



Güney Shetland Yayı (Batı Antarktika) Boyunca Çok Seviyeli Mafik Magma Yerleşimine Karşılaştırmalı Bir Örnek: Dee ve Cecilia İntrüzyonları
A Comparative Example of Multi-Level Mafic Magma Emplacement Along The South Shetland Arc (West Antarctica): The Dee and Cecilia Intrusions

Alp Ünal* 

*İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü,
34469, Sarıyer, İstanbul, Türkiye*

• Geliş/Received: 25.12.2025 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 31.03.2026 • Kabul/Accepted: 02.04.2026
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 17.04.2026 • Baskı/Printed: 30.04.2026

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: Bu çalışma, Batı Antarktika’da Antarktik Yarımada’nın kuzeyinde yer alan Güney Shetland Adaları boyunca konumlanan Dee ve Cecilia adalarında yüzeyleyen gabroik intrüzyonların yerleşim koşullarını karşılaştırmalı olarak incelemektedir. İntrüzyonların kristallenme sıcaklıkları ve yerleşim basınçları, iki-piroksen jeotermobarometresi kullanılarak hesaplanmış ve bununla beraber Fe–Ti oksit çiftlerinden oksijen fugasitesi koşulları belirlenmiştir.

Petrografik olarak Dee intrüzyonları, plajiyoklaz, klinopiroksen, ortopiroksen ve olivin ve opak minerallerden oluşan, ince taneli ve holokristalen porfirik dokular ile temsil edilmektedir. Buna karşılık Cecilia İntrüzyonu, benzer mineralojik bileşime sahip olmakla birlikte, daha iri taneli holokristalen granüler dokular sergilemektedir. Dee intrüzyonlarında plajiyoklazlar baskın olarak normal zonlanma gösterirken, Cecilia İntrüzyonu’nda plajiyoklaz kristallerinde osilasyonlu ve yer yer ters zonlanmalar ile birlikte elek dokuları ve körfez yapıları izlenmektedir. Yapılan iki-piroksen jeotermobarometre hesaplamaları, Dee intrüzyonlarının yaklaşık 1030–1090 °C kristallenme sıcaklıkları ve 2,5–3,5 kbar basınç aralığı ile üst kabuk seviyelerinde görece sığ yerleşimine işaret etmektedir. Buna karşılık Cecilia İntrüzyonu, 1000–1170 °C aralığındaki kristallenme sıcaklıkları ve 4,5–6,5 kbar basınç değerleri ile orta–alt kabuk seviyelerinde daha derin bir sokulumla karşılık gelmektedir. Fe–Ti oksit barometresi sonuçları, her iki intrüzyonun da oksitleyici redoks koşulları altında kristallendiğini; Cecilia İntrüzyonu’nun Dee’ye kıyasla daha yüksek oksijen fugasitesi değerleri sergilediğini göstermektedir.

Saha, petrografi ve mineral kimyası verileri birlikte değerlendirildiğinde, Dee ve Cecilia intrüzyonlarının Güney Shetland Yayı boyunca gelişen mafik magmatizmanın kabukta farklı seviyelere yerleşmiş olan üyelerini temsil ettikleri görülmektedir. İleride yapılacak olan yaşlandırma çalışmaları ile bu mafik intrüzyonların kabuk içerisindeki evriminin bölge tektonizması ile ilişkisinin araştırılması mümkün olabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Gabro, Güney Shetland Adaları, jeotermobarometre, mineral kimyası, petrografi.

Abstract: This study presents a comparative investigation of the emplacement conditions for gabbroic intrusions exposed on Dee and Cecilia islands, located along the South Shetland Islands to the north of the Antarctic Peninsula in Western Antarctica. Crystallization temperatures and emplacement pressures were calculated using two-pyroxene geothermobarometry, and oxygen fugacity conditions were additionally constrained based on Fe–Ti oxide pairs.

Petrographically, the Dee intrusions are characterized by fine-grained, holocrystalline porphyritic textures composed of plagioclase, clinopyroxene, orthopyroxene, olivine, and opaque minerals. The Cecilia intrusion displays

* Yazışma / Correspondence: alp.unal@itu.edu.tr

broadly similar mineral assemblage but coarser-grained holocrystalline granular textures. Plagioclase in the Dee intrusions predominantly exhibits normal zoning, whereas plagioclase crystals in the Cecilia intrusion commonly show oscillatory and locally reverse zoning, together with sieve textures and embayment structures. Two-pyroxene geothermobarometric calculations suggest that the Dee intrusions crystallized at temperatures of approximately 1,030–1,090 °C and pressures of 2.5–3.5 kbar, corresponding to relatively shallow upper-crustal emplacement. In contrast, the Cecilia intrusion yields crystallization temperatures of 1,000–1,170 °C and pressures of 4.5–6.5 kbar, consistent with deeper emplacement at mid- to lower-crustal levels. Fe–Ti oxide barometry indicates that both intrusions crystallized under oxidizing redox conditions, with the Cecilia intrusion recording systematically higher oxygen fugacity values relative to the Dee intrusions.

When field, petrographic, and mineral chemistry data are evaluated together, the Dee and Cecilia intrusions are interpreted to represent mafic magmatic bodies emplaced at different crustal levels within the South Shetland Arc magmatic system. Future geochronological studies will lead the investigation of the timing of emplacement and further assess the relationship between the crustal evolution of these mafic intrusions and the regional tectonic framework.

Keywords: *Gabbro, geothermobarometry, mineral chemistry, petrography, South Shetland Islands.*

GİRİŞ

Yakınlaşan levha sınırlarındaki magmatik etkinlikler, bölgelerin kabuksal evriminde önemli rol oynamaktadır (Ducea vd., 2015; Stern, 2015). Uzun süreli kıtasal yay gelişimi sırasında farklı aralıklarla gelişen magmatizma hem kıtasal kabuğun üst kesimlerine volkanik ürünlerin eklenmesine hem de farklı derinliklere intrüzif kayaçların yerleşimine sebebiyet vermektedir (ör. de Silva vd., 2015; Paterson ve Ducea, 2015). Bu magmatik ürünlerin kökensel ve evrimsel incelenmesinin yanı sıra yerleşim koşullarının belirlenmesi magmatizma-tektonizma ilişkisini anlamada önemli ipuçları sunmaktadır (ör. Schärer vd. 1995; Petford vd., 2000). Özellikle farklı kabuksal seviyelerde yerleşmiş intrüzif kütleler, tektonik olarak aktif bölgelerin kabuksal yapısını ve zaman içerisindeki evrimini ortaya koymada önemli göstergeler olarak değerlendirilmektedir (Annen vd., 2015; Paterson vd., 2016). Bu intrüzyonların yerleşim derinlikleri, kabuğun termal yapısı ve reolojik değişimleri hakkında doğrudan veriler sunmakta ve ilgili tektonik rejimde magmatik yerleşimin özellikle hangi kabuksal seviyelerde yoğunlaştığını ve bu baskın tektonik rejim tarafından nasıl denetlendiğini ortaya koymaktadır (Brown, 2013; Ducea vd., 2017). Dolayısıyla, intrüzif kütlelerin bileşimi ve yerleşim koşullarının birlikte değerlendirilmesi,

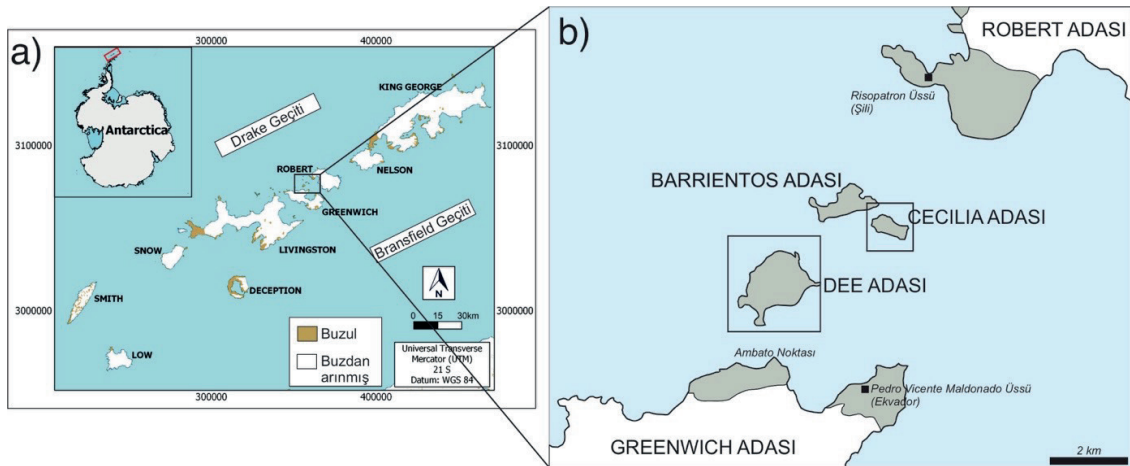
farklı tektonik süreçlerin kabuksal yapısı üzerindeki etkilerinin anlaşılmasında kritik önem taşımaktadır.

