



İdrisyayla Volkanitlerinde (Kırka-Eskişehir) Gözlenen Sferulitik Riyolitlere ait İlk Petrografik Dokusal Veriler
The First Petrographic Textural Data of Spherulitic Rhyolites Observed in the İdrisyayla Volcanites (Kırka-Eskişehir)

Yeşim Yücel-Öztürk^{1*} , Cüneyt Akal¹ 

¹ *Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Tınaztepe Yerleşkesi, 35160, Buca-İzmir*

• Geliş/Received: 10.03.2022 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 26.05.2022 • Kabul/Accepted: 27.06.2022
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 16.08.2022 • Baskı/Printed: 31.01.2023

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: Sferulitik (küresel) yapılar özellikle alkali magmatik kayalarda gelişen, eşmerkezli olarak zonlu kristal kümeleri olarak tanımlanırlar ve genellikle farklı mineral katmanları veya kabukları şeklinde ortaya çıkarlar.

Batı Anadolu'da Kırka-Afyon-Isparta Volkanik provansı içinde Kırka (Eskişehir) bölgesinde gözlenen volkanosedimenter seri baskın olarak Erken Miyosen yaşlı dasitik-riyolitik bileşimli volkanikler, gösel kireçtaşları, borat-içerikli kilaşları, tuf, stromatolitik kireçtaşları ve riyolitler ile bazaltlardan oluşmaktadır. Bu çalışma İdrisyayla kuzeyindeki Neojen seri içerisinde yüzlek veren sub-alkali riyolitik lav domunun kenar zonunda gözlenen sferulitik yapıların iç oluşum mekanizmaları tanımlanmıştır. Riyolitler, grimsi açık kahve renkte, hipokristalen hiyalopilitik-holohiyalin ve sferulit özellikler sunmaktadır ve tamamen akma yapısı sunan, nadir olarak gelişmiş özşekilli plajiyoklas, sanidin ve kuvars mikrokristalleri içeren volkanik camdan oluşmaktadır. Riyolitlerin dış yüzeyinde gözlenen küresel yapılar yaklaşık 10-15 cm boyutlarına kadar ulaşmaktadır. Neredeyse tam yuvarlağa yakın şekil sunan sferulitler lav akma bantları içinde konsantrik halkalar şeklinde görünmektedir. Sferulitik yapıların iç dokusunda volkanik cam fazının akma bant dokusu devamlılık sunmaktadır.

Söz konusu sferulitik yapılar, etkilendiği yüksek sıcaklık ve hızlı soğuma sonucunda, devitrifikasyon mekanizmasıyla ortaya çıkmıştır. Sferulitik riyolitlere ait petromineralojik özellikler, erken magmatik süreçte, silise aşırı doygun sıvının, nispeten farklı yoğunluktaki silikat sıvı fazları içinde kristalleştirdiğini ve bir merkezden itibaren ışınal kuvars-feldispat kristal büyümelerinin, bu riyolitlerde sferulitik yapının oluşumuna neden olduğunu göstermektedir. Bunun yanında, yerel olarak akma bantlarının kıvrımlanması ile oluşan eksen boşluklarındaki katı faz mineral büyümesi ve devamında sıvı fazdan ışınal mineral büyümelerinin geliştiği litofiz benzeri yapıların da riyolitin kenar fazında laminar dokuyu değiştirdiği önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Devitrifikasyon, küresel yapılar, litofiz, riyolit, Kırka, Eskişehir.

Abstract: *Spherulitic structures are classically defined as concentrically zoned crystal clusters that form in igneous systems (especially in alkaline igneous rocks), and usually occur as different mineral layers or shells.*

The volcano-sedimentary series observed in the Kırka region, south of Eskişehir, within the Kırka-Afyon-Isparta Volcanic Province, Western Anatolia, consists predominantly of Lower Miocene volcanic and pyroclastic sequences with rhyodacitic-rhyolitic composition, lacustrine limestones, borate-bearing claystones, tuff, stromatolitic limestones and rhyolites and basalts. The formation mechanisms of the spherulitic structures observed in the marginal zone of the sub-alkaline rhyolitic lava dome outcropping within the Neogene series west of İdrisyayla in

Kırka (Eskişehir) region are described for the first time with this study. The rhyolites are grayish light brown in color, have hypocristalline hyalopilitic-holohyaline texture and have spherical structures defined as spherulites. These rocks have a completely flowing structure and are composed of volcanic glass containing rare euhedral plagioclase, sanidine and quartz microcrystals, the spherical structures observed on the surface of the rhyolites are up to 10-15 cm in size. The spherulites, which are almost round in shape, appear as concentric rings within the lava flow bands. The flow band texture of the volcanic glass phase is continuous with the inner texture of the spherulitic structures.

This study suggests that the spherulitic structures in the İdrisyayla (Kırka-Eskişehir) region formed by the devitrification mechanism as a result of high temperature and rapid cooling. The petro-mineralogical features of the spherulitic rhyolites show that during the early magmatic stage, the oversaturated liquid crystallized in silica-rich fluid phases with relatively different densities, and radial quartz-feldspar crystal growths from a center caused the formation of the spherulitic structure. It is also suggested that the lithophysae-like structures formed by the crystal growths representing the solid phase in axial cavities due to the local folding of flow bands and the later radial mineral growths representing the liquid phase also changed the laminated texture in the marginal phase of the rhyolite.

Keywords: Devitrification, lithophysae, rhyolite, spherulite, Kırka, Eskişehir.

GİRİŞ

Birçok magmatik kompleks içinde, plutonik ve volkanik kayaların kenar zonlarında gelişen ve orbikül, sferülit ve litofiz olarak isimlendirilen özgün küresel yapılar nadiren ortaya çıkmasına karşın, çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiş ve oluşumlarına ilişkin farklı genetik hipotezler geliştirilmiştir (örn., Sederholm, 1928; Goodspeed, 1942; Salotti ve Fouts, 1964; Leveson, 1966; Barrière, 1972; Couturié, 1973; Alexander, 1974; Elliston, 1984; Chauris vd., 1989; Piboule vd., 1989; Péloquin vd., 1996; Lindh ve Näsström 2006; Ballhaus vd., 2015; Breikreuz, 2013; Newton, 2020). “Orbikül” ve “sferülit” terimleri mineralojik bileşim ve petroloji ile sınırlandırılmayan genel bir tanım olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. “Orbikül” terimi genel olarak çevresindeki magmatik, migmatitik veya metamorfik ana kaya ile tezat oluşturan herhangi bir katmanlı küresel yapıyı tanımlamak için kullanılmaktadır (Leveson, 1966). Leveson (1966)’ya göre klasik orbiküler yapılar, merkezde bir çekirdek ve bu çekirdekten farklı doku ve/veya mineralojiye sahip ışınal (radyal) veya teğet yönelimli minerallerden oluşan, ardışık dizili (konsantrik) dış kabuklarla karakterize edilmektedir (örn; Thompson ve Giles, 1974; Enz vd., 1979; Thompson ve Giles, 1980; Enz vd., 1980; Johnson vd., 2018). Dikkat çekici halka-benzeri görünümünden dolayı jeolojik anlamda büyük

merak uyandıran orbiküler yapılar sunan kayalar, bulunduğu ortamın fiziko-kimyasal koşulları hakkında önemli ipuçları sunar. Orbiküler yapı, birçok granitik kayacın belirgin bir özelliği olduğu gibi, aynı zamanda gabro, diyorit, migmatit, tuf vb. kayalarda da gözlenmektedir (örn. Srinivasan ve Roop Kumar, 1995; Prakash, 1996; Shrivastava vd. 2004; Lindh ve Näsström, 2006). Bu yapıların kökeni magmatik, metamorfik veya migmatitik olabilir ve olasılıkla oldukça yüksek sıcaklık koşullarında oluşmaktadır (Barriere, 1972; Vernon, 1985; Breikreuz, 2013). Orbiküler yapılar üç ana grup altında toplanmaktadır: (1) proto-orbiküler, (2) tek-kabuklu ve (3) çok-kabuklu orbiküler yapı (Elliston, 1984). Kendi matriksi içinde çok sayıda veya seyrek şekilde dağılmış olan orbiküller çok sayıda kabukla çevrelenmiş bir çekirdek ile birlikte, boyutları birkaç santimetreden 35 cm’ye kadar değişebilen oval veya küresel şekillerde bulunabilmektedir. Bu yapılar; (1) etrafındaki plutonların (gabro, diyorit, granodiyorit, siyenogranit, peralümin granit), (2) orbiküller arasındaki matriksin (gabroik, diyoritik, granitik veya pegmatitik), (3) çekirdek ve bunların içyapılarının ve (4) kabukların doğasına göre önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir (örn. Leveson, 1966). Çekirdekler, plutonik (granitler, granodiyoritler, diyoritler, gabrolar) ve metamorfik kayalar (metapelitler, amfibolitler, peralüminyumlu kalıntılar) veya kristallerden

(genellikle feldispat) oluşabilmektedir ve küresel yapının oluşmaya başladığı andan daha önce varolan durağan çekirdekler olarak yorumlanmaktadır. Ardışık dizili (konsantrik) kabuklar ışınal veya teğet yönelimlidir ve kuvars, biyotit ve/veya amfibol ile birlikte bulunan plajyoklas ve/veya K-feldispat mineralleri ile karakterize edilmektedir. Literatürde orbiküler yapıların farklı oluşum mekanizmalarını; (1) magma içinde merkezler etrafında aşırı doyumluk ile ritmik kristalleşme (Leveson, 1966); (2) magmada karışmayan damlalar (sıvı karışmazlığı) (Leveson, 1966); (3) basınç ve sıcaklıktaki değişim ile oluşan ötektoid etrafında bir eriyiğin dalgalanması (Iddings, 1909); (4) magma ile bir ksenolit/ksenokristal kapanımı arasındaki tepkime (Holgate, 1954); (5) Liesegang halkalarının oluşumuna benzer şekilde granitleşme sırasında difüzyon ve ritmik çökme (Carl ve Amsutz, 1958) şeklinde özetlenebilir.

