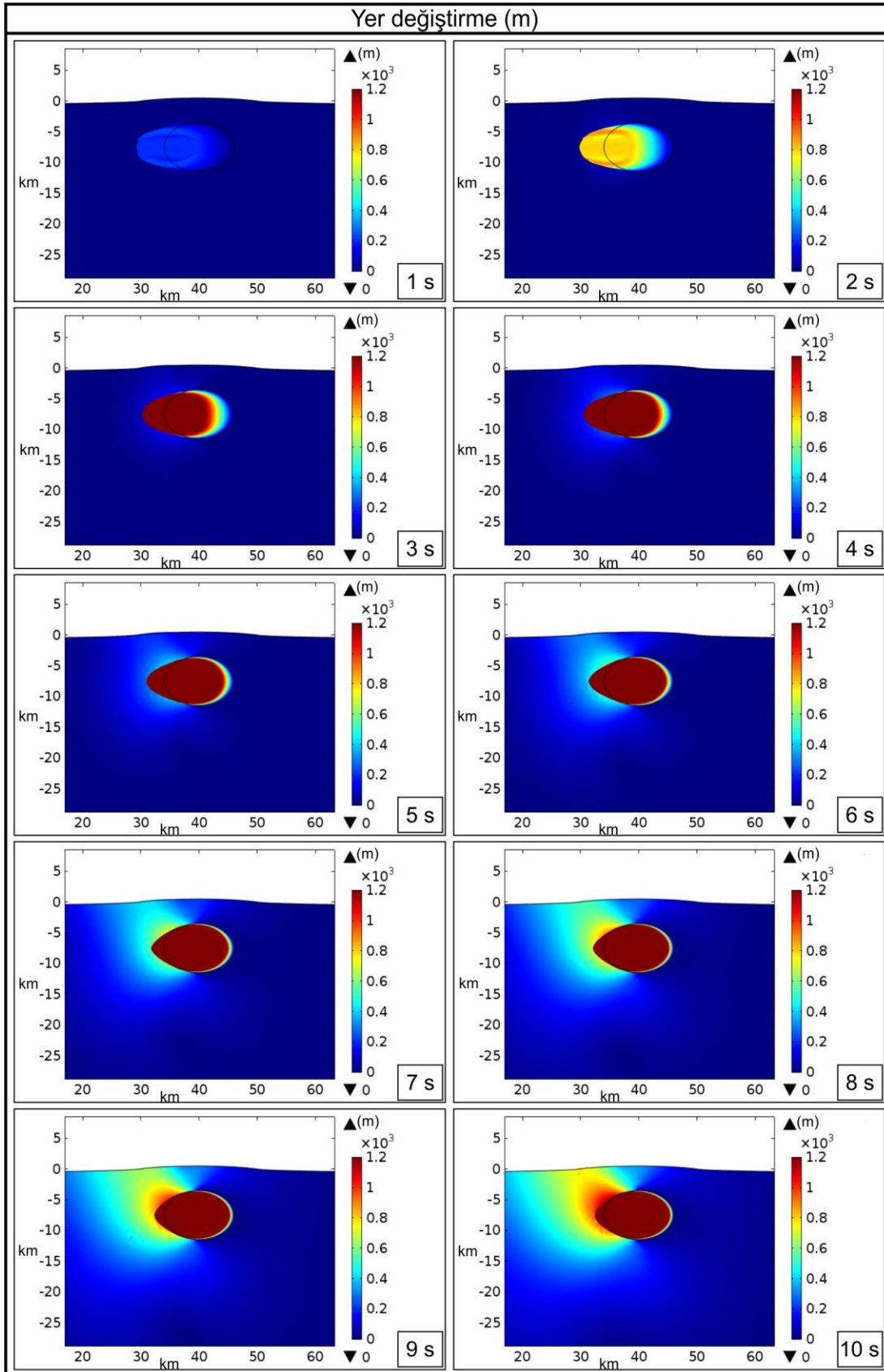


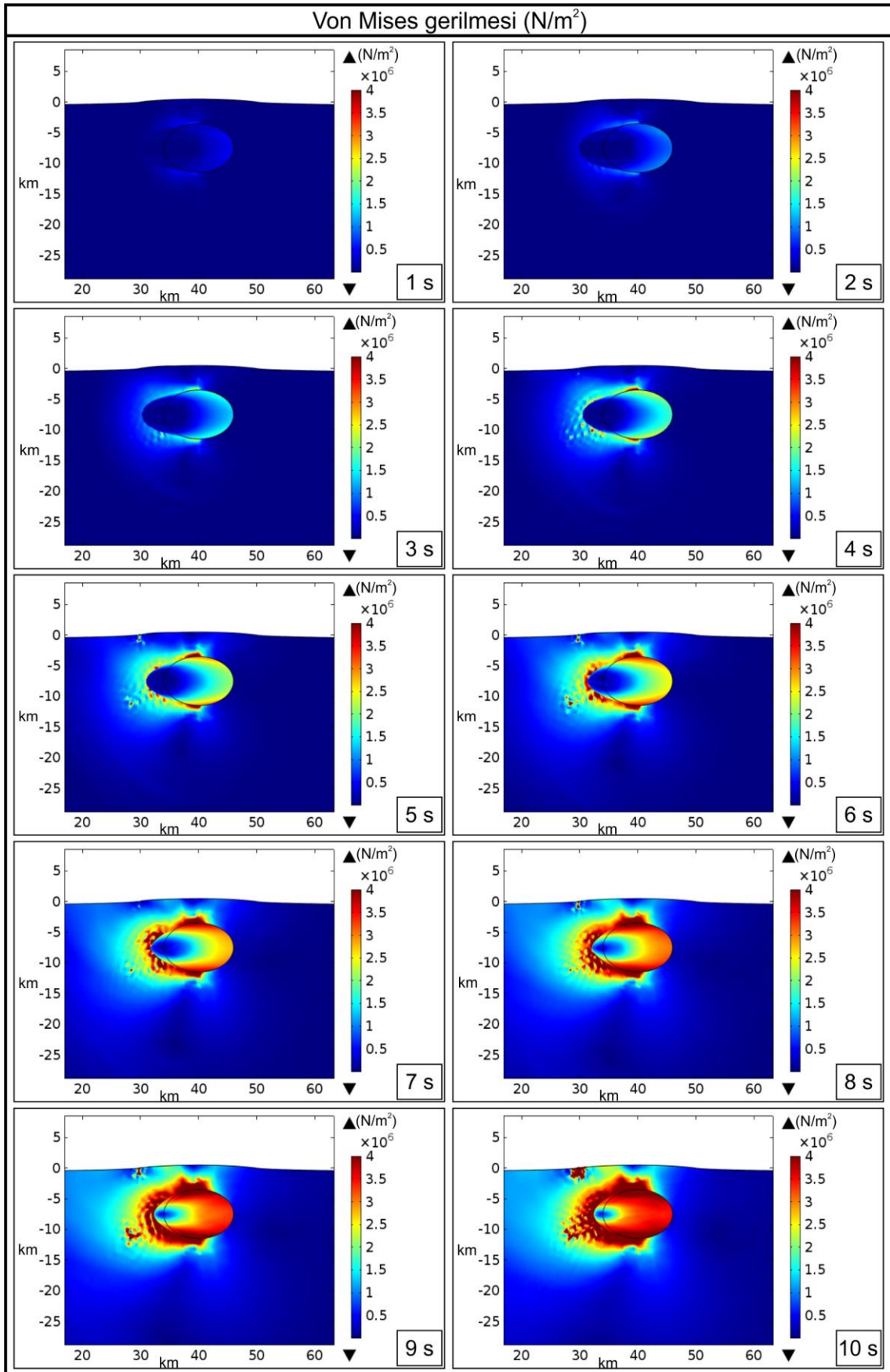
**EK-B.1.b.** 8 km apında, 4 km derindeki dairesel magma odasının, yüzeyden itibaren 1-3 km derinlikteki yer değiştirme ve stres grafikleri.