Antarktika kıtası, Batı ve Doğu Antarktika olmak üzere iki ana bölüme ayrılmakta ve bu iki bölüm Batı Antarktik Rift Sistemi tarafından birbirinden ayrılmaktadır. Doğu Antarktika, esas olarak Arkeyan–Proterozoik yaşlı metamorfik ve magmatik kayaçlardan oluşan, Prekambriyen’den beri kararlı bir kraton yapısına sahiptir (Jiang vd., 2009 ve oradaki referanslar). Buna karşın, Batı Antarktika ise tektonizma ve ilişkili magmatizma açısından daha hareketli bir geçmişe sahiptir (Jankowski ve Drewry, 1981; Dalziel ve Elliot, 1982; Smellie vd., 1984; Fitzgerald, 2002; Altunkaynak vd., 2018; 2019;2022). Bu çalışmaya konu olan Güney Shetland Adaları da Batı Antarktika’da Antarktik Yarımada’nın kuzeyinde yer alır ve yoğun gelişmiş magmatik etkinliğe ev sahipliği yapar (Şekil 1). Phoenix Levhası’nın Güney Shetland Çukuru boyunca dalması sonucunda uzun soluklu bir magmatik yay gelişmiş ve farklı aralıklarda volkanik ve intrüzif ürünler üretmiştir (ör. Smellie vd., 1984; Kamenov, 2008; Berrocoso vd., 2016; Smellie, 2020; 2021; Leat ve Riley, 2021; Altunkaynak vd., 2025). Bu magmatik ürünler çoğunlukla düşük-orta potasyumlu magmatik kayaçlardan oluşan aktif kıta kenarı tipi bir yay magmatizmasının

temsilci örneklerini oluşturmaktadır. Bölgede günümüze kadar derlenen jeokronolojik veriler, dalma-batma ile ilişkili magmatizmanın ~135 My'dan 23 My'a kadar farklı evreler halinde sürdüğünü ve magmatik etkinliğin Kretase'den sonra zirveye ulaştığını göstermektedir (Leat vd., 1995; Pankhurst ve Smellie, 1983; Riley vd., 2018; Smellie vd., 1984, 2021; Bastias vd., 2023; Altunkaynak vd., 2025; Karlı vd., 2025). Ayrıca geç Miyosen'den günümüze kadar uzanan dönemde, litosferik gerilme evresiyle ilişkili geç evre bazaltik magmaların da üretildiği öne sürülmüştür (Keller vd., 1992; Smellie vd., 2021).

Güney Shetland Adaları'nda son yıllarda tektonizma-magmatizma ilişkisini inceleyen çalışmalar artış gösterse de (ör. Haase vd., 2012; Leat ve Riley, 2021; Altunkaynak vd., 2025; Karlı vd., 2025), bölge boyunca yer alan adalarda bulunan jeokimyasal, izotopik ve jeokronolojik veri noksanlığı hala magmatik yayın evrimi üzerine farklı ve tartışmalı görüşlerin bulunmasına sebep olmaktadır. Bölgede mineral kimyası ve ilişkili magma odası süreçlerini inceleyen çalışmaların hemen hemen hiç olamaması da yine magmatik yay, bu magmatizma esnasında gelişen magma odası koşulları ve akabindeki kabuksal

evrimin anlaşılmasını güç kılmaktadır. Antarktika gibi ulaşımı zor ve saha çalışmalarının görece az yapılabildiği bölgelerden üretilen her analitik veri literatürdeki mevcut tartışmalara ışık tutmak açısından anahtar niteliğindedir. Bu eksikliğin bilincinde yapılan bu çalışmaya konu olan Dee ve Cecilia adaları da Güney Shetland Adaları boyunca yer alan iki büyük ada olan Robert ve Greenwich Adaları arasında konumlanmaktadır (Şekil 1). Literatürde Dee ve Cecilia adalarından herhangi bir jeokimya, jeokronoloji veya mineral kimyası verisi bulunmamaktadır. Yalnızca birkaç temel jeoloji çalışmalarına (Smellie vd., 1984; Dumont vd., 2006) ev sahipliği yapan Dee ve Cecilia adalarında baskın olarak intrüzif ürünler temiz mostralara sunmakta ve bunlara yer yer volkanik ve sınırlı alanlarda sedimanter kayalar eşlik etmektedir. Bu intrüzif kütleler buzdan arınmış, hemen hemen alterasyondan hiç etkilenmemiş ve farklı örneklerin derlenmesine müsaade eden bağımsız kütleler ile temsil olunmaktadır. Dolayısıyla bu kayalar üzerinde yapılacak olan petrografi ve mineral kimyası çalışmaları ve akabinde hesaplanacak olan yerleşim koşullarının belirlenmesi açısından temsilci bir bölge niteliğindedir.



Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritaları: **a)** Güney Shetland Adaları'nı gösteren harita (Petsch vd., 2022'den uyarlanmıştır); **b)** Dee ve Cecilia adalarının konumu

Figure 1. Location maps of the study area: **a)** map showing the South Shetland Islands (adapted from Petsch et al., 2022); **b)** location of Dee and Cecilia islands.

Bu çalışma ile ilk defa Dee ve Cecilia intrüzyonlarının detaylı saha, petrografik ve mineral kimyası verileri sunulmaktadır; (i) magmanın kristallenme sürecinde etkili olan sıcaklık, basınç ve oksijen fugasitesi koşullarının belirlenmesi ve (ii) bu verilerin jeolojik gözlemlerle birleştirilerek intrüzyonların yerleşim derinliklerinin belirlenmesi ve kabuk içerisinde geçirmiş oldukları evrime yaklaşımda bulunulması amaçlanmaktadır.

BÖLGESEL JEOLJİ

Güney Shetland Adaları, Antarktik Yarımadası'nın kuzeybatısında, yaklaşık 300 km boyunca NE–SW doğrultusunda uzanan ve 11 büyük adadan oluşan bir ada zinciridir. Bu takımda, Phoenix Levhası'nın Güney Shetland Çukuru boyunca Antarktika levhasının altına dalması sonucu gelişmiş yay magmatizmasının ürünüdür. Bu dalma-batma süreci Geç Jura'dan itibaren etkin olmuş ve Tersiyer boyunca volkanik ve plütonik kayaların oluşumuna yol açmıştır (ör. Smellie vd., 1984; Kamenov, 2008; Haase vd., 2012; Berrocoso vd., 2016; Smellie, 2020; 2021; Leat ve Riley, 2021; Altunkaynak vd., 2025). Güney Shetland Adaları, yaklaşık 30 km kalınlığa sahip kıtasal kabuk üzerinde konumlanmakta ve Bransfield Çukuru gibi genişlemeyle ilişkili yapılarla sınırlanan Güney Shetland mikro-levhasının bir parçasını oluşturmaktadır (Guterch vd., 1985; Keller vd., 1992). Güney Shetland Adaları, metamorfik ve sedimanter temel kayaların üzerine gelen volkanik, hipabisal ve plütonik kayalar birliklerinden meydana gelir. Bölgedeki jeolojik kayıtlar, dalma-batma süreçleriyle ilişkili yay magmatizmasının yanı sıra, sonraki dönemlerde dilim gerilemesi (slab roll-back) ve litosferik genişleme ile ilişkili tektonik olayların izlerini de yansıtmaktadır (Keller vd., 1992; Haase vd., 2012).