Bu çalışma, İdrisyayla bölgesinin (Kırka-Eskişehir) batısında, Göcenoluk'un yaklaşık 7 km kuzeyinde Miyosen volkanik seriye ait riyolitlerde tanımlanan küresel (sferülitik) yapı oluşumlarının ayrıntılı mineralojik ve petrografik özelliklerini ortaya koymaktadır. Bu küresel yapılar, riyolitik bileşime sahip volkanik cam bir matriks içinde K-feldispat-kuvars ışınal büyümelerinden oluşmaktadır. Aynı zamanda oluşumları süresince litofiz benzeri boşluklar ve bu boşluklarda yer yer çubuk agat oluşumlarına benzer katı, sıvı ve gaz faz aşamalarında ikincil mineraller (kuvars vb.) geliştirdikleri de gözlenmektedir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen ilk petrografik ve mineralojik veriler söz konusu küresel yapıların oluşumunun daha iyi anlaşılmasını sağlamak amacıyla kullanılmıştır.

BÖLGESEL JEOLJİ

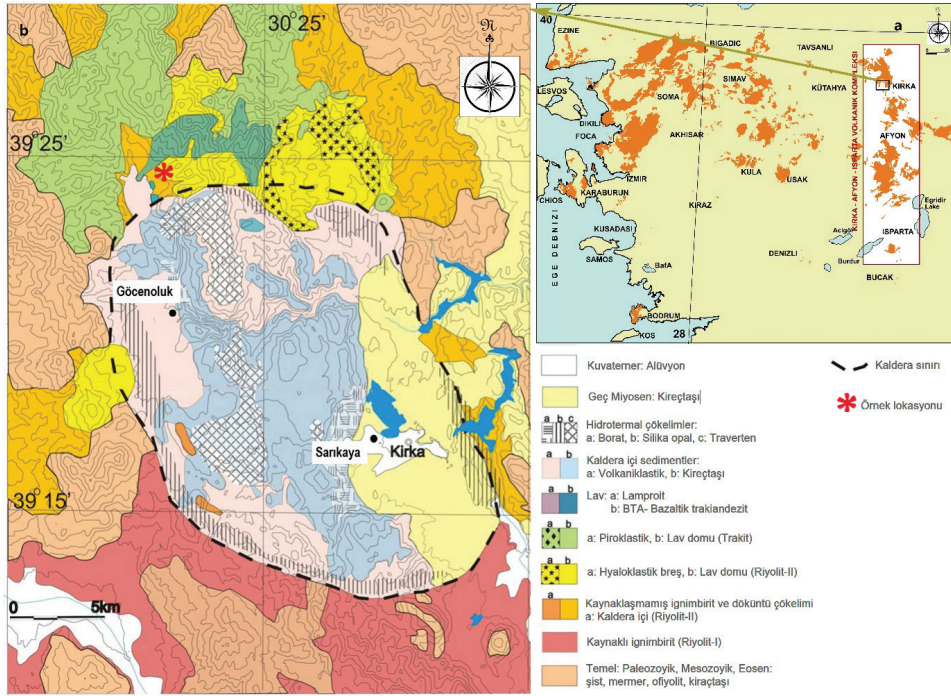
Batı Anadolu, Miyosen öncesi sıkışma rejimi sırasında birleşmiş çeşitli tektono-stratigrafik birimlerden oluşmaktadır. Bunlar, Neo-Tetis okyanusunun kapanması ve bu kıtasal blokların

çarpışması ile ilişkili olarak İzmir Ankara Sütür Zonu (İASZ) ile ayrılan kuzeyde Sakarya zonu ve güneyde Anatolid-Torid bloğunu içermektedir (Şengör ve Yılmaz, 1981; Okay vd., 1996; Okay ve Satır, 2000). Bölgede Miyosen öncesi temel birimlerini büyük ölçüde Neojen volkanik ve tortul kayaçlar örtmektedir. Çarpışma sonrası magmatik aktivite, bölgenin kuzey kesiminde Eosen'de başlamış ve Geç Miyosen'de güneye doğru devam ederek Batı Anadolu volkanik kuşağını oluşturmuştur. Batı Anadolu'daki Miyosen volkanik aktivitesi, çeşitli havzalarda (örneğin, Sultançayır, Bigadiç, Kestelek, Emet ve Kırka) gösel çökme ile eş zamanlı gelişmiştir ve ekonomik borat yatakları ile yakından ilişkilidir (örn., Helvacı ve Yağmurlu, 1995; Helvacı, 1995; Helvacı ve Alonso, 2000; Helvacı ve Orti, 1998, 2004; Erkül vd., 2005; Ersoy vd., 2011; Seghedi ve Helvacı 2016; Helvacı vd., 2020).

Kırka Havzası'nın temel kayaçları, Sakarya Zonu altında Anatolid-Torid Bloğunun yiten kuzey kenarını temsil eden İASZ ofiyolitik kayaları ile Afyon ve Tavşanlı zonlarının yüksek basınç metamorfik kayaçlarından oluşmaktadır (Pourteau vd., 2016). Bu birimler, KB Anadolu'da geniş alanlar kaplayan Alt Eosen yaşlı tortul birimler tarafından uyumsuzlukla örtülmüştür (Özcan vd., 1988). Kırka Havzası'nın batı kesimi, ağırlıklı olarak ekonomik borat yatakları ile birlikte Alt Miyosen gösel çökelleri içermektedir. Kırka borat yatağı dünyadaki ana boraks kaynağıdır (örn., Helvacı ve Orti, 2004). Kırka havzasında bazaltik, trakiandezit-trakiandezit ve bunlarla eş yaşlı riyolit kayaçlar ile piroklastikleri (21-17 Ma) bölgedeki alkali volkanik fazı temsil etmektedir. Tavşanlı-Afyon arasında geniş yüzlekleri tanımlanan büyük riyolitik ignimbrit oluşumları, Tavşanlı-Afyon bölgesinin genleşmesi ile yakından ilişkilidir. Kırka-Afyon-Isparta volkanik sahasında elde edilen veriler, bu bölgede "Kırka-Frigya kalderası" olarak adlandırılan bir kaldera yapısının tanımlanmasına olanak sağlamıştır (Şekil 1a, b) (Seghedi ve Helvacı, 2016; Helvacı vd.,

2020). 25 My'dan bu yana gelişen tektonik yönlü basınçlar (stres), magma odasının KKB-GGD yönlü uzamasına neden olmuş ve kaldera tabanının kabaca elips şeklini vermiştir. Kaldera, 19 My'dan başlayarak bir dizi çökme olayı sırasında büyük oranlarda kaldera içi ve dışı ignimbrit üretmiştir. Çökme sonrası kaldera içi sedimantasyon ve kuzey kenarda gelişen volkanizma (18.6 My) geniş bir bileşimsel aralık sunan bir dizi volkanik yapı (kubbe ve lav) ve çökme kaynaklı faylarla denetlenmiştir (Seghedi ve Helvacı, 2016). Kıta altı litosferik manto içindeki zenginleşmiş manto bileşenleri, açılma başlangıcında basınç azalmasıyla ergimeye başlamıştır. Yükselen manto eriyiklerinin parçalanmasından ortaya çıkan ısı, silis oranı yüksek, sulu kabuksal rezervuarları üretmiştir. Bu eriyiklerin kıtasal kabukla etkileşimi ayrıca kabuk anateksisine ve dolayısıyla iki farklı

bileşime neden olmuştur; bunlar Seghedi ve Helvacı (2016) tarafından riyolit-1 ve riyolit-2 olarak adlandırılmaktadır (Şekil 1b). Kaldera oluşumundan sonra, küçük hacimli kaldera içi ve dışı epizodik riyolitik, bazaltik-traki-andezitik, trakitik ve lamproitik volkanizmaya geçiş olmuştur. Lamproitik volkanizma en genç olanıdır (16.2 Ma) ve zenginleşmiş bir manto litosferinde gelişen daha ilksel magma girdisine işaret etmektedir (Seghedi ve Helvacı 2016). Volkanik stratigrafisi, kaldera ve kaldera sonrası yapıları oluşturan patlamalar sırasındaki magmatik sistemi doğrudan ortaya koymaktadır. Bu sistem, çarpışma sonrası genişlemeli ortamda, evrimsel olarak silisik magma ile birlikte değerlendirilmesi gereken potasik - ultrapotasik kayaların oluşumunun mükemmel bir örneğini sunmaktadır (Seghedi ve Helvacı 2016 ve buradaki referanslar).



Şekil 1. Çalışma alanına ait **a)** yer bulduru (volkaniklerin dağılımı 1/500.000 ölçekli MTA jeoloji haritasından derlenmiştir) ve **b)** sferulitik riyolitlerin gözlemlendiği Kirka-Frigya kalderası ve çevresinin jeoloji haritası (Seghedi ve Helvacı (2016)'dan alınmıştır).

Figure 1. a) Distribution of volcanic rocks in western Anatolia (Modified from 1/500,000 scale geological map of Turkey (MTA, 2002), **b)** Geological map of the Kirka-Phrygian caldera where spherulitic rhyolites are observed (after Seghedi and Helvacı 2016).