### EK-C. 1000 m yükseltili topoğrafyaya sahip nümerik modeller

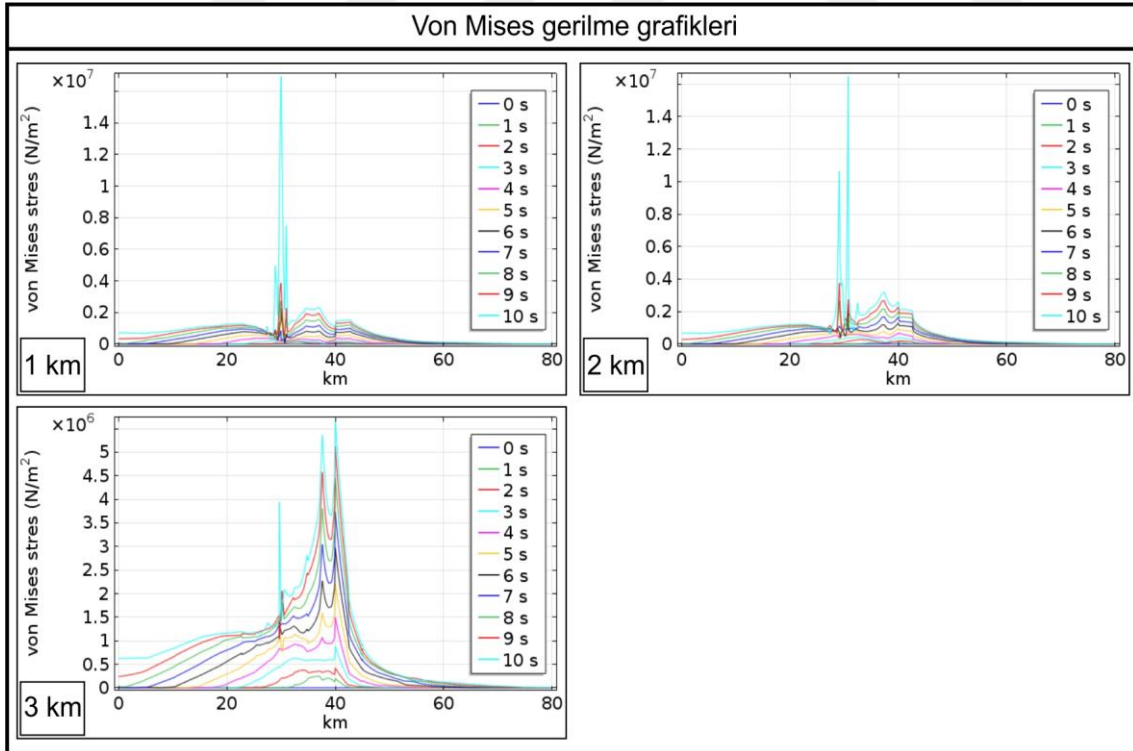
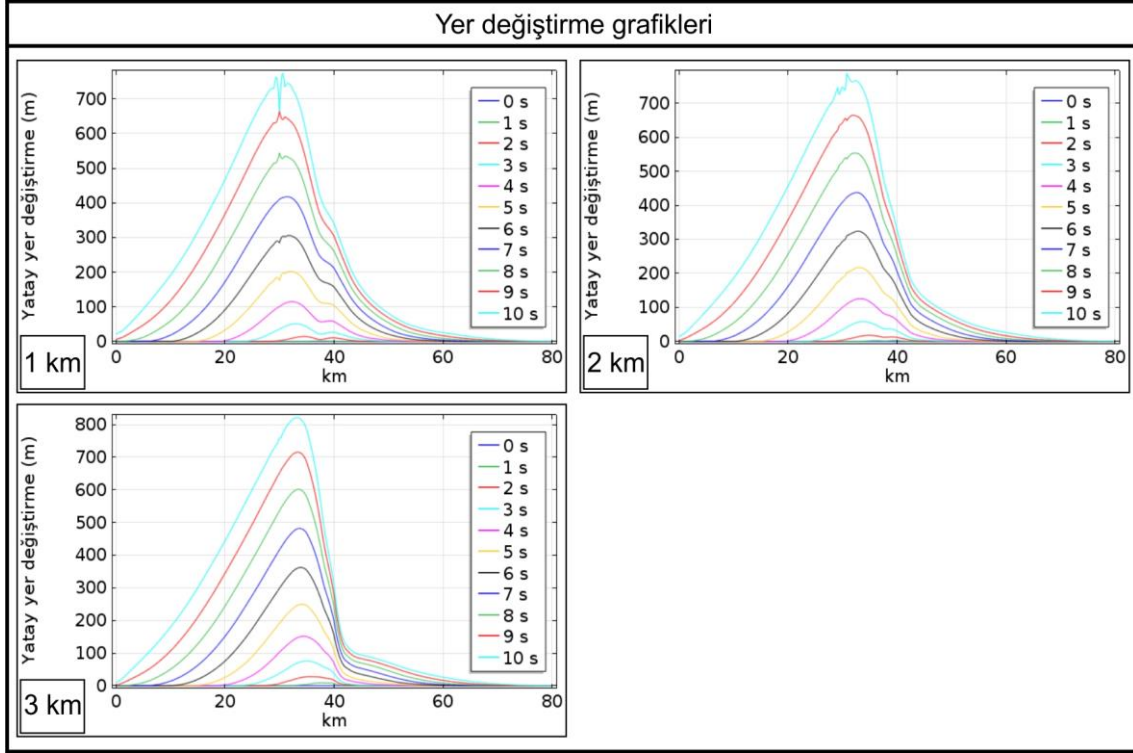
**EK-C.1.a.** 12 km çapında, 4 km derindeki eliptik şekilli magma odasının 0-10 s aralığındaki yer değıştirme ve stres grafikleri.