Güney Shetland takımadalarının hemen hemen ortasında yer alan Dee ve Cecilia adaları, büyük iki ada olan Greenwich ve Robert

adalarının arasında konumlanmaktadır. Greenwich Adası'nın kuzeyinde, 62°25'G ve 59°47'B koordinatlarında yer alan Dee adası, yaklaşık 2 km²'lik bir yüzölçümüne sahiptir. Cecilia adası ise 62°24'G ve 59°42'B koordinatlarında yer alır ve yaklaşık 1 km²'lik yüz ölçümü ile Dee adasının hemen doğusunda konumlanır. Bu iki adada da magmatik ürünler yaygın olarak yer almaktadır. Bu ürünler baskın olarak intrüzif kayalar ile temsil edilmekte ve bunlara volkanik ürünler ve yer yer sedimanter kayalar da eşlik etmektedir. Literatürde Dee ve Cecilia adaları magmatik kayalarından herhangi bir radyometrik yaş verisi bulunmamaktadır. Güneyinde yer alan Greenwich Adası'ndan da radyometrik yaş tayinleri oldukça sınırlıdır. Mevcut yaş tayinlerinin büyük bir kısmı adanın batı ve doğu uçlarında yer alan volkanik kayalardan elde edilmiştir (ör. Pankhurst ve Smellie, 1983; Machado vd., 2005). Bununla birlikte, bölgedeki intrüzif kayalara yönelik herhangi bir yaşlandırma çalışması henüz gerçekleştirilmemiştir. Bu limitli yaş verileri, K-Ar yöntemine göre Greenwich adası volkanik ürünlerinin yaşını 82-80 My olarak vermektedir (Pankhurst ve Smellie, 1983; Haase vd., 2012). Dee ve Cecilia adalarının hemen kuzeyine yer alan Robert Adası'ndan ise görece daha fazla yaş verisi bulunmaktadır. Hem volkanik ürünler hem de intrüzyonlar yaşlandırılmış olup elde edilen Ar-Ar ve K-Ar yaşları 96 ile 78 My arasında değişmektedir (Pankhurst ve Smellie, 1983; Smellie vd., 1984; Karlı vd., 2025). Bu yaşlar da Üst Kretase dönemine denk gelmektedir. Yakın tarihli bir çalışma olan Zheng vd., (2022) ise Robert Adası'nın doğusundan Erken Eosen yaşı elde etmiştir. Bu benzer Eosen yaşları, Greenwich Adası'nın güneyinde yer alan Livingston Adası'nın doğusundan da elde edilmiştir (Altunkaynak vd., 2025). Dee ve Cecilia adalarının konumuna bakıldığında, bölgesel korelasyon ile adalardaki magmatik ürünlerin Üst Kretase – Eosen aralığında gelişmiş olabileceği düşünülmektedir. Ancak net bir sonuç için güncel yöntemler ile yapılacak olan jeokronoloji çalışmaları önem teşkil etmektedir.

MATERYAL ve YÖNTEM

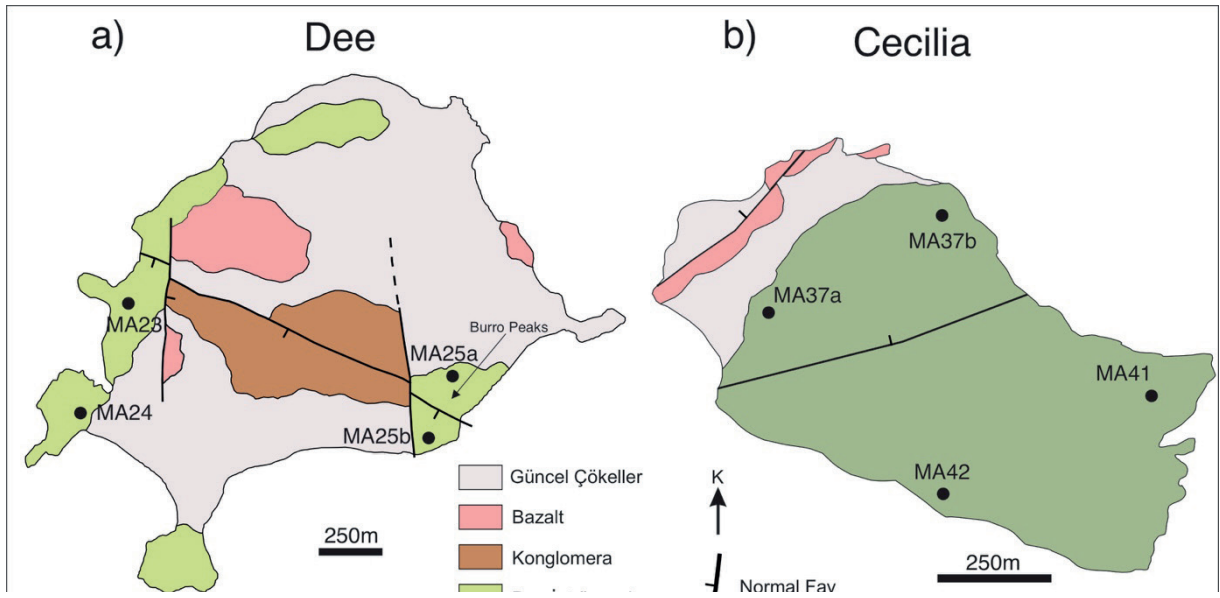
Saha çalışmaları 8. Ulusal Antarktika Bilim Seferi kapsamında Türkiye-Ekvador ikili iş birliği çerçevesinde 2024 Şubat ayında toplamda 15 günlük süre ile gerçekleştirilmiştir. Bu esnada Ekvador Pedro Vicente Maldonado Üssü'nde (Greenwich Adası) konaklanılarak çalışma alanları olan Dee ve Cecilia adalarına deniz yolu ile ulaşım sağlanmıştır. Alınan kayaç numuneleri de yazar tarafından İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'ne ulaştırılmıştır. Bu kayaçlardan alınan ince kesitler İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi İnce Kesit Hazırlama Laboratuvarı'nda hazırlanmış ve Leica ICC50 W model mikroskop kullanılarak incelenmiştir.

Mineral kimyası analizleri Ludwig-Maximilians Üniversitesi Üniversitesi Yer ve Çevre Bilimleri Bölümü'nde bulunan Cameca SX100 elektron prob mikroanalizörü (EPMA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihaz, beş adet dalga boyu ayırmalı dedektör (WDS) ile donatılmış olup, periyodik tablodaki çok sayıda elementin tahribatsız ve nicel analizine olanak sağlamaktadır. EPMA analizleri hem kütle matrisinde hem de inklüzyonlar, tane sınırları ve mikro bileşenler gibi mikro ölçekli fazlarda yüksek yanal çözünürlükte yürütülmüştür. Analiz koşulları, incelenen minerallerin özelliklerine bağlı olarak optimize edilmiştir. İnce taneli veya ışın duyarlılığı yüksek fazlarda, elektron demeti kaynaklı ısınma ve alkali element göçünü en aza indirmek amacıyla düşük ivmelendirme gerilimi ve düşük demet akımı kullanılmıştır. Özellikle alkali bakımından zengin silikat fazlarında, ölçüm sırasında element mobilitesini sınırlamak için düşük akım yoğunlukları tercih edilmiştir. Analizler, alkali kaybını en aza indirmek amacıyla 15 kV ivmelendirme voltajında, 10 µm çapında odak dışı elektron demeti ve 5 nA demet akımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon için vollastonit (Ca), periklaz (Mg), hematit (Fe), doğal ortoklaz (Al, K) ve albit (Na, Si) standartları kullanılmıştır.