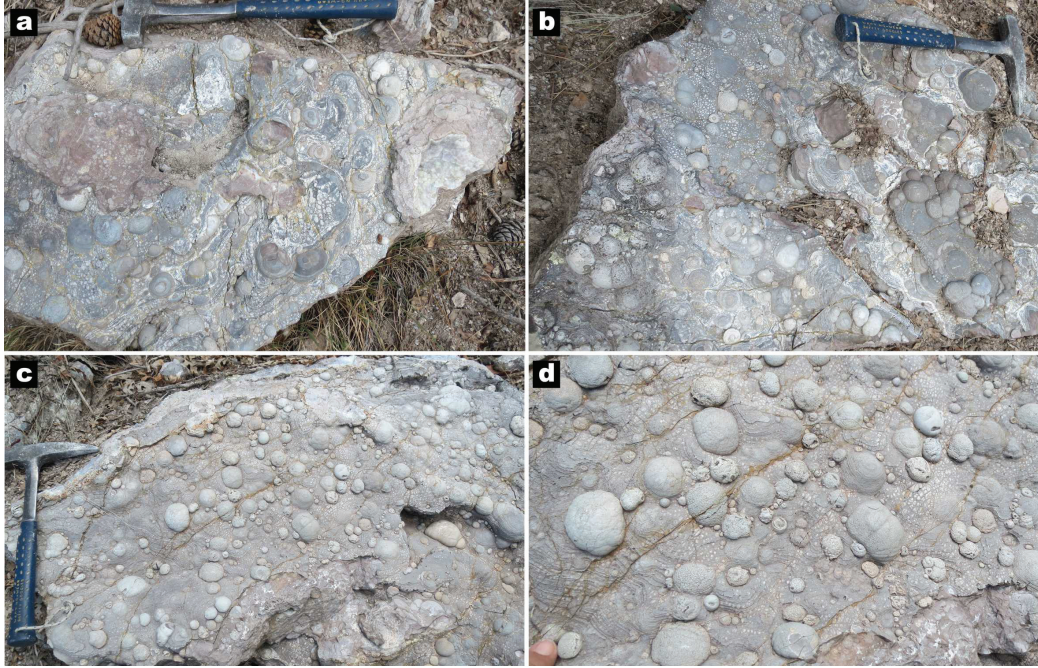
İDRİSYAYLA RİYOLİTERİNDE GÖZLENEN KÜRESEL YAPILARIN TANINMASI

Saha Gözlemleri

Çalışma alanında iyi gelişmiş sferulitik yapılar sunan riyolit yüzlekleri, “Kırka-Frigya kalderası”nın kuzey kenarında, İdrisyayla yöresinin batısında Göcenoluk’un yaklaşık 7 km kuzeyinde gözlenmektedir (Şekil 1b). Çalışma alanında, riyolit ana kayasına ait geniş ölçekli bir mostra izlenmemektedir. Ancak sferulitik yapıların saptandığı lokasyonda riyolit, açık kahverenkli, ince taneli şekilde gözlenmekte ve küresel yapıların yanısıra akma dokusu da belirgin olarak görülebilmektedir (Şekil 2a-d).

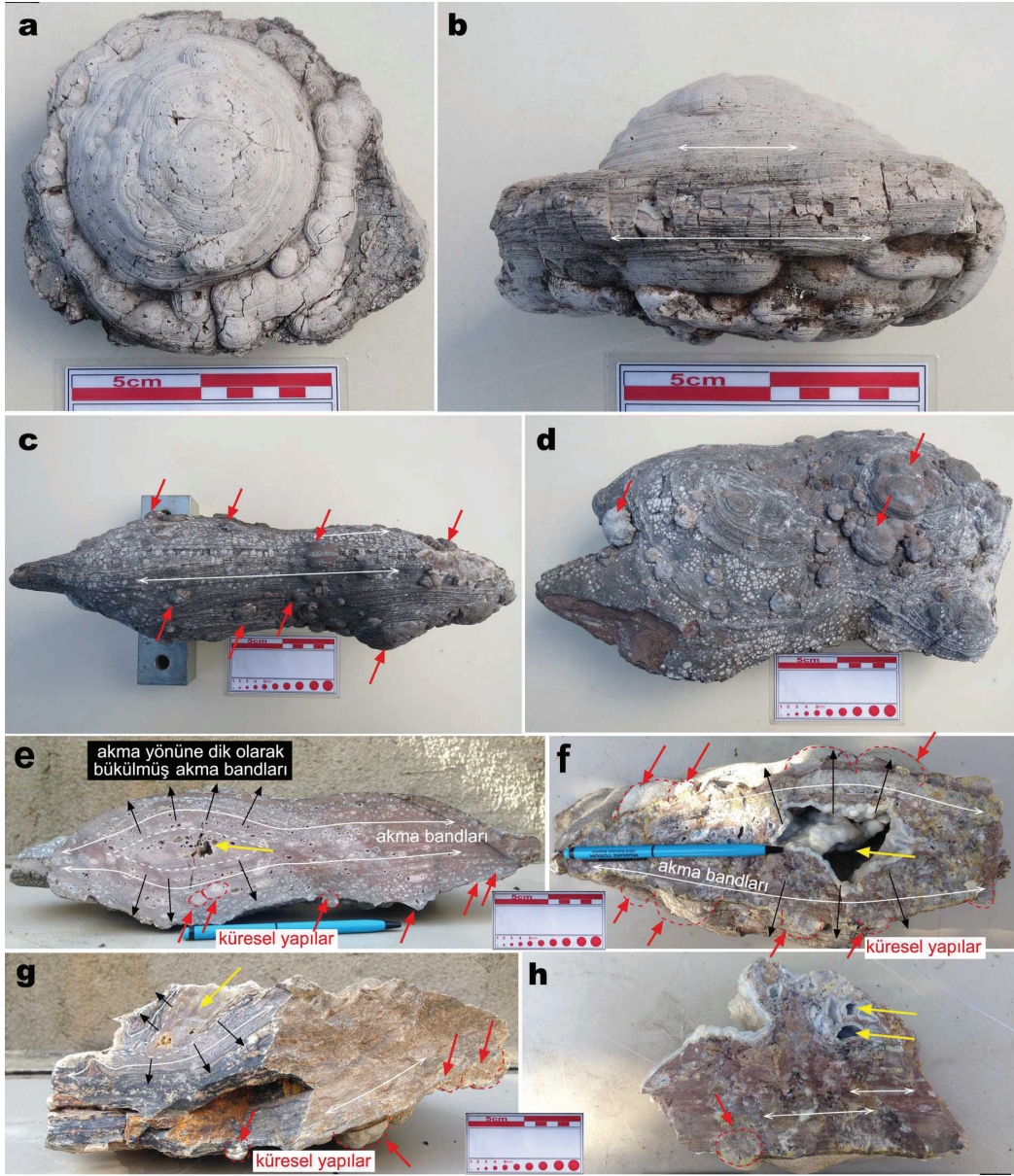
Bu çalışmada incelenen riyolitlerde saptanan küresel yapılar morfolojik olarak genel sferulitik yapılara benzerlik sunmaktadır (Şekil 3). Küreler

birkaç santimetreden yaklaşık 10-15 cm çapına kadar farklı boyutlarda ortaya çıkmaktadır (Şekil 3a). Kabuklar çoğunlukla elips ve ayrıca yarım daire şeklindedir (Şekil 3b). Kabukların aralığı yer yer düzensiz ve/veya düzenlidir. Makro küresel yapılarda gözlenen ardışık dizimli halkaların renk ve boyutları ritmik şekilde değişmektedir. Karakteristik akma bantlarına koşut olarak gelişen bu yapılar, içinde bulunduğu kayaca göre daha açık renktedir ve küre üst noktasına doğru küçülen ardışık dizimli daireler ve içinde geliştiği volkanik cam fazına göre daha dayanımlı olması ile kolayca ayırt edilmektedir (Şekil 3c ve d). Bunun yanında riyolitik lav akmaları içinde akma sınırında oluşan kıvrımlanmalara dik eksenlerdeki litofiz benzeri mekanik boşluklar (Şekil 3e ve f) ve bunlarda ikincil mineral büyümeleri ayırt edilmektedir (Şekil 3g-h).



Şekil 2. İdrisyayla bölgesinin doğusunda sferulitik yapılardan dolayı kabarcıklı (knobby) yüzey sunan riyolit lav akmasına ait **a)** genel arazi görüntüsü. Küreler, riyolitlin silisleşme alterasyonu ile oluşmuştur. **b)** Beyazımsı nodüller sferulitik kürelerdir. **c)** Grimsi kahverenkli kısımlar volkanik cam fazca zengin riyolittir. **d)** Sferulitik kürelere ait daha yakın mostra görüntüsü.

Figure 2. *a)* General field view of the rhyolite lava flow including a knobby surface due to spherulitic structures in the east of the İdrisyayla region. Spherulites were formed by silicification of rhyolite. *b)* Whitish nodules are spherulitic structures. *c)* The grayish brown parts are volcanic glass-rich rhyolite. *d)* Closer field view of spherulitic structures.



Şekil 3. İdrisyayla riyolitlerinde gelişen çapları birkaç santimetreden **a)** 10-15 cm'e kadar değişen sferulitik yapılara ait el örnekleri. **b)** Sferulit morfolojisinde izlenen doku, genel akma bantlarına paraleldir (beyaz oklar). **c)** Beyaz çift yönlü oklar genel akma bantlarını göstermektedir. **d)** Küresel yapılarda renk ve boyutları ritmik şekilde değişen halkalar kırmızı oklarla gösterilmektedir. **e)** Akma yönüne dik olarak bükülmüş akma bantları ve **f)** bunların içinde gelişen litofizal boşluklar (sarı okla gösterilen alan). **g, h)** Litofiz benzeri gaz boşluklarında (sarı oklar) gelişen ikincil kuvars oluşumları. Tüm fotolarda kırmızı oklar küresel yapılara işaret etmektedir.

Figure 3. Hand specimens of spherulitic structures from a few centimeters **a)** 10-15 cm in diameter observed in the İdrisyayla rhyolites. **b)** The texture observed in the spherulite morphology is parallel to the general flow bands (white arrows). **c)** White bidirectional arrows indicate general flow bands. **d)** In the spherulitic structures, rings of rhythmically varying color and size are indicated by red arrows. **e)** Flow bands bent perpendicular to the flow direction and **f)** lithophysae spaces developed within them (area indicated by yellow arrow). **g, h)** Secondary quartz in lithophysae cavities (yellow arrows). In all photos, red arrows indicate spherical structures.