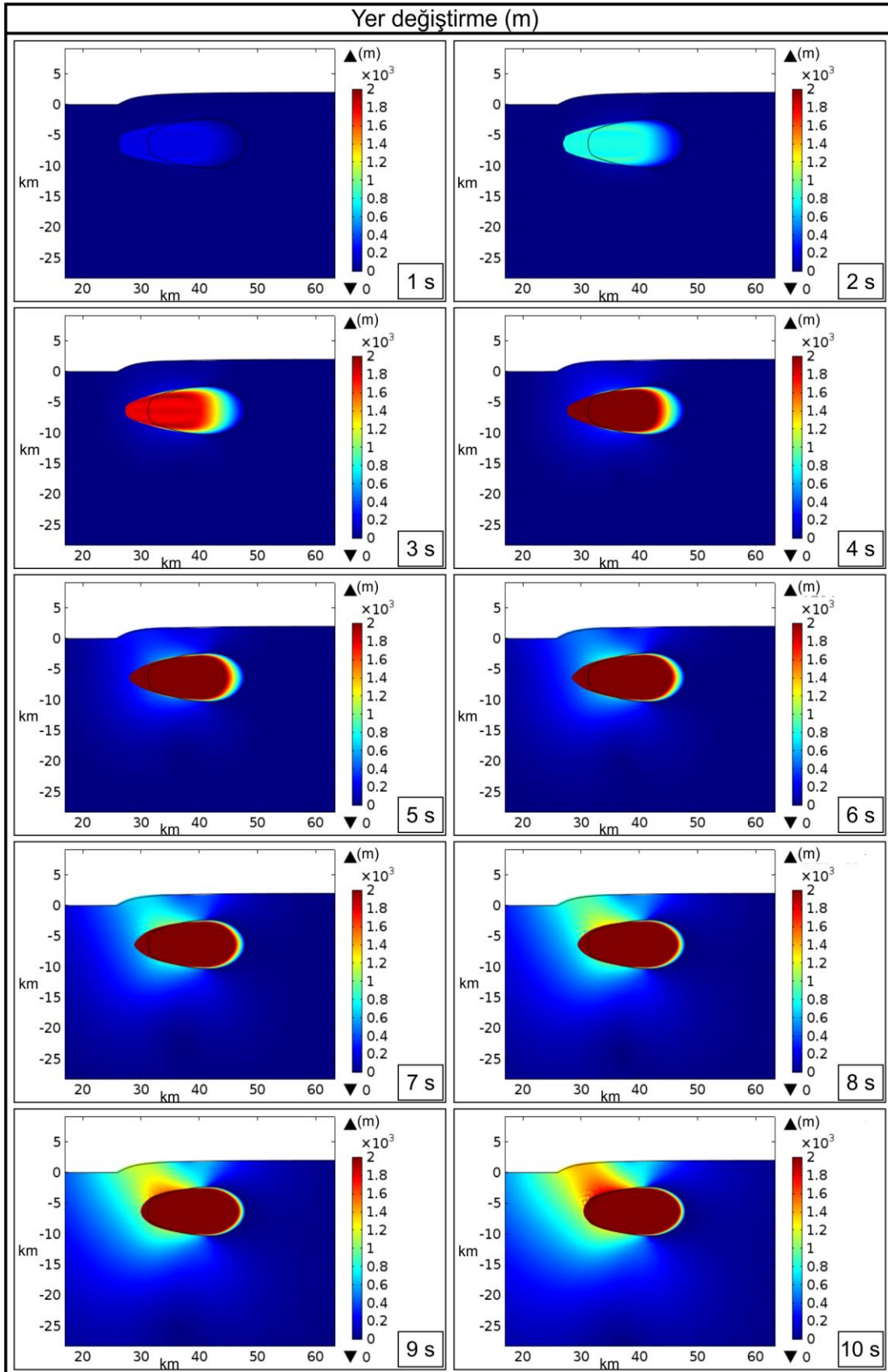
**EK-C.1.b.** 12 km çapında, 4 km derindeki eliptik şekilli magma odasının, yüzeyden itibaren 1-3 km derinlikteki yer değiştirme ve stres grafikleri.