BULGULAR

Saha Özellikleri

Dee Adası'nda baskın olarak intrüzif kayaçlar yüzeylemektedir (Şekil 2a). Bu kayaçlar adanın özellikle güney doğu ve batı- güney batı uçlarında yer alan bağımsız intrüzyonlar ile karakterizedir. Bu intrüzyonlar, özellikle Antarktika koşulları göz önüne alındığında görece az alterasyon gösteren ve rahat örneklemenin yapılabildiği intrüzyonlardır. Adanın güney doğu ucunda yer alan intrüzyon yaklaşık olarak 100 m yüksekliğinde iki tepe oluşturmaktadır. Görece olarak yüksek olan bu yükselti Burro Peaks Yükseltisi olarak isimlendirilmektedir (Şekil 3a) ve çıplak gözle plajiyoklaz, piroksen ve olivin minerallerinin izlenebildiği ve holokristalen dokusunun tanımlanabildiği alterasyondan arınmış gabroik bir intrüzyon ile karakterize olmaktadır (Burro Peaks İntrüzyonu, Ünal, (2025)). Bu intrüzyon, uzaktan dahi belirgin olan iyi gelişmiş çatlak sistemleri sunmaktadır (Şekil 3b). Bu çatlaklar birbirlerine dik gelişmiş üç yönlü sistematik çatlaklar ile temsil edilirler ve yalnızca bu intrüzyonda gözlemlenmektedir. Dolayısıyla intrüzyonun yerleşimi esnasında gelişmiş olmaları muhtemeldir. İntrüzyonun dokanak ilişkilerine bakıldığında, yalnızca batı sınırı boyunca sedimanter kayaçlar ile dokanak halinde olduğu saptanmıştır. Yaklaşık K-G gidişli bir normal fay ile temsil edilmekte olan bu dokanak gabroik intrüzyon ile sedimanter kayaçları ayırmaktadır. Bu sedimanter kayaçlar kötü boylanmış ve tane destekli bir dokuya sahip olup, yarı yuvarlak- yarı köşeli volkanik lav kökenli litik çakıllardan oluşan konglomera ile temsil edilmektedir (Şekil 3c). İntrüzyonların dokanaklarının çoğunlukla faylı olması nedeniyle civarında gelişmiş olan muhtemel bir kontakt metamorfizma etkisi belirlenmemiştir. Benzer olarak Dee adasının batı- güney batı ucunda da göreceli olarak daha küçük intrüzyonlar yer almaktadır. Burro Peaks Yükseltisi'nde yer alan intrüzyon ile tamamıyla benzer mineralojik ve fiziksel özellikler sunmaktadır, ancak muhtemel bir geçmiş buzul evrimi ile civar kayaçlardan ayrılmıştır. Dolayısıyla dokanak ilişkileri belirsizdir.



Şekil 2. a) Dee Adası'nın jeoloji haritası (Smellie vd., 1984'ten değiştirilmiştir; **b)** Cecilia Adası'nın jeoloji haritası.
Figure 2. a) Geological map of Dee Island (modified from Smellie et al., 1984); **b)** geological map of Cecilia Island.

Cecilia Adası'na bakıldığında adanın hemen hemen hepsinin tek bir intrüzyon ile temsil edildiği görülmektedir (Şekil 2b). Bu intrüzyon daha önce literatürde tanımlanmamış olup bu çalışmada ilk defa Cecilia İntrüzyonu olarak isimlendirilmiştir. Bu intrüzyon çıplak gözle plajiyoklaz, piroksen ve olivin minerallerinin izlenebildiği ve iri eş taneli holokristalen dokusunun tanımlanabildiği gabroik bir sokulum niteliğindedir. Dee intrüzyonlarından farklı olarak çoğunlukla tek yönlü yer yer ise iki yönlü çatlak düzlemleri sunarlar (Şekil 3d). İntrüzyonun ortasında ise intrüzyonu bir sil şeklinde kesen ince taneli bazaltik bir dayk bulunmaktadır (Şekil 3e). Cecilia İntrüzyonu Cecilia Adası'nın hemen hemen her kesimini kapsamaktadır; yalnızca güney kesimlerinde sınırlı alanda bazaltik lavlar gözlenmektedir (Şekil 3f). Ancak bu iki birim arasındaki dokanak izlenmemektedir.

Petrografi

Petrografik açıdan Dee ve Cecilia intrüzyonları benzer bileşimsel fakat farklı dokusal özellikler

sergilemektedir. İncelenen örneklerin petrografik özellikleri Çizelge 1'de verilmektedir. Dee intrüzyonları ince taneli holokristalen porfirik dokusu ile belirgindir. Ana mineraller plajiyoklaz (%45-60), ortopiroksen (%5-10), klinopiroksen (%10-15) ve olivin (%5-10) ile temsil edilmektedir (Şekil 4a). Aksesuar mineraller olarak da apatit, ilmenit ve magnetit içermektedir. Dee İntrüzyonu'na ait plajiyoklaz mineralleri öz ve yarı öz şekilli kristaller şeklinde bulunmaktadır. Plajiyoklazlar ikizlenme ve zonlanma göstermektedirler (Şekil 4b). İkizlenmeler çoğunlukla polisentetik ikizlenmeler ile temsil olunurken zonlanma baskın olarak normal zonlanma ile belirgindir (Şekil 4c; bkz. Mineral Kimyası başlığı). Plajiyoklazlar seyrek olarak elek dokusu göstermekte ve yer yer serisitleşmeler ve killeşmeler izlenmektedir. Ortopiroksenler ve klinopiroksenler öz ve yarı öz şekilli kristaller şeklinde bulunmaktadır. Olivinler ise daha seyrek olarak gözlemlenmekte ve baskın olarak antigoritleşme göstermektedir. Opak mineraller öz şekilsiz kristaller halinde yer yer intersitisyel yer yer de bireysel kristaller halinde bulunmaktadır.



Şekil 3.a) Dee adası intrüzyonu (Burro Peaks) ve konglomera biriminin uzaktan görünümü; **b)** Dee adası intrüzyonlarında gözlemlenen çatlak sistemleri; **c)** Dee Adası'nda bulunan konglomeranın yakından görünümü; **d)** Cecilia İnrüzyonu'nun mostra görünümü; **e)** Cecilia İnrüzyonu'nu kesen bazaltik dayk; **f)** Cecilia Adası batı ucunda yer alan volkanik kayaların uzaktan görünümü.

Figure 3.a) Distant view of the Dee Island intrusion (Burro Peaks) and the conglomerate unit; **b)** fracture systems observed in the Dee Island intrusions; **c)** close-up view of the conglomerate exposed on Dee Island; **d)** outcrop view of the Cecilia intrusion; **e)** basaltic dyke cutting the Cecilia intrusion; **f)** distant view of volcanic rocks exposed at the western part of Cecilia Island.

Çizelge 1. Dee ve Cecilia intrüzyonlarının petrografik özellikleri.**Table 1.** Petrographical features of the Dee and Cecilia intrusions.

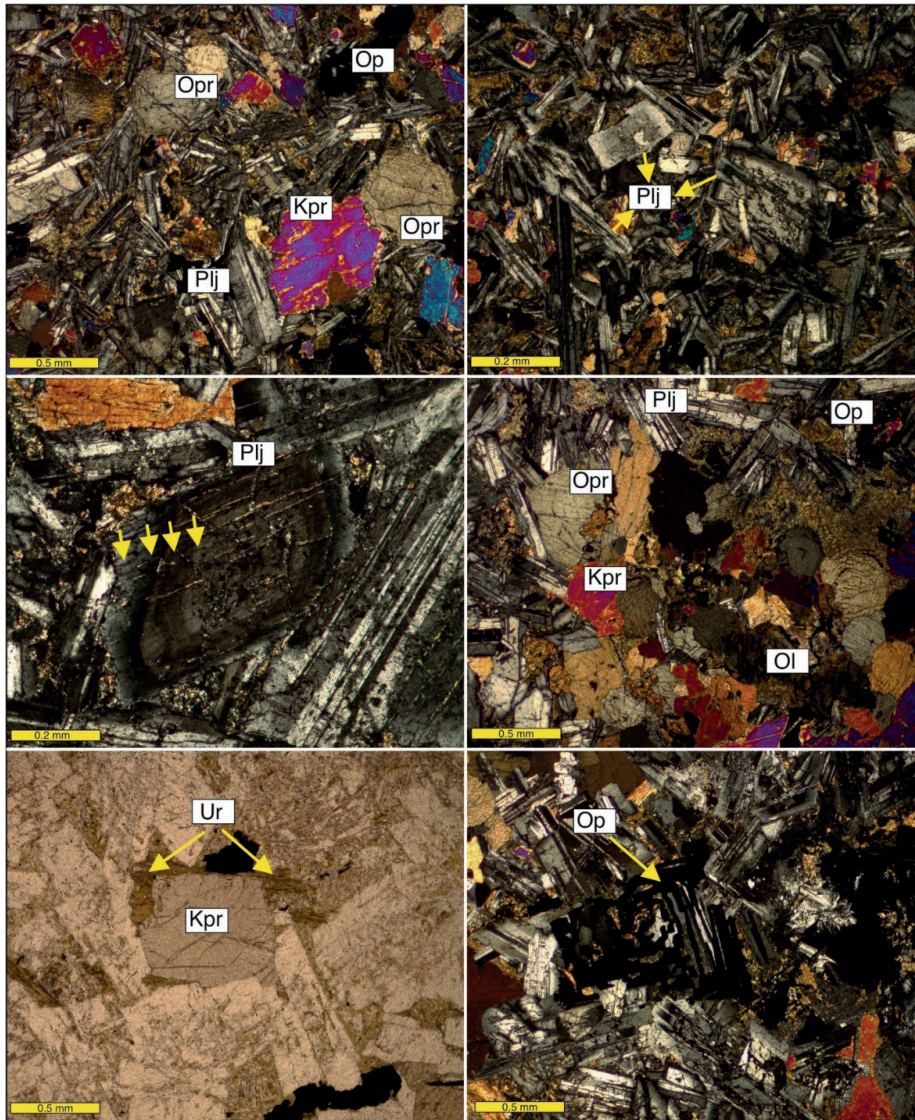
İntrüzyon Kesit No	DEE			CECILIA		
	MA 17a	MA 20	MA 25	MA 37	MA 39	MA 40
Doku	Holokristalen	İnce Taneli	Porfirik	Holokristalen	Orta Taneli	Granüler
Opak Min (%)	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5
Plajiyoklas (%)	45-50	55-60	45-50	45-50	50-55	50-55
Ortopiroksen (%)	5-10	5-10	5-10	5-10	3-8	5-10
Klinopiroksen (%)	10-15	10-15	10-15	10-15	12-18	10-15
Olivin (%)	5-10	0-5	8-10	10-15	15-20	10-15
İkincil Min (%)	-	0-5	-	-	-	0-5