Petrografi

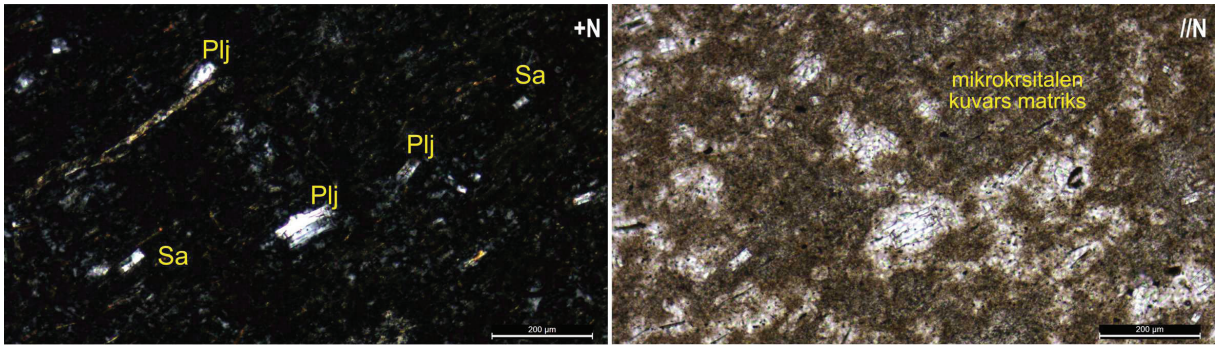
Sferulitik yapıların belirgin olarak gözleendiği 5 örnekten Dokuz Eylül Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü İnce Kesit Atölyesinde petrografik kesitleri hazırlanmıştır. Sferulitlerin iç dokusal özelliklerinin ayrıntılı şekilde görülebilmesi için kesit yönleri bu yapıların ekstenal yönlerine paralel şekilde seçilmiştir. Genel olarak sferulitik yapıların dışında, hipokristalen hyalopilitik-holohyalin doku sunan riyolit ana kayası, volkanik cam içinde seyrek olarak öz şekilli plajiyoklas, sanidin ve kuvars mikrokristalleri ve yer yer killeşmiş volkanik camdan oluşmaktadır (Şekil 4).

İdrisyayla riyolitlerinde gözlenen sferulitik yapıların iç dokularında ilgi çekici şekilde korunmuş akma bantları ve bunlara dik yönde gelişen ikincil kristal büyümeleri (kuvars, K-feldispat ?) gözlenmektedir (Şekil 5a-d). Bunun yanında yarım küre şekilli yapılara daha yakından bakıldığında, akma bantlarının yanında yarım kürenin tabanında (lav alt-üst konumunu tanımlayabilen), bir merkezden itibaren farklı büyüklükte mineral büyümesinden kaynaklanan (olasılıkla kuvars?) zonlu yapı sundukları görülmektedir (Şekil 5e ve f). Şekil 5g ve 5h'de

lifsi kuvars büyümeleri ışımsal dalgalı sönmesi ile ayırt edilmektedir.

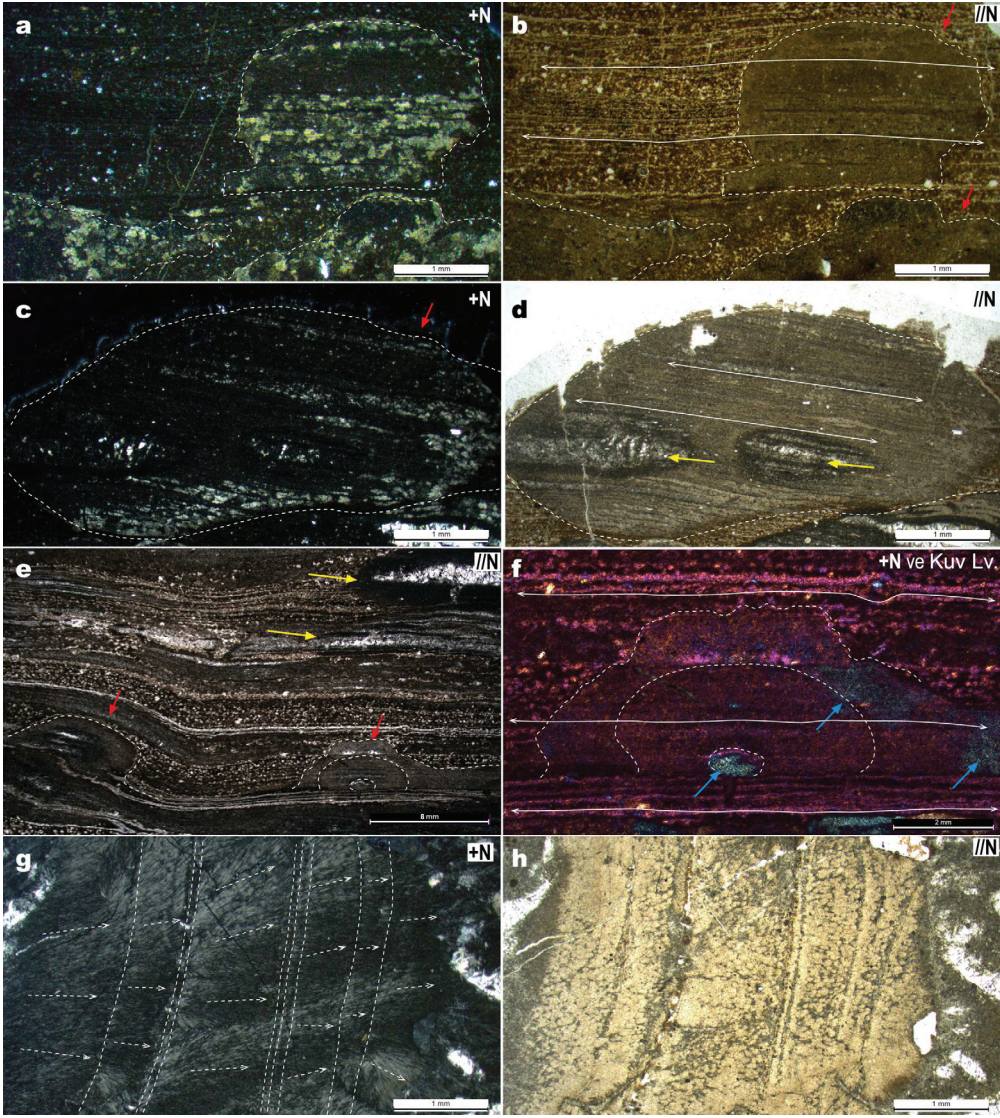
İncelenen örneklerde litofiz benzeri boşluklu doku oldukça dikkat çekicidir (Şekil 6 ve 7). Bu yapılar genelde lamel-tipi (Şekil 7a) ve yarım ay şekilli (Şekil 7c) litofiz gelişimine işaret etmektedir. Ayrıca, Şekil 6b ve 7e'de beyaz kare içine alınan alanlarda görüldüğü üzere, hilal şekilli boşluklar, konsantrik şekilde akma yönünde genişlemiştir. Bu boşlukların yönü, muhtemelen soğuma sürecinde volkanik kütlede yerel yönlü basınç alanları ile denetlenmiştir.

Akma bantları ile çevrelenmiş litofiz benzeri bu boşluklara daha yakından bakıldığında çubuk agatlara benzer kuvars bileşimli bantlar gözlenmektedir ve birincil olduğu düşünülen lifsi kuvars kristalleri ışımsal dalgalı sönme sunmaktadır (Şekil 8a-d). Bununla birlikte, iri kuvarlar içinde ikincil olarak gelişmiş öz şekilli kuvars kristalleri karakteristiktir (Şekil 8e ve f). Bunlar ilk aşamada boşluk duvarlarına dik büyümüştür, daha sonra sıvı faz aşamasında lifsi kuvars büyümesi tüm yüzeylerde ince bir film tabakası oluşturmuştur. Son aşamada ise, boşluk merkezine doğru lifsi kuvarlar büyüyerek tüm boşluğu doldurmuştur.