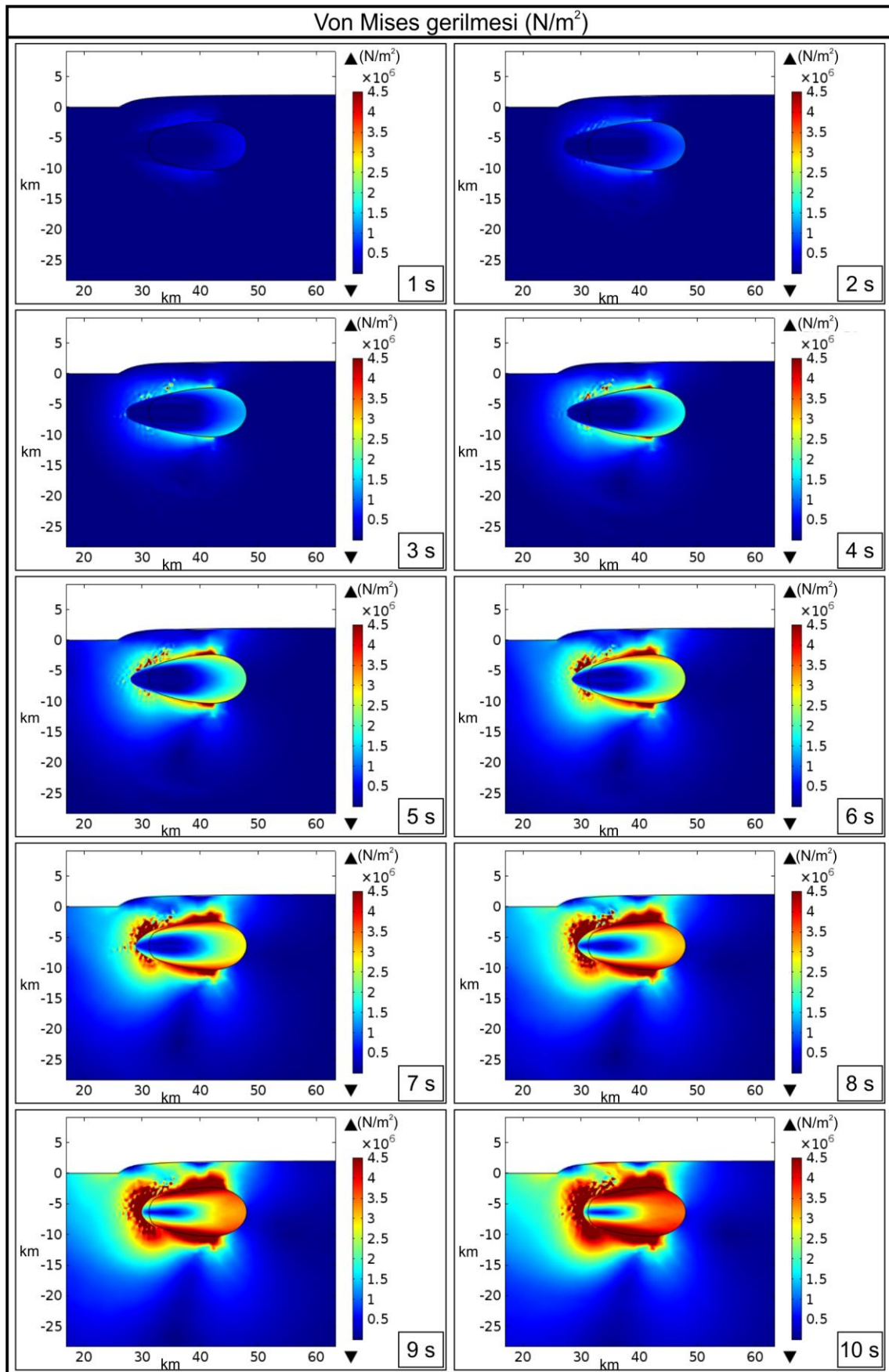




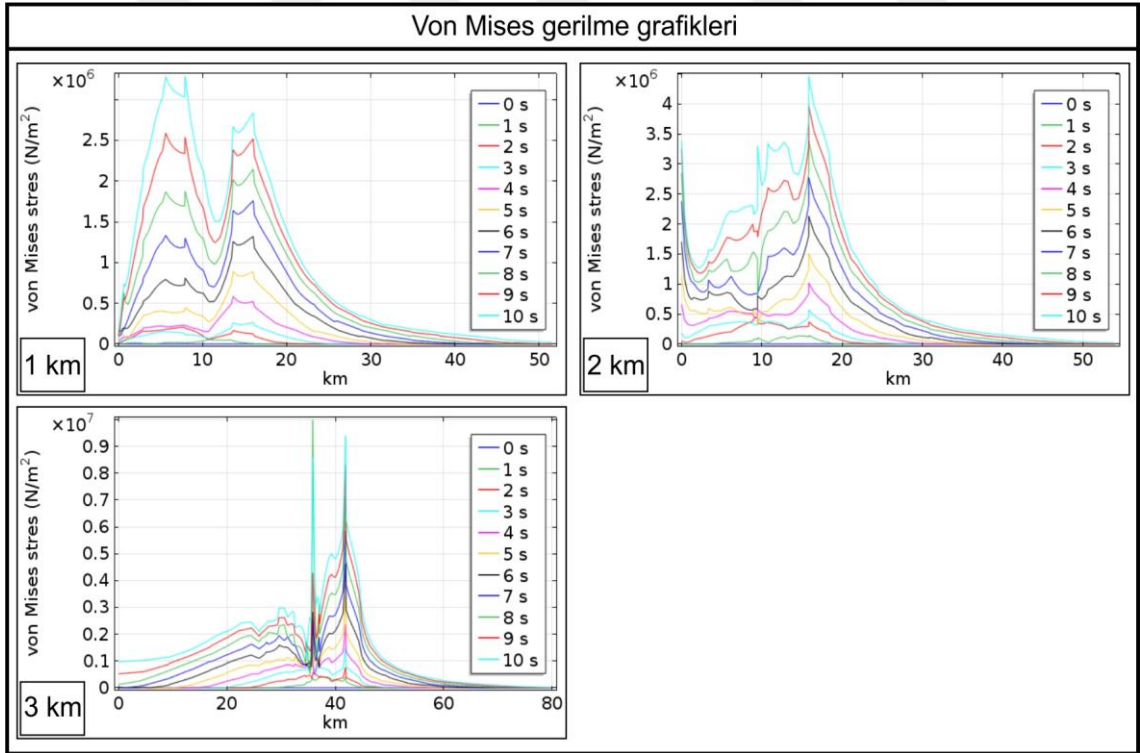
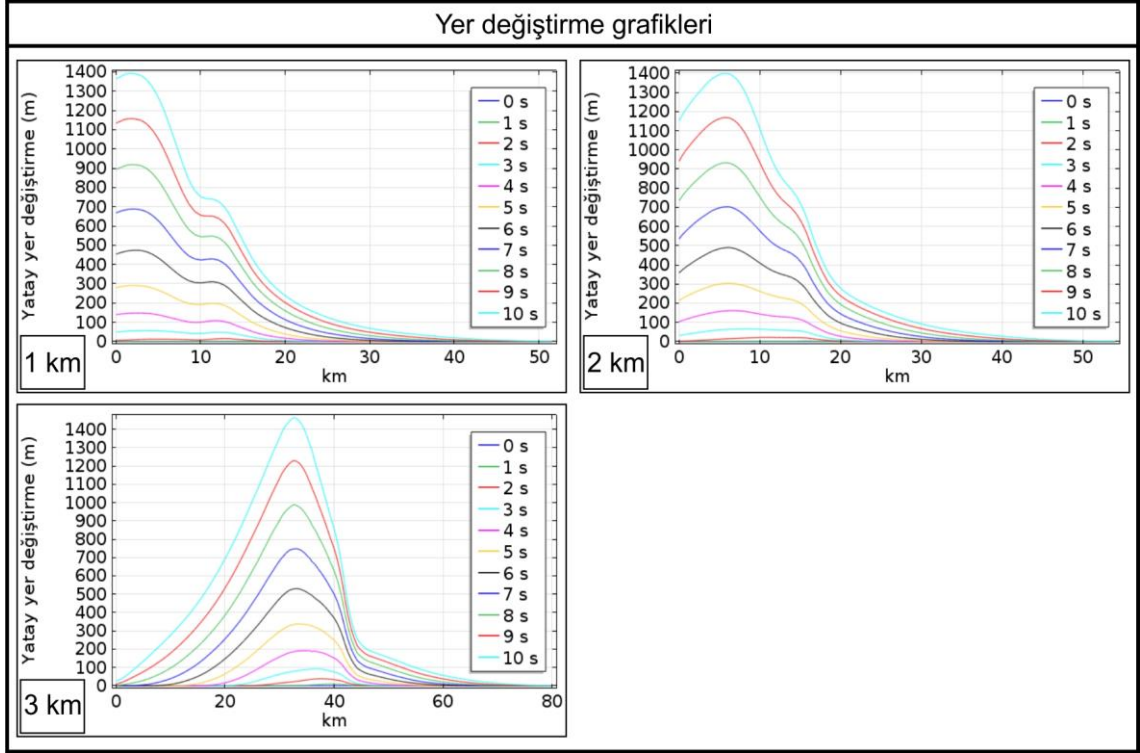
## EK-D. 2000 m yükseltili topoğrafyaya sahip nümerik modeller

**EK-D.1.a.** 16 km çapında, 4 km derindeki eliptik şekilli magma odasının 0-10 s aralığındaki yer değıştirme ve stres grafikleri.