Cecilia İntrüzyonu Dee intrüzyonları ile benzer mineralojik ancak farklı dokusal özellikler sunmaktadır. İntrüzyon görece daha kaba taneli holokristalen granüler doku sergilemektedir (Şekil 4d). Ana mineraller plajiyoklaz (%45-55), ortopiroksen (%3-10), klinopiroksen (%10-18) ve olivin (%10-15) ile temsil edilmektedir. Aksesuar mineraller olarak da apatit, ilmenit ve magnetit içermektedir. Cecilia İntrüzyonu'nda yer alan plajiyoklazlar öz şekilliden öz şekilsiz değişen kristallerden oluşmaktadır. Plajiyoklazlarda polisentetik ikizlenme ve zonlanmalar izlenir. Bu zonlanmalar da normal, osilasyonlu ve yer yer ters zonlanmalar ile temsil edilirler (bkz. Mineral Kimyası başlığı). Plajiyoklaz kristalleri yer yer elek dokuları ve körfez yapıları sergilemektedir. Cecilia İntrüzyonu da Dee intrüzyonları gibi öz ve yarı öz şekilli kristallerden oluşan klinopiroksen ve ortopiroksen içermektedir (Şekil 4d). Piroksenler yer yer plajiyoklazları kapanım şeklinde dilinimleri boyunca barındırır. Bazı piroksen kristalleri de çeperlerinde sınırlı ve lokal amfibol gelişimleri ile tanımlanan uralitleşme gösterir (Şekil 4e). Olivinler ise Dee intrüzyonlarına görece daha iri taneli ve öz şekilli-

yarı öz şekillidir ancak hemen hepsi benzer olarak iddingsitleşme-serpantinleşme-antigoritleşme gösterirler. Opak mineraller örneklerin hepsinde yaygın olarak bulunmaktadır. Opak mineraller, hem plajiyoklaz, piroksen ve olivinler arasında interstisyel konumda hem de ayrık, öz-yarı öz şekilli bireysel kristaller halinde bulunmaktadır (Şekil 4f). Yer yer çatlaklar arasında dolgu olarak da gözlemlenirler.

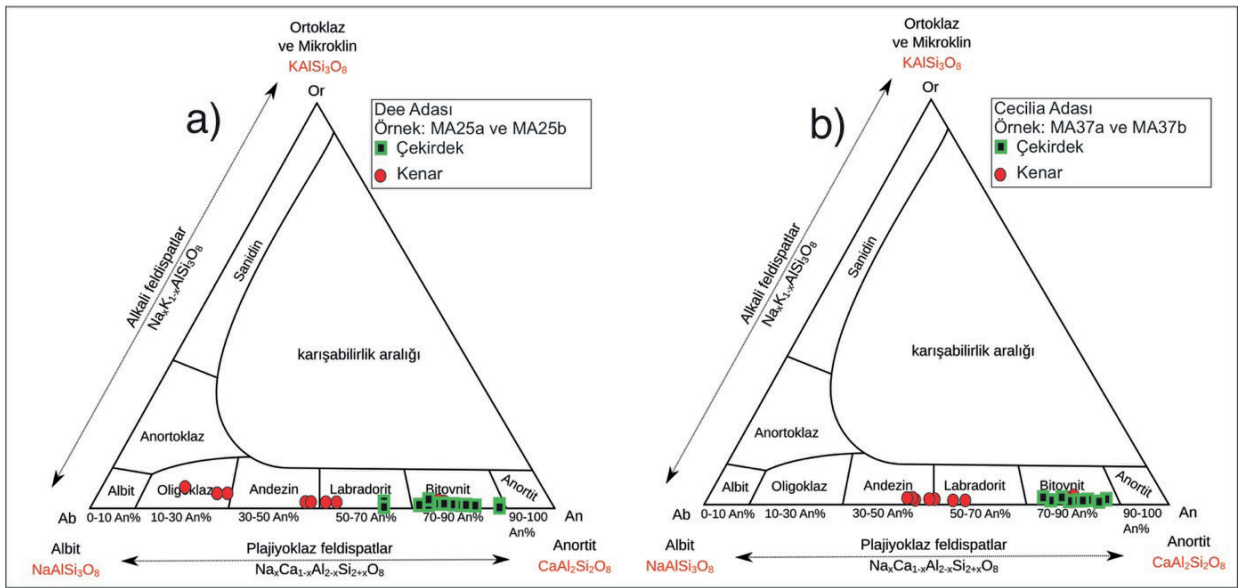
Mineral Kimyası**Plajiyoklaz**

Dee ve Cecilia intrüzyonlarında en sık rastlanan mineral plajiyoklazdır. Plajiyoklazlar 0,1 ile 1 mm'yi aşan uzunluklarda öz şekilli ve yarı öz şekilli kristaller halinde bulunmaktadır. Plajiyoklaz kristalleri hem ikizlenme hem de zonlanma gösterir. Plajiyoklazlar üzerinde yapılan mikropob ölçümleri çekirdekten merkeze doğru olacak şekilde yapılmış ve noktaların % An değerleri hesaplanmıştır (Şekil 5 ve 6). Örneklerin BSE (Back-scattered electron) görüntüleri de Şekil 6a ve b'de verilmektedir.



Şekil 4.a) Dee intrüzyonlarında gözlenen holokristalen ince taneli- porfrik doku (Plj: Plajiyoklaz; Opr: Ortopyroksen; Kpr: Klinopyroksen; Ol: Olivin, Op: Opak mineral, Çift Nikol); **b)** Dee intrüzyonlarında gözlenen zonlu ve ikizlenen plajiyoklazlar (Plj: Plajiyoklaz; Çift Nikol); **c)** Dee intrüzyonlarında gözlenen zonlu plajiyoklaz kristali (Plj: Plajiyoklaz; Çift Nikol); **d)** Cecilia İnrüzyonu'nda gözlenen holokristalen granüler doku (Plj: Plajiyoklaz; Opr: Ortopyroksen; Kpr: Klinopyroksen; Ol: Olivin, Op: Opak mineral, Çift Nikol); **e)** Cecilia İnrüzyonu'nda yer alan klinopyroksen kristalinde gözlenen uralitleşme (Kpr: Klinopyroksen, Ur: Uralitleşme; Tek Nikol); **f)** Cecilia İnrüzyonu'nda gözlenen opak mineral oluşumları (Op: Opak mineraller; Çift Nikol)

Figure 4.a) Holocrystalline fine-grained porphyritic texture observed in the Dee intrusions (Pl: Plagioclase; Opx: Orthopyroxene; Cpx: Clinopyroxene; Ol: Olivine; Op: Opaque minerals; crossed polars); **b)** zoned and twinned plagioclase crystals observed in the Dee intrusions (Pl: Plagioclase; crossed polars); **c)** zoned plagioclase crystal observed in the Dee intrusions (Pl: Plagioclase; crossed polars); **d)** holocrystalline granular texture observed in the Cecilia intrusion (Pl: Plagioclase; Opx: Orthopyroxene; Cpx: Clinopyroxene; Ol: Olivine; Op: Opaque minerals; crossed polars); **e)** uralitization observed in a clinopyroxene crystal from the Cecilia intrusion (Cpx: Clinopyroxene; Ur: Uralitization; plane-polarized light); **f)** opaque mineral assemblages observed in the Cecilia intrusion (Op: Opaque minerals; crossed polars).