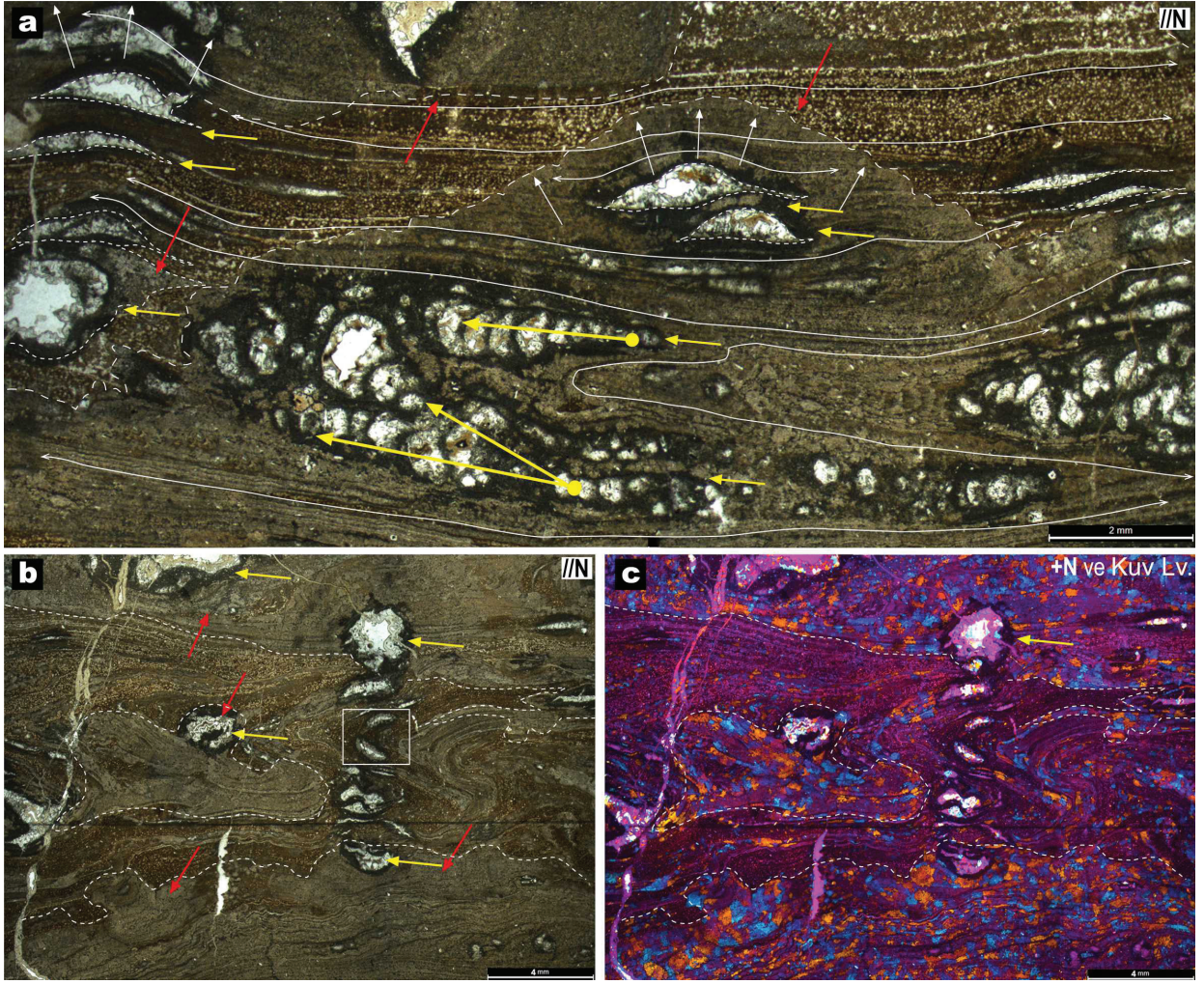
Şekil 4. İdrisyayla riyolitlerine ait genel polarizan mikroskop görüntüsü (Pl: plajiyoklas, Sa: sanidin).

Figure 4. General polarizing microscope view of the İdrisyayla rhyolites (Pl: plagioclase, Sa: sanidine).



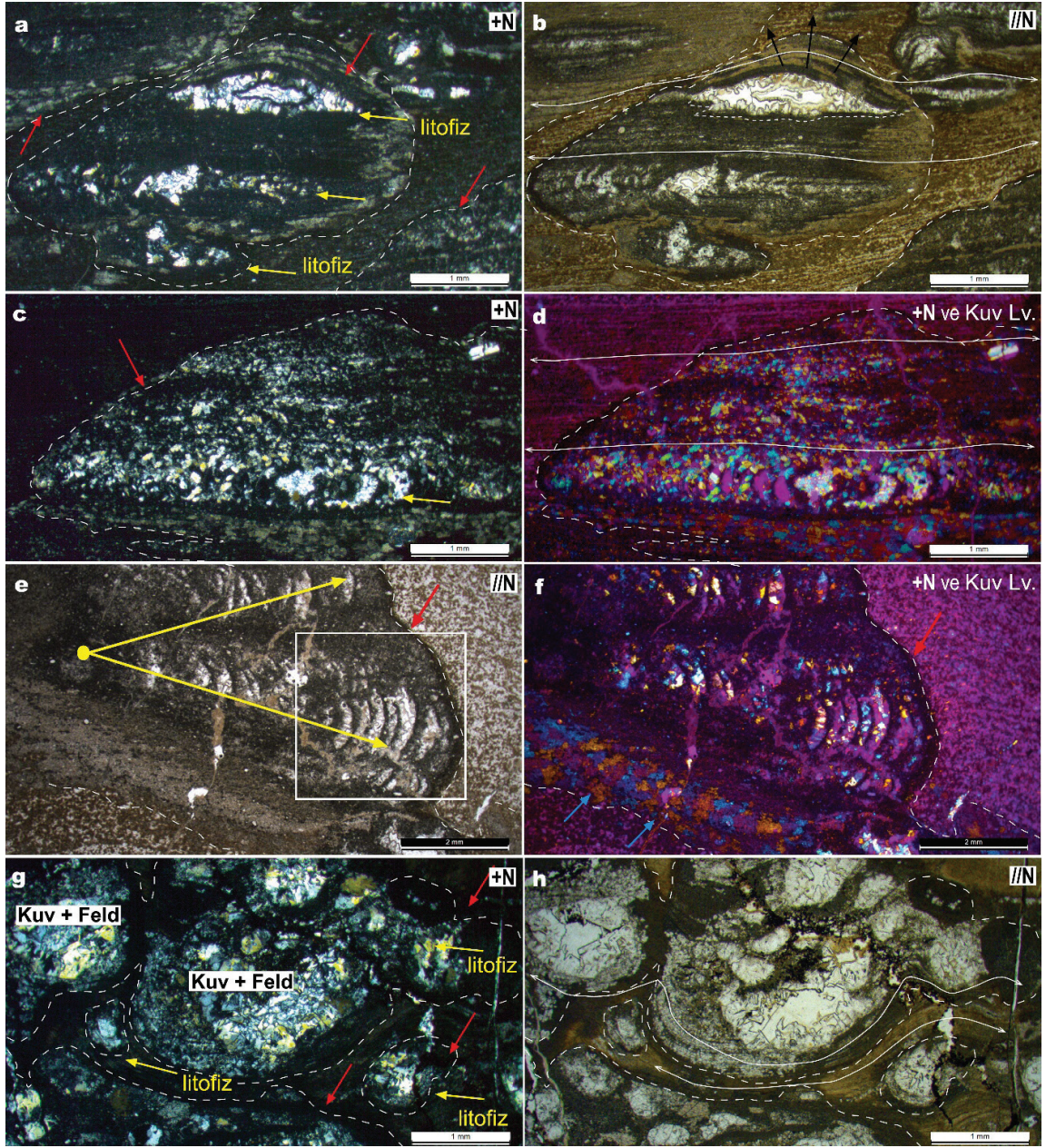
Şekil 5. İdrisyayla riolyitlerinde gözlenen sferulitik yapıların iç dokularına ait **a)** Haç nikol (+N) ve **b)** paralel nikol (//N) mikroskop görüntüleri (beyaz çift yönlü oklar akma yönünü, kırmızı oklar küresel yapıları işaret etmektedir). **c)** +N ve **d)** //N konumda, küresel yapı içinde korunmuş akma bantlarına dik yönde gelişen ikincil kristal büyümeleri. **e)** Akma bantlarının yanısıra yarım küre şekilli yapılar (kırmızı okla gösterilen yapılar) ve **f)** bu yarım küre şekilli yapı tabanında bir merkezden itibaren farklı büyüklükte mineral büyümesinden kaynaklanan (olasılıkla kuvars?) zonlu yapı (mavi oklarla gösterilen alanlar). **g)** +N ve **h)** //N konumda, ışınal dalgalı sönmesi ile ayırtedilen lifsi kuvars büyümelerine ait mikroskop görüntüleri.

Figure 5. a) Crossed (+N) and **b)** parallel nicol (//N) microscope views of the internal textures of the spherulitic structures from the İdrisyayla rhyolites (white bidirectional arrows and red arrows indicate flow direction and spherical structures, respectively). **c)** Crossed (+N) and **d)** parallel nicol (//N) microscope views of secondary crystal growths developed perpendicular to the flow bands preserved in the spherical structure. **e)** hemispherical structures (indicated by red arrows) as well as flow bands, and **f)** zoned structure resulting from mineral growth (probably quartz?) of different sizes from a center at the base of this hemispherical structure (areas indicated by blue arrows). **g)** Crossed (+N) and **h)** parallel nicol (//N) microscope views of fibrous quartz outgrowths distinguished by their radial wavy extinction.