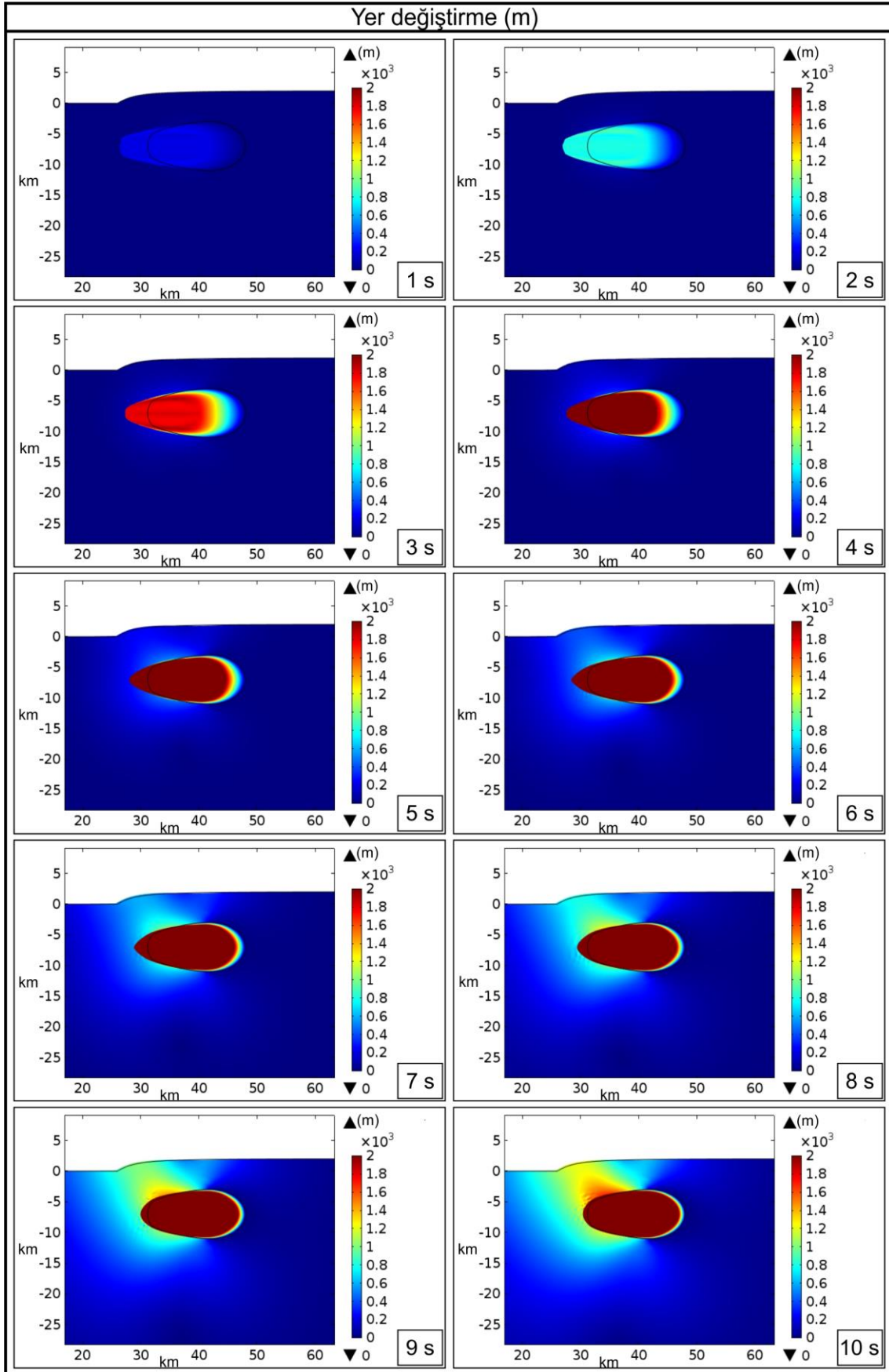




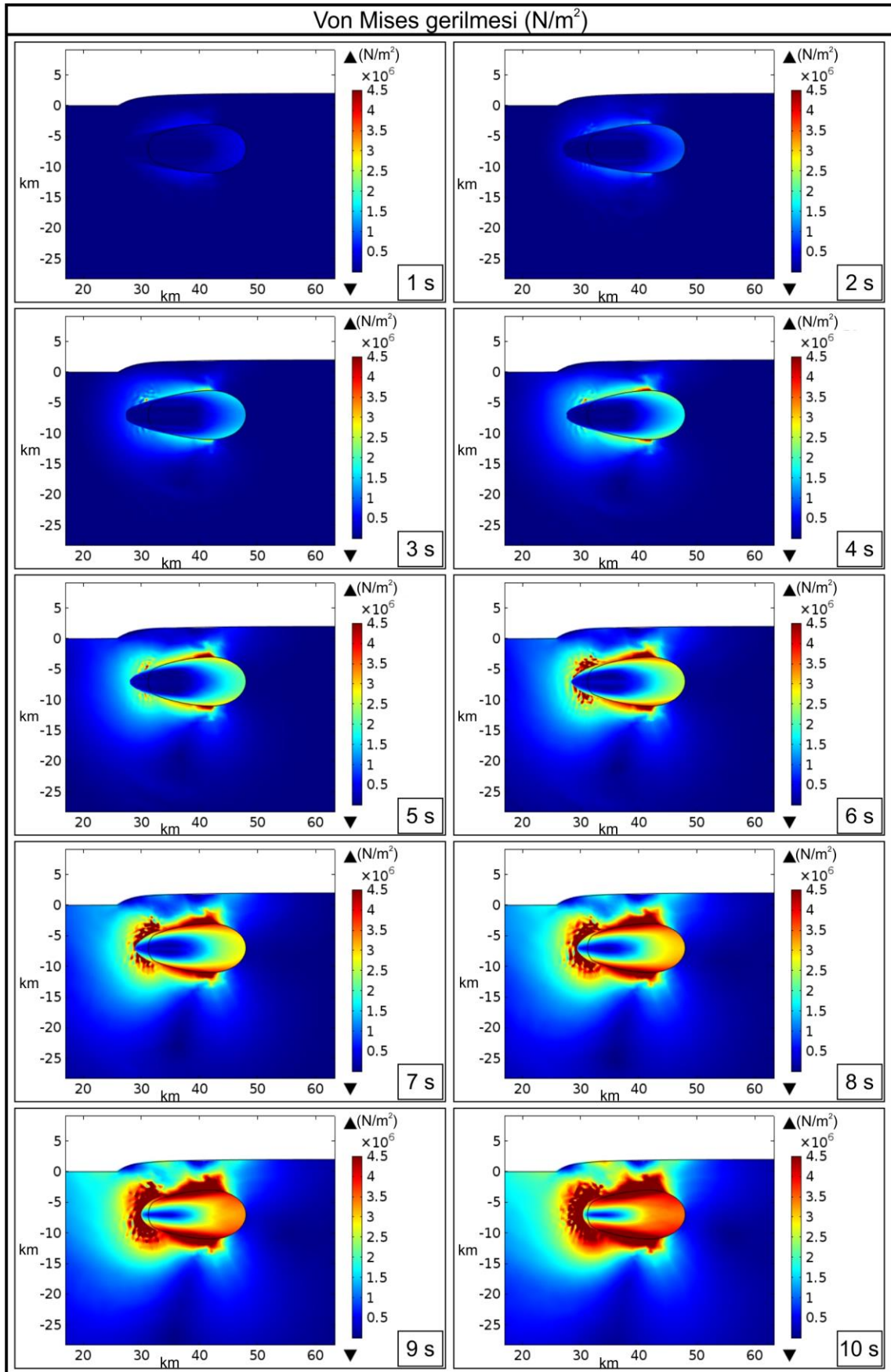
**EK-D.1.b.** 16 km çapında, 4 km derindeki eliptik şekilli magma odasının, yüzeyden itibaren 1-3 km derinlikteki yer değiştirme ve stres grafikleri.



**EK-D.2.a.** 16 km çapında, 5 km derindeki eliptik şekilli magma odasının 0-10 s aralığındaki yer değiştirme ve stres grafikleri.