Şekil 5.a) Dee ve **(b)** Cecilia intrüzyonlarına ait feldspatların Ab-An-Or üçgen diyagramındaki (Smith ve Brown, 1988) yerleri.

Figure 5. Positions of feldspars from **(a)** the Dee intrusions and **(b)** the Cecilia intrusion on the Ab–An–Or ternary diagram (after Smith and Brown, 1988).

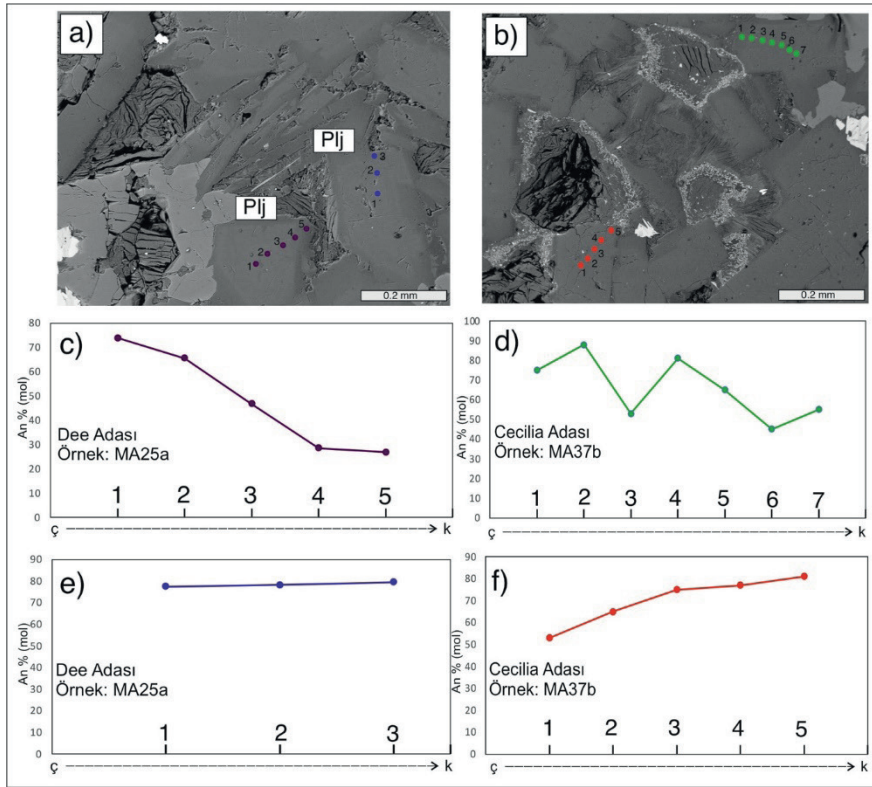
Yapılan ölçümlere göre Dee intrüzyonlarına ait zonlu plajiyoklazların çekirdek An % değerleri 88 ile 65 arasında değişirken kenar zonlarında bu değerler 55 ile 25 arasındadır (Şekil 5a). Özellikle çekirdekten merkeze yapılan çoklu nokta ölçümleri bu An değerlerinin çizgisel olarak azaldığını göstermektedir (Şekil 6c). Bir diğer deyişle merkezlerinde baskın olarak bitovnit bileşimi sergileyen plajiyoklazlar kenar zonlarında andezin- oligoklas bileşimleri gösterir (Şekil 5a). Bu da Dee intrüzyonlarına ait plajiyoklazların normal zonlanma gösterdiğine işaret etmektedir. İkizlenen kristallerde ise herhangi bir % An değişimi çekirdekten kenara saptanmamıştır (Şekil 6e).

Cecilia İntrüzyonu'nda ise plajiyoklazlar çekirdekte 86 ile 74 arasında değişen % An değerleri sunmakta ve kenar zonlarında bu değerler 58 ile 44 arasında yoğunlaşmaktadır (Şekil 5b). Çekirdekten merkeze doğru yapılan çoklu nokta ölçümlerine bakıldığında bazı plajiyoklaz

fenokristallerinin salınımlı An değerleri gösterdiği (Şekil 6d) bazı kristallerde ise bu değerlerin kenar zonlarına doğru artış sergilediği saptanmıştır (Şekil 6f). Bu da Cecilia İntrüzyonu'nun yer yer osilasyonlu ve yer yer ise ters zonlanma gösteren plajiyoklazlar içerdiğini ortaya koymaktadır.

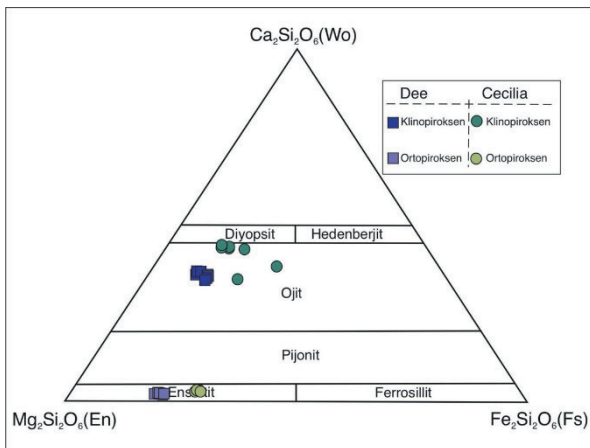
Piroksen

Dee ve Cecilia intrüzyonları mafik mineral olarak yaygın piroksen kristalleri barındırmaktadır. Bu piroksenler hem ortopiroksenler hem de klinopiroksenler ile temsil edilmektedir. Dee intrüzyonları piroksenlerine bakıldığında klinopiroksenlerin hepsinin Wo-En-Fs üçgeninde ojit alanında kümelenedikleri görülmektedir (Şekil 7). Ortopiroksenler ise enstatit alanına iz düşmektedir. Benzer olarak Cecilia İntrüzyonu'na ait ortopiroksenler de enstatit alanında kümelenmektedir. Klinopiroksenler de ojit alanına ancak diyopsit bileşimine daha yakın bölgelere iz düşmektedir.



Şekil 6.a) Dee intrüzyonlarına ait MA25a numaralı örneğin ‘BSE (Back-scattered electron)’görünümü (Plj: Plajiyoklaz; 1-5: ölçüm noktaları); **b)** Cecilia İntrüzyonu’na ait MA37b numaralı örneğin ‘BSE (Back-scattered electron)’görünümü (Plj: Plajiyoklaz; 1-7: ölçüm noktaları); **c-f)** Dee ve Cecilia intrüzyonları plajiyoklazlarının çekirdek-kenar % An değişimleri (ç: Çekirdek; k: Kenar).

Figure 6.a) Back-scattered electron (BSE) image of sample MA25a from the Dee intrusions (Pl: Plagioclase; 1–5: analytical spots); **b)** BSE image of sample MA37b from the Cecilia intrusion (Pl: Plagioclase; 1–7: analytical spots); **c–f)** core-to-rim An% variations in plagioclase crystals from the Dee and Cecilia intrusions (c: core; r: rim).