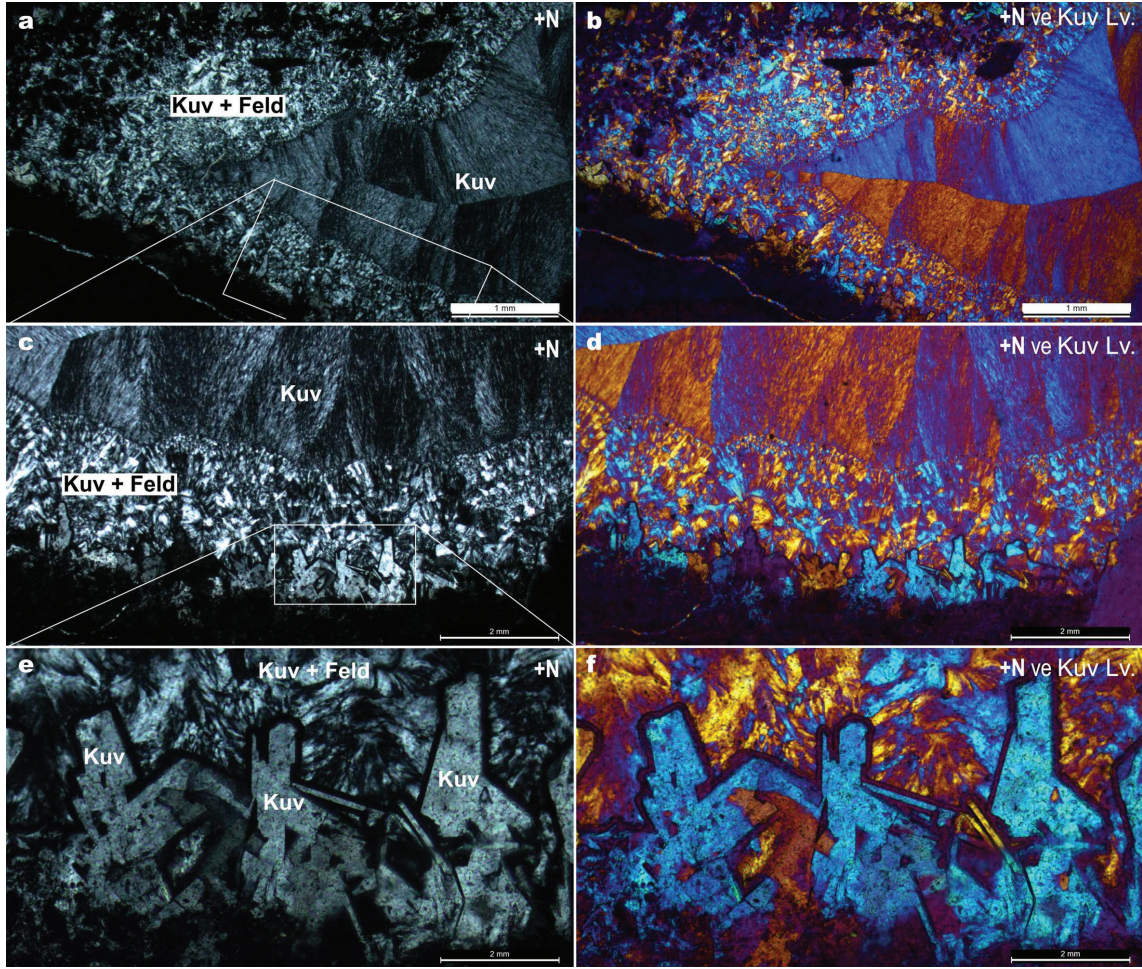
Şekil 6. a) Riyolitlerde gelişen, akma bantlarına koşut ya da bantların kıvrımlandığı lokal stres alanlarında oluşmuş litofiz benzeri yapıları (küçük sarı oklar) içeren //N mikroskop görüntüleri (kırmızı oklar küresel yapılara işaret etmektedir) (sarı kalın oklar akma bantlarının bükülmesine neden olan lokal stres yönlerini göstermektedir). **b)** //N ve **c)** +N ve kuvars levhası sürülmüş konumda, ardışık dizilişli şekilde akma yönünde genişlemiş hilal şekilli litofizal boşluklara ait (beyaz kare) mikroskop görüntüleri.

Figure 6. a) //N microscope view of lithophysae structures (small yellow arrows) parallel to the flow bands or formed in local stress areas where the bands were folded (red arrows indicate spherical structures) (big yellow arrows indicate local stress directions caused bending of the flow bands). **b)** //N and **c)** +N (with quartz plate) microscope views of sickle-shaped lithophysae cavities (white square) enlarged concentrically in the flow direction, with the quartz plate in the plowed position.



Şekil 7. Riyolitlerde yer yer sferulitik yapı içinde gelişen yüksek sıcaklık kristalleşme alanlarında oluşmuş **a, b)** lamel-tipi ve **c, d)** yarım ay şekilli mikro-litofizal yapılara (sarı ok ile belirtilen alan) ait mikroskop görüntüleri. (b)'de siyah oklar akma bantlarının bükülmesine neden olan lokal stres yönlerini göstermektedir. (e) Beyaz kare içinde akma yönünde genişlemiş hilal şekilli boşluklar ve (f) bu boşluklarda ikincil kuvars, feldispat (?) gelişimi (kuvars levhası ile). **g)** +N ve **h)** //N konumunda, litofizal yapıdaki boşlukta gelişen ikincil kuvars-feldispat gelişimine ait mikroskop görüntüleri (Kuv: kuvars, Feld: feldispat).

Figure 7. Microscope views of **a, b)** lamellar-type and **c, d)** half-moon-shaped micro-lithophysae structures (areas indicated by the yellow arrow). In (b), black arrows indicate local stress directions caused bending of the flow bands. **e)** Sickle-shaped cavities enlarged in the flow direction and **f)** secondary quartz, feldspar (?) growths in these cavities. **g)** +N and **h)** //N microscope views of secondary quartz-feldspar growths in lithophysae cavities.



Şekil 8. Litofizal boşluklarda kuvars+feldispat bileşimli bantlara ait genel **a)** +N ve **b)** kuvars levhalı mikroskop görüntüsü. **c, d)** (a)'da diktörtgen alan içinin yakın görüntüsü. **e, f)** Litofizal boşluklarda çubuk agatlara benzer gelişmiş kuvars kristallerinin daha yakından görüntüsü. (Kuv: kuvars, Feld: feldispat).

Figure 8. a) +N and **b)** +N with quartz plate microscope views of secondary quartz-feldspar bands. **c, d)** Close-up microscope views of the rectangular area in (a). **e, f)** A close-up view of quartz crystal growths similar to the Çubuk agates in the lithophysae cavities. (Kuv: quartz, Feld: feldspar).

TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bu çalışma, İdrisyayla kuzeyinde yüzlek veren riyolitlerde gözlenen küresel yapılara ait saha gözlemleri ve petrografisine dayanmaktadır. Elde edilen gözlemler, sferulitik yapı gelişimi ve orbiküler kayaçlar için geliştirilen çeşitli mekanizmalarla birlikte değerlendirilerek karşılaştırılması yapılmıştır. Yaygın olarak orbiküller ile ilişkili özellikler, ksenolitler, tabakalı magmatik kayaçlar, mineral ayrışmaları,

fenokristaller ve kabuk ile çevrelenmiş bir çekirdekten oluşan proto-orbikülleri içermektedir. Magmatik kökenleri sorgulanmamasına karşın, orbiküler kayaçların oluşumu hakkında farklı görüşler ortaya atılmıştır. Tek başına hiçbir hipotez bu yapıların kökenlerine ilişkin genel bir açıklama sağlayamamaktadır. Küresel yapıların oluşumlarına ilişkin çok sayıda model önerilmiştir; (1) silikat-silikat sıvı karışmazlığı, (2) bir çekirdek etrafında içten dışa doğru ardışık dizili büyüme, (3) yüksek viskoziteli magmalarda

magmatik farklılaşma, (4) ilksel (parental) magma içinde kalıntı akışkanlarla yerel olarak dıştan içe kristalleşme, (5) ilerleyen (progresif) kimyasal değişimli akışkanların denetlediği difüzyon, (6) tanımlanamayan sedimenter yapılar, (7) magmatik akış farklılaşması ve (8) devitrifikasyon şeklindedir (Newton, 2020).

Bununla birlikte, orbiküler yapılar ve şekillerinin çeşitliliğini yansıtan çok sayıda oluşum mekanizması önerilmiştir. Örneğin, Barrière (1972), kabukların gelişiminin (büyümesinin) çekirdek etrafında dolaşan silise aşırı doymun magmanın hızlı kristalleşmesine karşılık geldiğini öne sürmüştür. Piboulevd. (1989), orbiküler yapının adiyabatik aşırı soğuma (adiabatic undercooling) ile denetlendiğini öne sürmektedir. Birbirini takip eden kabukların büyümesi aynı zamanda eriyik içindeki farklı bileşenlerin hızlı difüzyon denetimli kristalleşmesi ile ilişkili olabilmektedir (örn. Palmer vd., 1967), ya da Liesegang halkalarına benzer şekilde bir jelden (Leveson, 1966) veya farklılaşma süresince bir magmadan (Aguirre et al., 1976) ritmik aşırı doymunluk ve kristalizasyon yoluyla oluşturulmaktadır. Elliston (1984)'e göre, orbiküllerin geliştiği "magma", hidrosilikatlardan oluşan yoğun makro moleküler hamur ya da jel gibi difüzyon ve reolojik özelliklere sahip olmalıdır. Breitzkreuz (2013), diğer yaygın küresel yapıları tanımlayan "SFERÜLİT" ve "LİTOFİZ" oluşumlarını, volkanik aktivitelere sırasında silise zengin lavların ve ignimbiritlerin soğuma sürecinde, yüksek sıcaklıkta ortaya çıkan kristalleşme alanları olarak tanımlamaktadır. Buna göre sferülitler sıcak cam veya silikat eriyikleri içinde bir merkezden itibaren uzayan ışınal mineral büyümeleridir ve tipik olarak, kristobalit, tridimit ve sanidinden oluşan ışınal veya mikro kristalli bir doku sunarlar (örn. Burkhard, 2003). Breitzkreuz (2013)'e göre litofizler ise oluşumları süresince bir veya daha fazla boşluk geliştiren yüksek sıcaklık kristalleşme alanlarıdır. Litofizler, sferülitler ile aynı yolla oluşmakta, bunun yanında ek süreçleri de içermektedir (Breitzkreuz, 2013). Sferülit ve litofiz gibi yüksek sıcaklık kristalleşme alanları, ilksel volkanik

dokuları gizleyebilmektedir (Ross ve Smith 1961; McArthur vd., 1998). Aynı zamanda bu oluşumlar, içinde bulunduğu volkanik kayanın mekanik özelliklerini değiştirebilmektedir (Hudyma vd., 2004). Bu nedenle, bu tip dokular ve bunların oluşum koşulları, volkanik fasiyes analizi için önem taşımaktadır (McPhie vd., 1993). Aynı zamanda kristalleşme/devitrifikasyon, kimyasal bileşenlerin difüzyonu ile soğuyan felsik (SiO_2 'ce zengin asidik magmatikler) volkanik birimlerden gaz salınımı süreçleri ve bunların karşılıklı ilişkileri hakkında önemli ipuçları içermektedirler (Breitzkreuz, 2013).