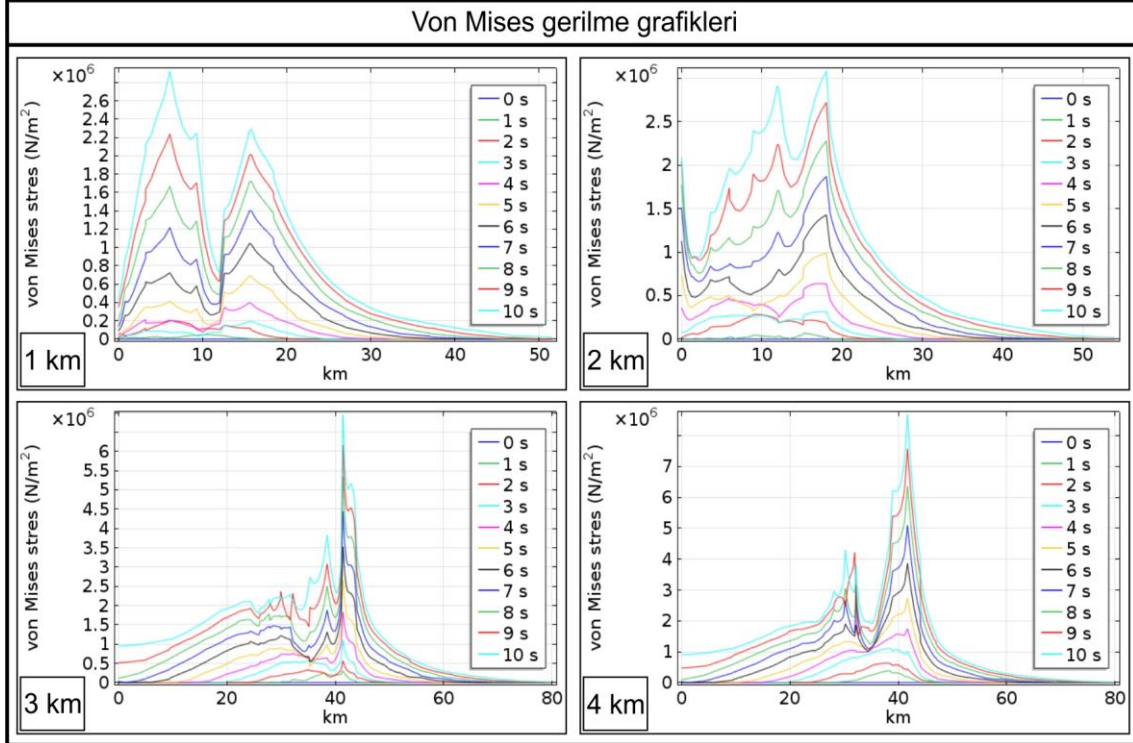
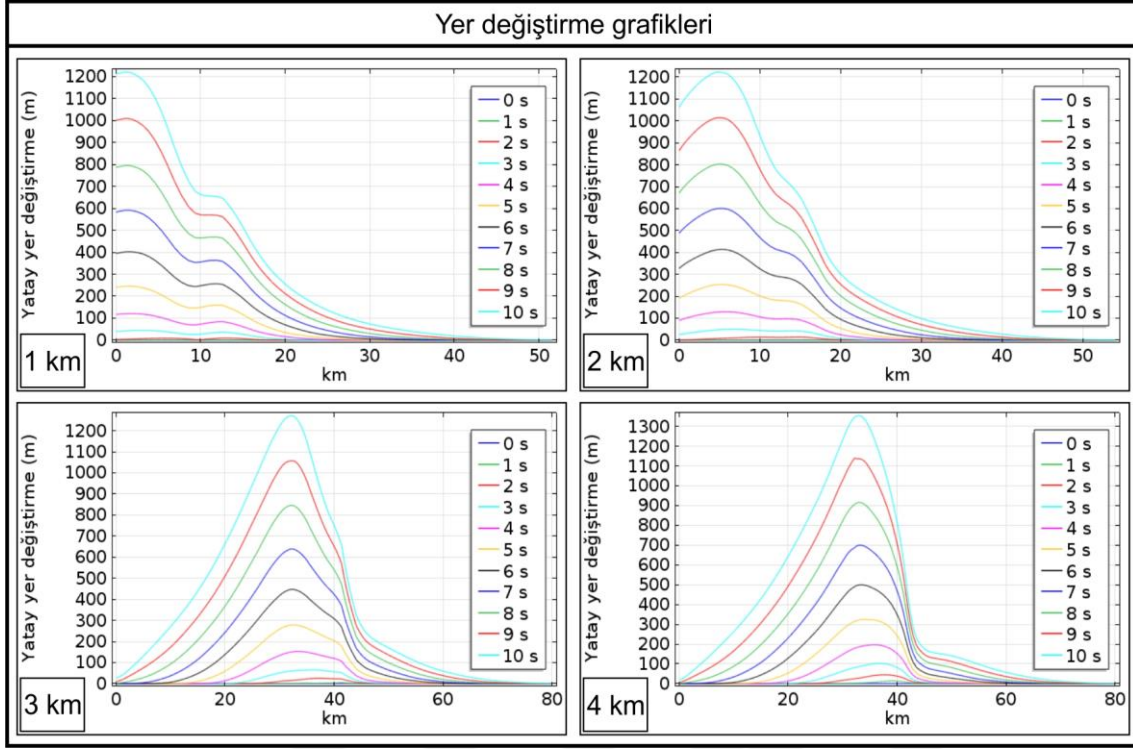