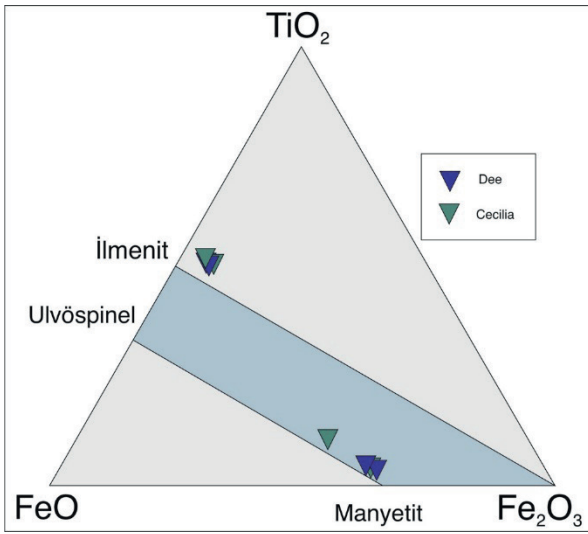


Şekil 7: Dee ve Cecilia intrüzyonları piroksenlerinin Wo-En-Fe diyagramındaki konumları.

Figure 7: Compositional positions of pyroxenes from the Dee and Cecilia intrusions on the Wo–En–Fs diagram.

Fe- Ti Oksitler

Dee ve Cecilia intrüzyonlarını oluşturan kayalarda Fe- Ti oksit mineralleri yaygın olarak yer almaktadır. Çoğunlukla ince taneli fenokristaller halinde veya diğer mineral fazlarının içerisinde öz şekilsiz kapanımlar olarak izlenmektedir. İki intrüzyona ait Fe- Ti oksitler de benzer bileşimler sergilerler ve ilmenit- manyetit çiftleri ile temsil olunurlar (Şekil 8).



Şekil 8. Dee ve Cecilia intrüzyonları Fe-Ti oksitlerin ayırtman diyagramındaki (Bacon ve Hirschmann, 1988) yerleri.

Figure 8. Discrimination diagram showing the compositions of Fe-Ti oxides from the Dee and Cecilia intrusions (after Bacon and Hirschmann, 1988).

TARTIŞMA

Jeotermobarometre ve Oksijen Fugasitesi Hesaplamaları

İki piroksen jeotermobarometresi kullanılarak (Putirka, 2008) Dee ve Cecilia intrüzyonlarının kristallenme sıcaklıkları ve yerleşim basınçları hesaplanmıştır. Hesaplamalarda Putirka (2008) tarafından önerilen Denklem 36–37 (iki-piroksen termometreleri) ile Denklem 38–39 (iki-piroksen barometreleri) birlikte kullanılmıştır. Denklem 39, deneysel kalibrasyon kapsamının genişliği ve bazik sistemlere uygulanabilirliği nedeniyle basınç hesaplamalarında ana değerlendirme aracı olarak ele alınmıştır. Denklem 39 sıcaklık verisi kullanılarak hesaplandığından sıcaklık ve basınç değerleri Denklem 36–37 ve Denklem 38 kullanılarak iteratif olarak hesaplanmıştır. Yapılan tüm hesaplamalarda Putirka (2008)'de önerilen denge koşulları dikkate alınmış; Fe–Mg

değişim katsayısı (KD) değerleri belirgin şekilde denge aralığının dışında kalan klinopiroksen–ortopiroksen çiftleri termobarometrik hesaplamalara dahil edilmemiştir ve verilen tabloda “hesaplanmayan değer (h.d.)” ibaresi ile yalnızca karşılaştırma amacıyla sunulmuştur (Çizelge 2). Bununla beraber sıcaklıkları test etmek amacıyla Brey ve Köhler (1990) termometresi de hesaplanmıştır.

Dee intrüzyonlarından iki örneğin (MA25a ve b) jeotermobarometre hesaplamaları yapılmıştır. Bu iki örnekten bir tanesi (MA25a) Burro Peaks tepesinden alınmış olup diğer örnek olan MA25b de adanın batı ucunda yer alan intrüzyondan alınmıştır. Bu iki örnek tamamen benzer saha, petrografi ve mineral kimyası özellikleri sergilemektedir (bknz. Bulgular başlığı). Bununla beraber iki örneğin aşağıda sunulmakta olan jeotermobarometre hesaplamaları da birbirlerine benzerdir. Yapılan iki-piroksen termometresi hesaplamaları sistematik olarak yüksek sıcaklıklar vermekte olup Denklem 36 ve 37'ye göre kristallenme sıcaklıkları yaklaşık 1.030–1.090 °C aralığında yoğunlaşmaktadır. Brey ve Köhler (1990) termometresi ise sıcaklıkların yaklaşık 1.140 °C'ye ulaşabileceğini göstermektedir ancak aradaki fark kabul edilebilir seviyededir. Dee intrüzyonlarından hesaplanan KD (Fe–Mg) değerlerinin çoğunlukla 0,8–1,1 aralığında toplanması, klinopiroksen–ortopiroksen çiftlerinin magmatik denge koşullarına yakın kristallenmiş olduğunu ve elde edilen sıcaklıkların güvenilirliğini desteklemektedir. Barometre hesaplamaları ise Dee intrüzyonlarının yaklaşık 2,5–3,5 kbar basınç aralığında kristallendiğini göstermekte olup, bu değerler de ortalama kabuk yoğunluğu varsayımıyla yaklaşık 8-12 km aralığına, bir diğer deyişle üst kabuk değerlerine karşılık gelen nispeten sığ bir yerleşim derinliğine işaret etmektedir.

Çizelge 2. Dee ve Cecilia intrüzyonlarına ait örneklerin jeotermobarometre hesaplamaları (h.d.: hesaplanmayan değer)

Table 2. Geothermobarometry calculations for the Dee and Cecilia intrusions (h.d.: non-calculated value)

Plüton	Örnek	Brey ve Kohler (1990)		Putirka (2008) RiMG				Yerleşim Derinliği (km)
		T (°C)	K _D (Fe-Mg)	Eqn 36	Eqn 37	Eqn 38	Eqn 39	
				T (°C)	T (°C)	P (kbar)	P (kbar)	
Cecilia	MA37a	1058,19	1,23	1037,12	1041,05	7,23	4,60	16,10
		1083,50	1,12	1088,92	1174,63	7,04	5,86	20,52
		1016,71	1,17	1001,47	977,55	5,98	5,06	17,71
		1082,02	1,11	1040,12	1067,12	7,90	5,88	20,59
		1023,81	1,96	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.
	MA37b	1057,00	1,22	1036,62	1079,60	7,01	4,23	14,80
		1087,35	1,12	1092,09	1168,27	8,59	6,65	23,27
		1015,53	1,13	1016,88	987,62	6,22	5,53	19,36
		1016,71	1,97	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.
		1023,73	1,98	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.
		1027,97	1,99	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.
Dee	MA25a	1127,17	0,85	1039,62	1078,52	8,37	3,52	12,32
		1126,46	0,87	1042,65	1079,08	8,28	3,77	12,82
		1127,90	0,80	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.
		1130,02	0,76	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.
		1126,99	0,81	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.
	MA25b	1138,93	1,05	1044,98	1079,16	8,81	2,38	8,34
		1146,74	1,07	1053,96	1082,07	9,60	2,67	9,35
		1133,13	1,02	1043,75	1077,57	8,60	2,58	9,04
		1140,78	1,05	1052,28	1080,17	9,01	2,96	10,37
		1136,58	1,03	1047,26	1080,05	8,79	2,40	8,40

Cecilia İntrüzyonu'nda ise Putirka (2008) tarafından önerilen iki-piroksen termometresinden elde edilen sıcaklık değerleri yaklaşık 1000–1170 °C aralığında yoğunlaşmaktadır. Cecilia örneklerinde KD (Fe–Mg) değerlerinin 1,1'den 1,9'a kadar daha geniş bir aralıkta dağılması, iki-piroksen arasında kimyasal dengenin her ölçüm noktası çiftinde aynı derecede korunmadığını ve kristallenme sürecinin Dee'ye kıyasla daha karmaşık olabileceğini düşündürmektedir. Bu durum, Cecilia magmasının daha dengesiz koşullarda kristallenme süreçlerine maruz kaldığı bir ortamda gelişmiş olabileceğine işaret eder. Cecilia intrüzyonu için jeobarometrik

hesaplamalar yalnızca KD (Fe–Mg) değerleri denge aralığında olan klinopiroksen–ortopiroksen çiftleri kullanılarak yapılmıştır. Putirka (2008) tarafından önerilen denge aralığı ile uyumlu olan bu ölçümlere göre hesaplanan basınç değerleri, Cecilia intrüzyonunun yaklaşık 4,5–6,5 kbar basınç aralığında kristallendiğini göstermektedir. Bu basınç değerleri yaklaşık 15–23 km derinliklere karşılık gelmekte olup orta–alt kabuk seviyelerini işaret etmektedir. Buna karşılık daha yüksek KD değerleri iki piroksen fazı arasında kimyasal dengenin bozulduğunu göstermektedir. Bu nedenle söz konusu ölçümler jeotermobarometrik hesaplamalara dahil edilmemiştir.