İdrisyayla riyoitlerinde gözlenen küresel yapılar morfolojik olarak yukarıda belirtilen mekanizmalarla gelişen klasik orbiküler veya sferolitik yapılara benzerlik sunmakla birlikte, ince kesit incelemelerinde kürelerin genel dokusal ve mineralojik özellikleri, içerisinde geliştiği kayaca oldukça benzemesine karşın, bilinen bir çekirdekten itibaren ışınal yönelimli mineraller ile karakterize edilen dokusal özellikleri göstermemektedir (Şekil 5). Küresel dokuların, geç evrede etkin olduğu düşünülen bir sıvı faz ile etkileşime ait kanıtlar olduğu düşünülmektedir (örn., Newton 2020). Bununla birlikte, riyoitlerde gözlenen boşluklu yapılar aynı zamanda, yerleşme ve soğuma sırasında bir sıvı faz çözünmesinin işareti olarak da yorumlanmaktadır. Farklı bileşimlere sahip eriyiklerde, özellikle alkali sistemlerde (Lofgren, 1971; Spilliaert vd., 2006; Breitzkreuz, 2013), sıvı fazların çözünmesi ile gelişen devitrifikasyon ve kristalleşme süreçlerini tartışan çok sayıda çalışma bulunmaktadır (örn., Gimeno, 2003; Applegarth vd., 2013; Breitzkreuz, 2013; Fisk ve McLoughlin, 2013; Horwell vd., 2013). Bunun yanında, devitrifikasyon süreçleri ile sıvı etkisiyle gelişen ve yüksek sıcaklık kristalleşme alanları olarak tanımlanan küresel dokuların, alkali sıvı fazların çözünmesi ile geliştiği (Ballhaus vd., 2015) ve bunun sonucunda da küresel devitrifikasyon yapılarının oluştuğu belirtilmektedir (Sandsta vd., 2011).

İdrisyayla riyolitlerine ait sferulitik yapılarda, bilinen klasik bir çekirdekten itibaren ışınal mineral dizilimi sunan ardışık dizimli kabukların aksine, ilksel akma bantlarının bu kürelerin içinden bozulmadan korunmuş olması, oluşum süreçleri ile ilgili açıklamayı zorlaştırmakla birlikte, bu yapıların, riyolitik dom yerleşimi ve sınırlı lav akması ile eş zamanlı ve/veya hemen sonrasında yerel olarak devitrifikasyona uğraması sonucu oluştuğu belirtilebilir. Devitrifikasyon süreci, yerleşim sırasında veya hemen sonrasında gerçekleşmiş olmalıdır, çünkü devitrifikasyona uğrayan bölgelerin, küresel yapılar içinde akma dokularının korunması için, plastik davranış sunması gerekmektedir.

İncelenen litofiz benzeri boşluklu dokular oldukça dikkat çekicidir ki bu dokuları oluşturan boşluk gelişiminin ana nedeni, gazların çözünmesi olarak dikkate alınmaktadır (Breitkreuz, 2013). Litofiz yapılar makro ve/veya mikro ölçekte orak-, küre-, zikzak- veya düzensiz-şekilli boşluklar şeklinde gözlenmektedir (Breitkreuz, 2013). En yaygın litofiz türü, bir veya daha fazla yıldız, yarım ay şeklinde oyuklar ve lamel-tipi boşluklar şeklinde karakterize edilmektedir (örn. Sauer, 1893; Gottfried, 1933; Breitkreuz, 2013). Bunun yanında litofizal boşluklar, her zaman kristalleşen alan ile onu çevreleyen sünümlü lav/piroklastik akma birikintisi arasındaki ara yüzde oluşur (örn. McArthur vd., 1998). Çalışma alanından alınan örneklerde gözlenen birden fazla boşluk içeren karmaşık litofiz benzeri yapılar, kristalleşmenin tekrarlayan fazlarını ve ardından boşluk oluşumunu ifade etmektedir (Şekil 6a, 7a ve 7c).

Elde edilen verilerin ışığında bu çalışma, genelde silisçe zengin lav ve ignimbiritlerin soğuyarak kayaklaşması sırasında gelişen ve yüksek sıcaklık kristalleşme alanları olarak tanımlanan sferulitik ve litofizal yapıların, Anadolu'da yüzlek veren özellikle alkali volkanik sahalarda da araştırılması ve iç oluşum mekanizmalarının tanımlanması açısından, giriş niteliğinde önem arz etmektedir.

EXTENDED SUMMARY

Specific spherical structures called orbicule, spherulite and lithophysae occur rarely. These structures that develop in the marginal zones of plutonic and volcanic rocks in many magmatic complexes were described by many researchers (Figure 1) (e.g., Sederholm, 1928; Goodspeed, 1942; Barrière et al., 1971; Barrière, 1972; Moore and Lockwood, 1973; Couturié, 1973; Elliston, 1984; Chauris et al., 1989; Piboule et al., 1989; Péloquin et al., 1996; Lindh and Näsström 2006; Ballhaus et al., 2015; Breitkreuz, 2013; Newton, 2020). Several mechanisms for the formation of spherical structures and orbicular rocks were proposed; (1) silicate- fluid immiscibility, (2) concentric inside-out growth around a core, (3) magmatic differentiation in high-viscosity magmas, (4) outside-in crystallization from localized residual fluids within parental magma, (5) diffusion driven by advancing fluids, (6) misidentified sedimentary structures, (7) magmatic flow differentiation, and (8) devitrification (Newton, 2020).

This study reveals the detailed mineralogical and petrographic features of the spherulitic structures which were first described in the marginal zone of a sub-alkaline rhyolitic lava dome outcropping within the Miocene volcanic series in the west of the İdrisyayla region (Kırka-Eskişehir), approximately 7 km north of Göcenoluk. The hypocrySTALLINE hyalopilitic-holohyaline textured rhyolite has a completely flowing structure and is composed of volcanic glass, containing rare euhedral plagioclase and quartz microcrystals. The spherulitic structures range in diameter from 2 to 15 cm (Figures 2 and 3) and have the same petrographic sequence of mineral layers with similar composition and textures to flow bands in the marginal phase of the rhyolite. The spherulites, which are almost round in shape, appear as concentric rings within the lava flow bands and consist of radial growths of K-feldspar-quartz in volcanic glass. During their formation, they developed lithophysae cavities

and secondary minerals (quartz etc.) in solid, liquid and gas phases similar to agate formations in these cavities (Figures 3, 5 and 6).



This study suggests that the spherulitic structures in the İdrisyayla rhyolites (Kırka-Eskişehir) formed by the devitrification mechanism with high temperature and rapid cooling. The petro-mineralogical features of the spherulitic-textured rhyolites indicate that during the early magmatic stage the oversaturated liquid crystallized in silica-rich fluid phases with relatively different densities, and radial quartz-feldspar crystal growths from a center caused the formation of the spherulitic structure. It is also suggested that the complex lithophysae structures, including multiple cavities, indicate repetitive phases of crystallization and subsequent cavity formation. These structures were formed by crystal growths representing the solid phase in the axial cavities due to the local folding of the flow bands and the later radial mineral growths representing the liquid phase, and also changed the laminated texture in the marginal phase of the rhyolite.

The data presented here have introductory importance in terms of investigating the spherulitic and lithophysal structures, which are generally defined as high temperature crystallization domains during the cooling of silica-rich lava and welded ignimbrites, in alkaline volcanic fields outcropping in Anatolia and defining their internal formation mechanisms.

KATKI BELİRLEME

Bu çalışma, Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje No: 2015.KB.FEN.011). Makaleye yapıcı eleştiri ve önerileriyle katkı sağlayan her üç hakeme içtenlikle teşekkür ederiz.

ORCID

Yeşim Yücel Öztürk  <https://orcid.org/0000-0002-0744-307X>
Cüneyt Akal  <https://orcid.org/0000-0001-9084-7181>

KAYNAKLAR / REFERENCES

- Aguirre, L., Hervé, F. & Del Campo, M. (1976). An orbicular tonalite from caldera, Chile. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University*, 17(2), 231-259.
- Alexander, D.H. (1974). *Petrography and origin of an orbicular lamprophyre dike, Fremont County, Colorado* [Unpublished PhD Thesis]. University of Michigan.
- Applegarth, L. J., Tuffen, H., James, M. R. & Pinkerton, H. (2013). Degassing-driven crystallisation in basalts. *Earth-Science Reviews*, 116, 1-16.
- Ballhaus, C., Raúl O.C. Fonseca, R.O.C., Münker, C., Kirchenbaur, M. & Zirner, A. (2015). Spheroidal textures in igneous rocks - textural consequences of H₂O saturation in basaltic melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 167, 241-252. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.07.029>
- Barriere, M. (1972). Orbicular gabbro of les Alharisses (Neouvielle granodirite, French Pyrenees). *Bulletin de la Societe Francaise Mineralogie et de Cristallographie*, 95(4), 495-506.
- Breitkreuz, C. (2013). Spherulites and lithophysae -200 years of investigation on high-temperature crystallization domains in silica-rich volcanic rocks. *Bull Volcanology*, 75:705, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0705-6>
- Burkhard, D. J. M. (2003). Thermal interaction between lava lobes. *Bull Volcanology*, 65, 136-143
- Carl, J. D. & Amsutz, G. C. (1958). Three-dimensional Liesegang rings by diffusion in a colloidal matrix, and their significance for the interpretation of geological phenomena. *GSA Bulletin* 69 (11), 1467-1468. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1958\)69\[1467:TLRBDI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1958)69[1467:TLRBDI]2.0.CO;2)
- Chauris, L., Hallegouet, B. & Riva, N. (1989). 1st data on an orbicular facies in the Ploumanach red granite (Armorican Massif). *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Serie Ii*, 309(1), 59-62.
- Couturié, J. P. (1973). Un nouveau gisement de granite orbiculaire dans le Massif Central français: le granite du Signal de Randon (Lozere). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 42(4), 305-312.
- Elliston, J. N. (1984). Orbicules: an indication of the crystallisation of hydrosilicates, I. *Earth-Science Reviews* 20, 265-344.
- Enz, R. D., Kudo, A. M. & Brookins, D. G. (1979). Igneous origin of the orbicular rocks of the Sandia Mountains, New Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 90(1), 138-140, 348-380.