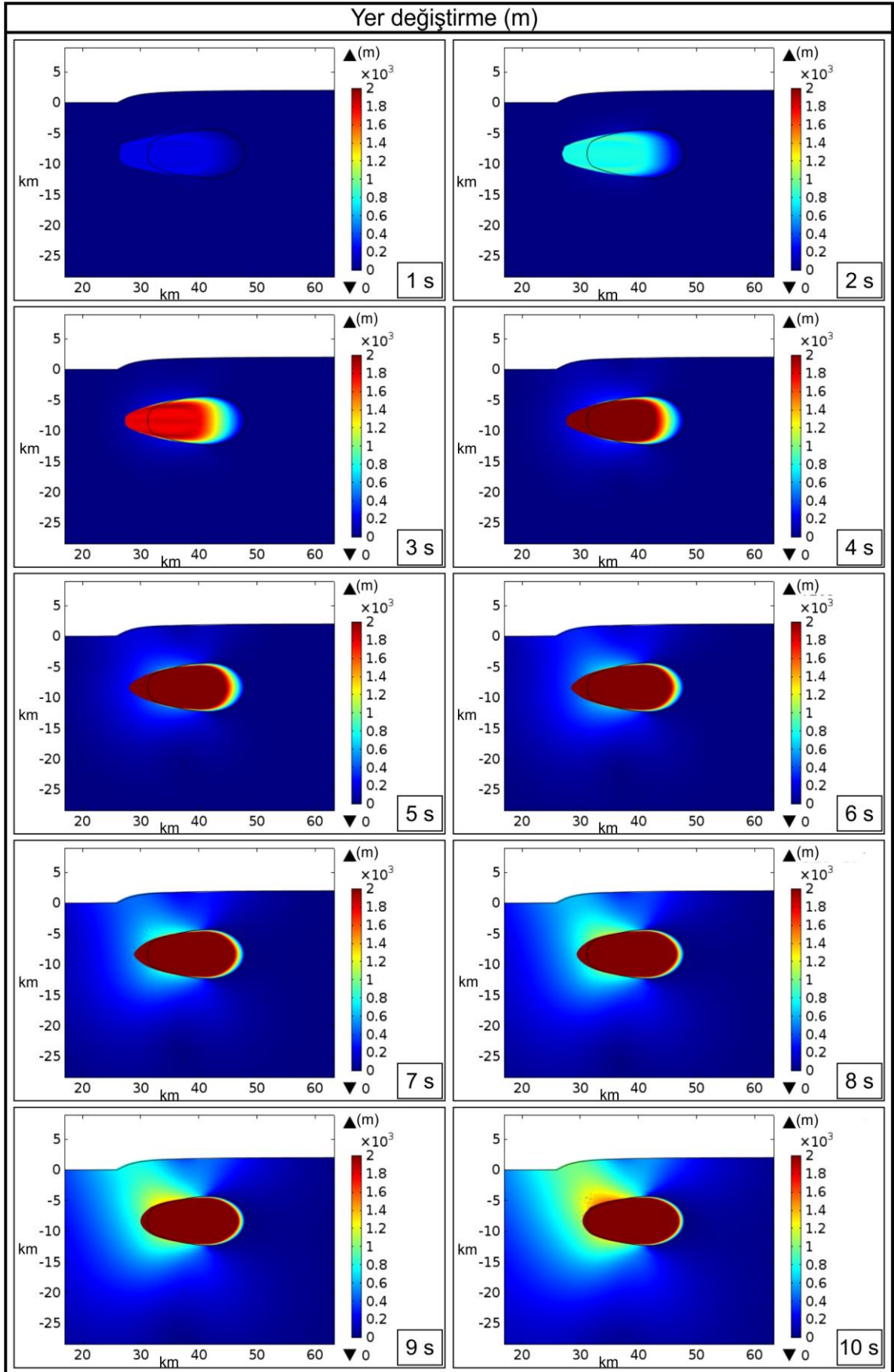


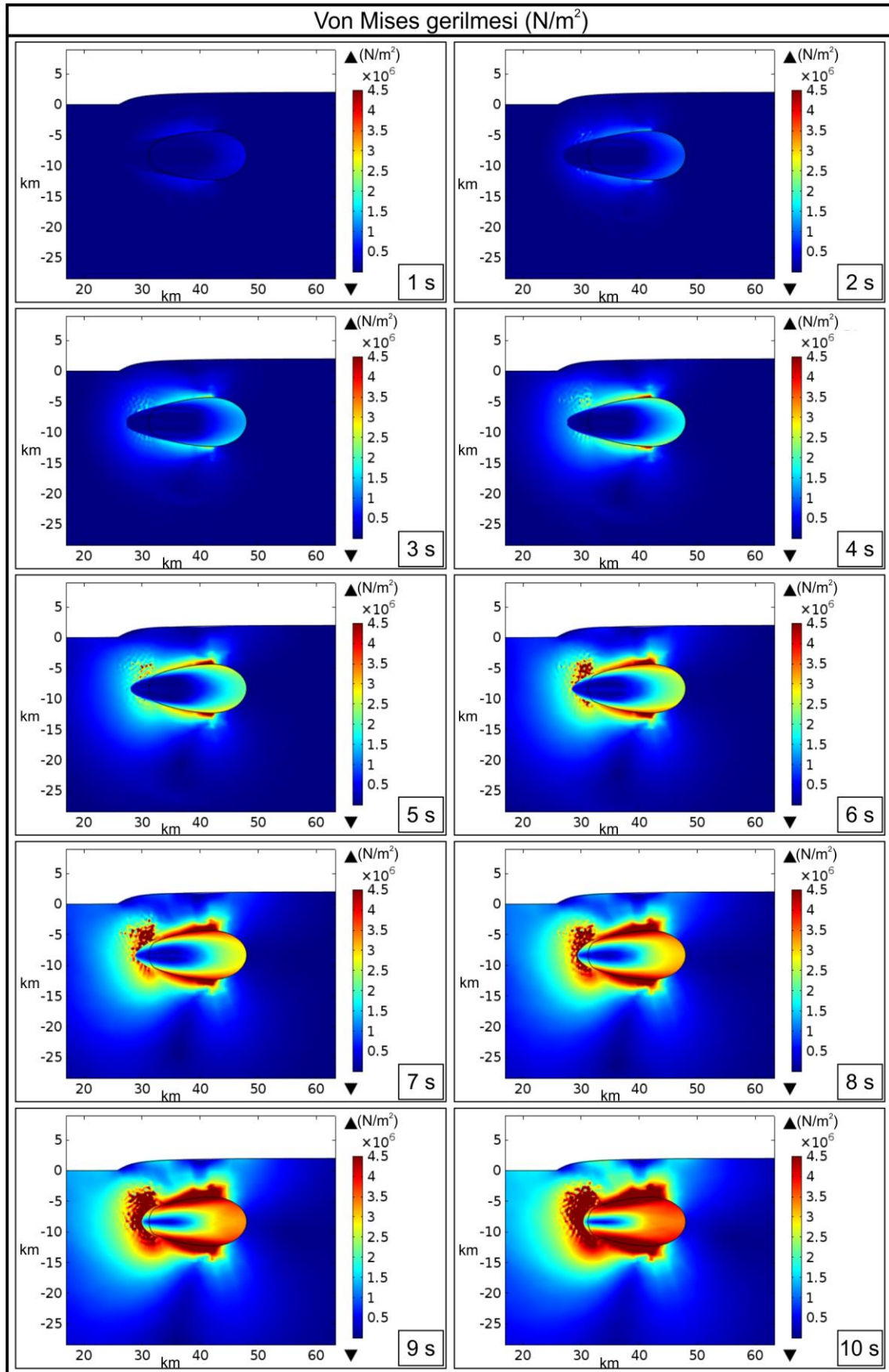


**EK-D.2.b.** 16 km çapında, 5 km derindeki eliptik şekilli magma odasının, yüzeyden itibaren 1-4 km derinlikteki yer değiştirme ve stres grafikleri.