- Enz, R. D., Kudo, A. M. & Brookins, D. G. (1980). Igneous origin of the orbicular rocks of the Sandia Mountains, New Mexico: Discussion and reply: Reply. *Geological Society of America Bulletin*, 91(4), 246-247.
- Erkül, F., Helvacı, C. & Sözbilir, H. (2005). Evidence for two episodes of volcanism in the Bigadic , boratebasin and tectonic implications for western Turkey. *Geological Journal*, 40, 545–570.
- Ersoy, E. Y., Helvacı, C. & Palmer, M.R. (2011). Stratigraphic, structural and geochemical features of the NE–SW trending Neogene volcanosedimentary basins in western Anatolia: implications for associations of supradetachment and transtensional strike-slip basin formation in extensional tectonic setting. *Journal of Asian Earth Science*, 41, 159–183.
- Fisk, M. & McLoughlin, N. (2013). Atlas of alteration textures in volcanic glass from the ocean basins. *Geosphere*, 9(2), 317-341.
- Gimeno, D. (2003). Devitrification of natural rhyolitic obsidian glasses: petrographic and microstructural study (SEM+ EDS) of recent (Lipari island) and ancient (Sarrabus, SE Sardinia) samples. *Journal of non-crystalline solids*, 323(1-3), 84-90.
- Goodspeed, C. E. (1942). Orbicular rock from Buffalo Hump, Idaho. *American Mineralogist*, 27, 37-41.
- Gottfried, C. (1933) Über Lithophysen aus dem Porphyr von Baden-Baden. *Geologische Rundschau*, 23, 1–6
- Helvacı, C. (1995). Stratigraphy, mineralogy, and genesis of the Bigadiç borate deposits, western Turkey. *Economic Geology*, 90, 1237–1260.
- Helvacı, C., & Yağmurlu, F. (1995). Geological setting and economic potential of the lignite and evaporite-bearing Neogene basins of western Anatolia, Turkey. *Israel Journal of Earth Sciences*, 44(2), 91-105.
- Helvacı, C., & Orti, F. (1998). Sedimentology and diagenesis of Miocene colemanite-ulexite deposits (western Anatolia, Turkey). *Journal of Sedimentary Research*, 68, 1021–1033.
- Helvacı, C. & Alonso, R.N. (2000). Borate deposits of Turkey and Argentina: A summary and geological comparison. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 9, 1–27.
- Helvacı, C. & Orti, F. (2004). Zoning in the Kırka borate deposit, western Turkey: Primary evaporitic fractionation or diagenetic modifications?. *The Canadian Mineralogist*, 42, 1179–1204.
- Helvacı, C., Yücel-Öztürk, Y., Seghedi, I. & Palmer, M. (2020). Post-volcanic activities in the Early Miocene Kırka-Phrigan caldera, western Anatolia – caldera basin filling and borate mineralization processes. *International Geology Review*, 62, 1719-1736. <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1793422>.
- Holgate, N. (1954). The Role of Liquid Immiscibility in Igneous Petrogenesis. *The Journal of Geology* 62 (5), 439-480. <https://doi.org/10.1086/626191>
- Horwell, C. J., Williamson, B. J., Llewellyn, E. W., Damby, D. E. & Le Blond, J. S. (2013). The nature and formation of cristobalite at the Soufrière Hills volcano, Montserrat: implications for the petrology and stability of silicic lava domes. *Bulletin of Volcanology*, 75(3), 696.
- Hudyma, N. B., Burçin, A. & Karakouzian, M. (2004). Compressive strength and failure modes of lithophysae-rich Topopah Spring Tuff specimens and analog models containing cavities. *Engineering Geology*, 73, 179–190. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.003>
- Iddings, J. P. (1909). *Igneous rocks: Composition, texture and classification, description and occurrence*. University of Michigan Library, 744p.
- Johnson, S. J., Bertollett, E., Gualda, G., Davidson, J. & Hampton, S.J. (2018). Investigating the origin of an orbicular granite: Karamea, New Zealand. *GSA Annual Meeting*; 4 Nov. 2018; Indianapolis, Indiana, U. S. A.
- Leveson, D. J. (1966). Orbicular rocks: a review. *Geological Society of America Bulletin*, 77, 409-426.
- Lindh, A. & Näsström, H. (2006). Crystallization of orbicular rocks exemplified by the Slättemossa occurrence, southeastern Sweden. *Geological Magazine*, 143(5), 713–722. <https://doi.org/10.1017/S001675680600210X>
- Lofgren, G. (1971). Spherulitic textures in glassy and crystalline rocks. *Journal of Geophysical Research*, 76(23) 5635–5648. <https://doi.org/10.1029/JB076i023p05635>
- McArthur, A. N., Cas, R. A. F. & Orton, G. J. (1998). Distribution and significance of crystalline, perlitic and vesicular textures in the Ordovician Garth Tuff (Wales). *Bulletin of Volcanology*, 60, 260–285. <https://doi.org/10.1007/s004450050232>
- McPhie, J., Doyle, M. & Allen, R. (1993). *Volcanic textures—a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*. Univ Tasman CODES 196 pp.
- Moore, J. G. & Lockwood, J. P. (1973). Origin of comb layering and orbicular structure, Sierra Nevada

- Batholith, California: Reply. *Geological Society of America Bulletin*, 84(12), 4007-4010.
- Newton, T. S. (2020). *A Compositional and Textural Investigation of the Goldie Lamprophyre, Fremont County, Colorado*. [Unpublished MSc Thesis]. The Graduate Faculty of Texas Tech University, 258p.
- Okay, A. I., Satır, M., Maluski, H., Siyako, M., Metzger, R., & Akyüz, S. (1996). Paleo- and Neo-Tethyan events in northwestern Turkey. In: Y. An, M. Harrison, (Eds.), *Geological and Geochronological Constraints, Tectonics of Asia*. Cambridge University Press, 420-441.
- Okay, A. I., & Satır, M. (2000). Coeval plutonism and metamorphism in a latest Oligocene metamorphic core complex in northwest Turkey. *Geological Magazine*, 137(5), 495-516. <https://doi.org/10.1017/S0016756800004532>
- Özcan, A., Göncüoğlu, M., Turan, N., Uysal, S., Şentürk, K., Işık, V. (1988). Late Paleozoic Evolution of the Kütahya-Bolkardağ Belt. *METU Journal of Pure and Applied Sciences*, 21(1-3), 211-220.
- Palmer, M. R. & Helvacı, C. (1997). The boron isotope geochemistry of the Neogene borate deposits of western Turkey. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 61, 3161-3169.
- Péloquin, A. S., Verpaest, P. & Ludden, J. N. (1996). Spherulitic rhyolites of the Archean Blake River Group, Canada: Implications for stratigraphic correlation and volcanogenic massive sulfide exploration. *Economic Geology*, 91, 343-354.
- Piboule, M., Soden, L., Amosse, J. & Briand, B. (1989). Role of diabatic undercooling in the genesis of orbicular gabbros from Corsica. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Serie II*, 309(7), 713-718.
- Pourteau, A., Oberhänsli, R., Candan, O., Barrier, E., & Vrielynck, B. (2016). Neotethyan closure history of western Anatolia: a geodynamic discussion. *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*, 105, 203-224. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1226-7>
- Prakash, H. S. M. (1996). Orbicular structures from Lingsugur Area, Raichur District, Karnataka. *Journal of Geological Society of India*, 47(5), 525-534.
- Ross, C. S. & Smith, R. L. (1961). *Ash-flow tuffs: Their origin, geological relation and identification*. USGS Prof Pap 366, 81pp (reprint in New Mex Geol Soc Spec Publ 9, 1980).
- Sandstå, N. R., Robins, B., Furnes, H. & De Wit, M. (2011). The origin of large varioles in flow-banded pillow lava from the Hoogenoeg Complex, Barberton Greenstone Belt, South Africa. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 162(2), 365-377.
- Sauer, A. (1893). Porphyry studien. *Mitt Großherz Bad Geol Landesanst*, 2, 793-836.
- Salotti, C. & Fouts, J. (1964). Orbicule formation through intrusive brecciation and compositional reorganization. *The Mountain Geologist*, 203-212.
- Sederholm, J. J. (1928). On orbicular granites. *Comm. Geol. Finlande*, 83, 1-105.
- Seghedi, I. & Helvacı, C., (2016). Early Miocene Kırka-Phrigian Caldera, western Turkey (Eskişehir province), preliminary volcanology, age and geochemistry data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 327, 503-519.
- Shrivastava, S. K., Nambiar, K. V. & Gaur, V. P. (2004). Orbicular structures in Bundelkhand Granitoid Complex near Pichhore, Shivpuri district, Madhya Pradesh *Journal of Geological Society of India*, 64, 677-684.
- Spilliaert, N., Allard, P., Métrich, N. & Sobolev, A. V. (2006). Melt inclusion record of the conditions of ascent, degassing, and extrusion of volatile-rich alkali basalt during the powerful 2002 flank eruption of Mount Etna (Italy). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B4). <https://doi.org/10.1029/2005JB003934>
- Srinivasan, K. N. & Kumar, D. R. (1995). Orbicular structures from a diorite body within the Granitoid Complex of Nellore Schist Belt. *Journal of Geological Society of India*, 45(3), 277-283.
- Şengör, A.M.C., & Yılmaz, Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75, 181-241.
- Thompson, T. B. & Giles, D. L. (1974). Orbicular rocks of the Sandia Mountains, New Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 85(6), 911-916.
- Thompson, T. B. & Giles, D. L. (1980). Igneous origin of the orbicular rocks of the Sandia Mountains, New Mexico: Discussion and reply: Discussion. *Geological Society of America Bulletin*, 91(4), 245-246.
- Vernon, R. H. (1985). Possible role of superheated magma in the formation of orbicular granitoids. *Geology*, 13, 843-845. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1985\)13<843:PROSMI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1985)13<843:PROSMI>2.0.CO;2)