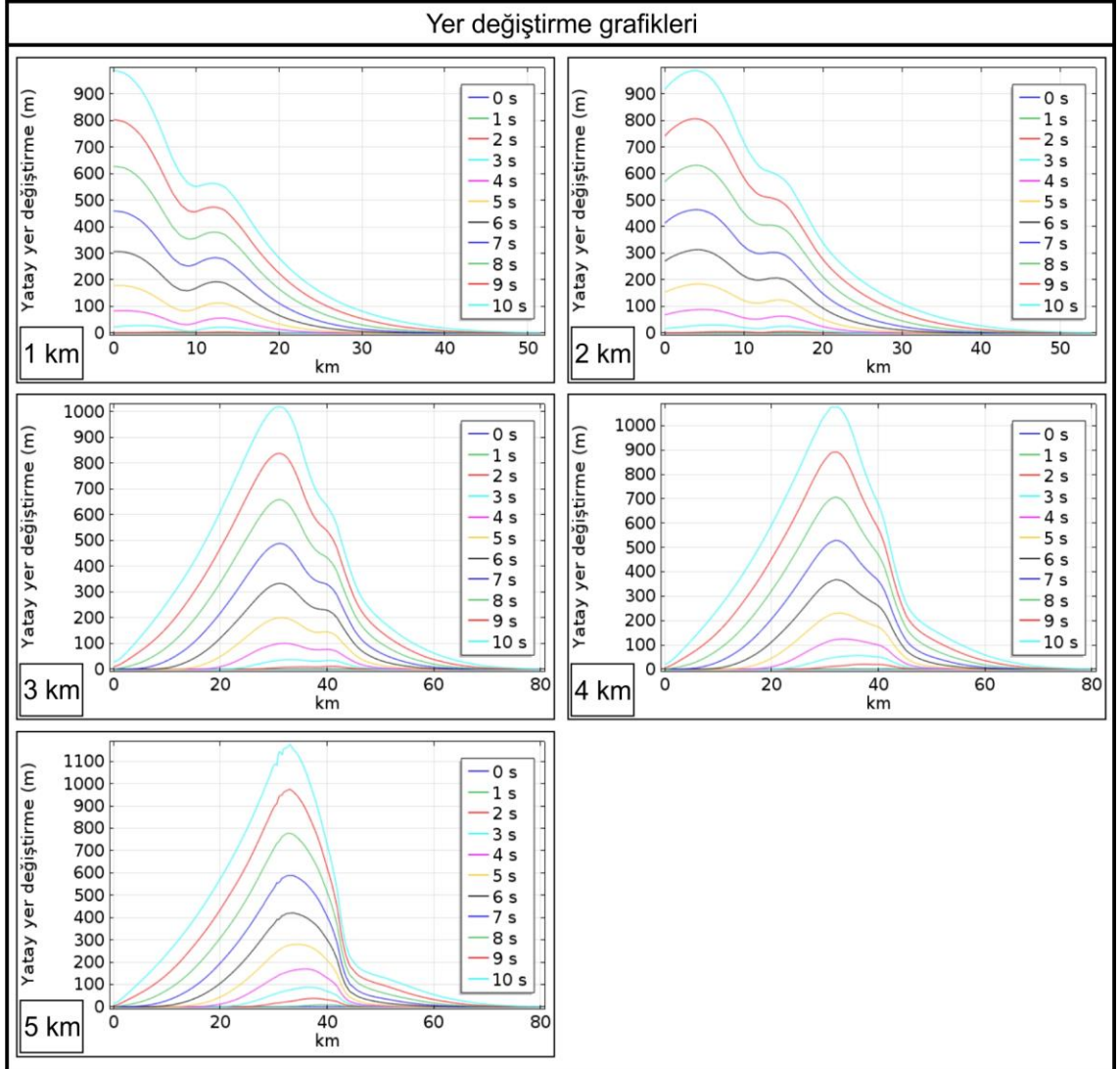


**EK-D.3.a.** 16 km çapında, 6 km derindeki eliptik şekilli magma odasının 0-10 s aralığındaki yer değiştirme ve stres grafikleri.



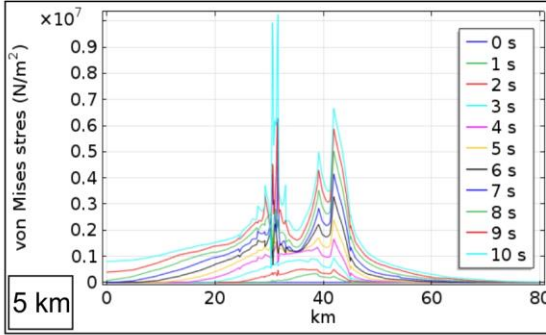
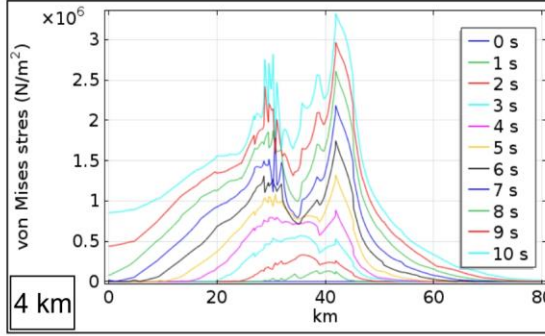
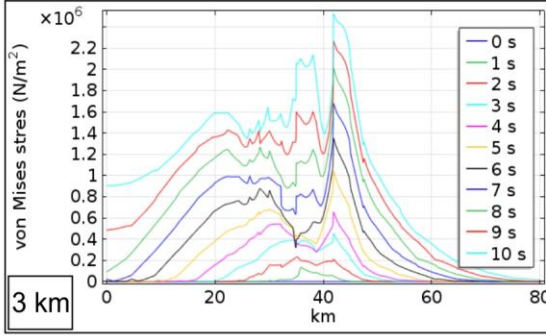
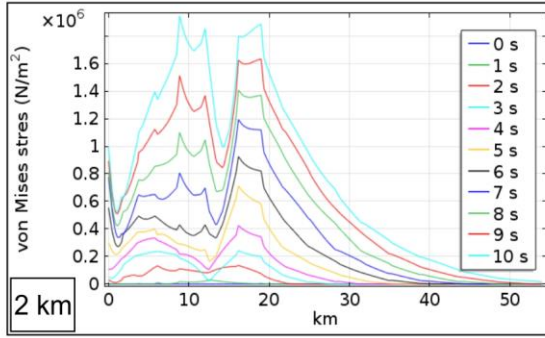
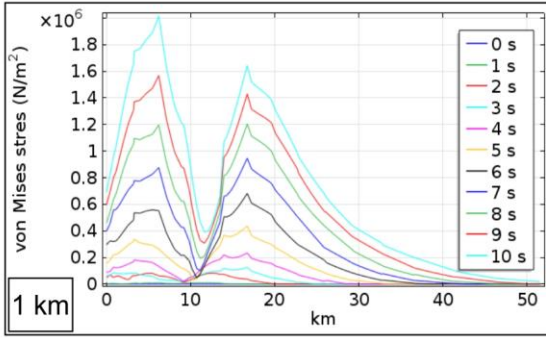


**EK-D.3.b.** 16 km çapında, 6 km derindeki eliptik şekilli magma odasının, yüzeyden itibaren 1-5 km derinlikteki yer değiştirme ve stres grafikleri.





# Von Mises gerilme grafikleri





**EK-E. Nümerik modellerin tamamı (Dijital Ek, CD).**



#### **EK-F. Tezden Türetilmiş Bildiriler**

Aydın, E., Ulusoy, İ., Akkaş., E., Analogue and Numerical modelling of double-piston piecemeal calderas. Cities on Volcanoes 10, Napoli, Italy, Miscellanea, INGV Abstracts Volume of the International meeting 43, Sept. 2-7, **2018**.

Ulusoy, İ., Aydın., E., Çubukçu, H.E., Topographic modelling of caldera analogues using Structure from Motion – Multi-view stereophotogrammetry, EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria, Geophysical Research Abstracts Vol. 18, **2016a**.

Ulusoy, İ., Aydın, E., Çubukçu, H.E., Parçalı kaldera oluşumunun analog ve nümerik modellemesi, 1. Türkiye Volkanoloji Çalıştayı, MTA, Ankara, **2016b**.





**HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU**

**HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**  
**JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA**

Tarih: 31/01/2020

Tez Başlığı / Konusu: Parçalı Kaldera Çökmelerinin Analog ve Nümerik Modellemesi

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 115 sayfalık kısmına ilişkin, 31/01/2020 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

31.01.2020

**Adı Soyadı:** Eda AYDIN  
**Öğrenci No:** N16220564  
**Anabilim Dalı:** Jeoloji Mühendisliği  
**Programı:** Yüksek Lisans  
**Statüsü:** ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

Dr. Öğr. Üyesi İnan ULUSOY

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Eda AYDIN  
Doğum yeri : Trabzon  
Doğum tarihi : 26.07.1993  
Medeni hali : Bekar  
Yazışma adresi : Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji  
Mühendisliği Bölümü 06800 Beytepe/ANKARA  
Elektronik posta adresi : aydineda06@gmail.com  
Yabancı dili : İngilizce

### EĞİTİM DURUMU

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü,  
Ankara (2011-2015)  
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü,  
Ankara (2017-2020)

### Hakemli konferans/sempozyumların bildiri kitaplarında yer alan yayınlar

- Aydın, E., Ulusoy, İ., Akkaş., E., Analogue and Numerical modelling of double-piston piecemeal calderas. Cities on Volcanoes 10, Napoli, Italy, Miscellanea, INGV Abstracts Volume of the International meeting 43, Sept. 2-7, **2018**.
- Ulusoy, İ., Aydın., E., Çubukçu, H.E., Topographic modelling of caldera analogues using Structure from Motion – Multi-view stereophotogrammetry, EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria, Geophysical Research Abstracts Vol. 18, **2016a**.
- Ulusoy, İ., Aydın, E., Çubukçu, H.E., Parçalı kaldera oluşumunun analog ve nümerik modellemesi, 1. Türkiye Volkanoloji Çalıştayı, MTA, Ankara, **2016b**.