İki piroksen jeotermobarometresine ek olarak Dee ve Cecilia intrüzyonları üzerinde Fe–Ti oksit oksit-barometresi hesaplamaları da yapılmıştır. Sauerzapf vd. (2008) formülizasyonuna göre hesaplanan oksijen fugasitesi değerleri her iki intrüzyonun da oksitleyici redoks koşulları altında kristallendiğini göstermektedir. Dee intrüzyonunda hesaplanan ΔNNO değerleri yaklaşık +0,29 ile +1,7 arasında değişmekte olup, hafif ila orta derecede oksitleyici bir magmatik ortamı işaret etmektedir (Cao vd., 2018 ve oradaki referanslar). Cecilia intrüzyonu ise elde edilen ΔNNO değerleri yaklaşık +2,7 civarında olup, Dee'ye kıyasla daha oksitleyici koşulların hâkim olduğunu göstermektedir. Mutlak $\log f\text{O}_2$ değerleri kullanılan kalibrasyona bağlı olarak düşük (yaklaşık -14 ila -16) görünmekle birlikte, Sauerzapf vd. (2008)'de vurgulandığı üzere sıcaklığa duyarlı olduğundan karşılaştırmalı yorumlar için kullanılmamış, redoks koşullarının değerlendirilmesinde yalnızca ΔNNO değerleri esas alınmıştır.

Dengesizlik Koşulları

Plajiyoklaz mineral kimyası ve kristallerde gözlenen dokusal özellikler, Dee ve Cecilia intrüzyonları arasındaki kristallenme farklarını ortaya koyan önemli dengesizlik göstergeleri sunmaktadır. Mineral bileşimleri ve dokuların, magmanın sıcaklık, basınç ve bileşimindeki değişimlere duyarlı olduğu; soğuma, basınç değişimleri ve magma karışımı gibi süreçlerin kristallenme sırasında magmatik sistemleri dengeden uzaklaştırabildiği bilinmektedir (ör. Nixon, 1988; La Spina vd., 2016). Bu tür dengesizlikler özellikle plajiyoklaz kristallerinde normal, osilasyonlu ve ters zonlanma ile birlikte elek ve körfez dokuları şeklinde ortaya çıkmaktadır (Dungan ve Rhodes, 1978; Stimac ve Pearce, 1992).

Dee intrüzyonlarında plajiyoklazlar genel olarak normal zonlanma göstermekte olup,

anortit (An) bileşimleri çekirdekten kenara doğru sistematik olarak azalmaktadır. Bazı plajiyoklaz kristallerinin ise belirgin bir zonlanma göstermemesi, kristallerin görece kararlı bir eriyik bileşimi altında büyüdüğünü göstermektedir. Ayrıca belirgin dengesizlik dokularının gözlenmemesi, kristallenme sırasında eriyik bileşiminin önemli ölçüde bozulmadığına işaret etmektedir (Streck, 2008). İki-piroksen çiftlerinde hesaplanan $\text{KD}(\text{Fe-Mg})$ değerlerinin büyük ölçüde Putirka (2008) tarafından önerilen denge aralığında bulunması da kristallenmenin kimyasal dengeye yakın koşullar altında gerçekleştiğini desteklemektedir. Bu dokusal ve kimyasal göstergeler, iki-piroksen jeotermobarometrisinden elde edilen yüksek kristallenme sıcaklıkları ve görece sığ yerleşim basınçları ile birlikte değerlendirildiğinde, Dee magmasının kabuk içinde kimyasal olarak daha kararlı bir ortamda kristallenmiş olabileceğini düşündürmektedir. Bu tür koşullar, magmanın kabuk içinde uzun süre karmaşık yeniden dengeleme süreçleri geçirmeden kristallenmesiyle, yani görece kısa magma bekleme (kristallenme) süreleriyle ilişkili magmatik sistemlerin özellikleriyle tutarlıdır (ör. Hawkesworth vd., 2000; Moreno-Alfonso vd., 2026).

Cecilia intrüzyonunda ise plajiyoklazlar osilasyonlu ve yer yer ters zonlanma ile birlikte elek ve körfez dokuları sergilemektedir. Mineral kimyasından elde edilen An değerlerinin kristal içlerinde ve kenarlarında geniş aralıklarda dalgalanması, eriyik bileşiminin kristallenme sırasında önemli ölçüde değiştiğine işaret etmektedir. Aynı kayaç içerisinde hem normal hem de ters zonlu plajiyoklazların birlikte bulunması, dengesiz kristallenmenin güçlü bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Bu dokusal ve bileşimsel özellikler, magma karışımı, daha sıcak magmanın magma odasına yeniden girişi veya derin seviyelerde uzun süreli kristallenme sırasında gelişen kısmi yeniden denge süreçleri ile açıklanabilir. Ancak elbette bu dengesizlik

koşullarından hangisinin baskın olduğunu belirlemek için detaylı jeokimyasal ve izotopik veriler ile petrolojik değerlendirme gerekmektedir.

Cecilia İntrüzyonu'ndaki plajiyoklaz dengesizlikleri, iki-piroksen jeotermobarometrisinden elde edilen daha yüksek yerleşim basınçları ve KD (Fe–Mg) değerlerindeki geniş saçılım ile tutarlı bir tablo sunmaktadır. Dolayısıyla burada tanımlanan denge–dengesizlik farklarının doğrudan yerleşim derinliğinin bir sonucu olarak değil, magmatik sistemlerin kabuk içinde maruz kaldığı termal ve bileşimsel dinamiklerin bir yansıması olarak değerlendirilmesi daha uygundur. Ancak bu çalışma çerçevesinde elde edilen veriler, Cecilia İntrüzyonu'nu oluşturan magmanın daha derin kabuksal seviyelerde daha uzun süre hapsedildiğini ve bu süre zarfında daha dinamik, çok evreli bir magma odası ortamında evrildiğini düşündürmektedir. Buna karşılık Dee intrüzyonlarının, daha sığ yerleşim, daha dar aralıkta gelişen KD değerleri, Δ NNO değer aralığı ve görece daha dengeli dokusal özellikleri birlikte değerlendirildiğinde, daha tek evreli ve dengeye yakın bir kristallenme sürecini temsil etmektedir. Bütün bu veriler, Dee ve Cecilia intrüzyonlarının aynı bölgesel magmatik sistem içerisinde farklı kabuksal seviyelerde ve farklı denge–dengesizlik koşulları altında gelişmiş olduğunu ortaya koymaktadır.

Bölgesel Çıkarımlar

Dee ve Cecilia intrüzyonlarının yerleşim derinlikleri, Güney Shetland Adaları boyunca tanımlanan uzun süreli ve çok evreli magmatik evrimçerçevesinde değerlendirilmelidir. Bölgedeki magmatizma, Phoenix Levhası'nın Mezozoyik'ten itibaren etkin olan dalma-batma rejimiyle ilişkili olarak gelişmiş, Kretase boyunca belirgin bir magmatik aktivite göstermiş ve daha sonraki dönemlerde farklı evrelerle yeniden canlanmıştır (ör. Smellie vd., 1984; Kamenov, 2008; Berrococo

vd., 2016; Smellie, 2020; 2021; Leat ve Riley, 2021; Altunkaynak vd., 2025). Bu bağlamda, Dee ve Cecilia intrüzyonlarının konumsal olarak Robert Adası'na yakınlığı, özellikle adanın batı ve orta kesimlerinde literatürde rapor edilen Kretase yaşlı intrüzif ve volkanik kayaçlarla (Coopermine Formasyonu; Pankhurst ve Smellie, 1983) zamansal bir ilişki olasılığını akla getirmektedir. Ancak Güney Shetland yayı boyunca magmatik yaşların yalnızca adalar arasında değil, aynı ada içerisinde dahi belirgin şekilde değişkenlik göstermesi, bu tür bir korelasyonu temkinli ele almayı gerektirir. Nitekim Greenwich Adası'nın hemen güneyinde yer alan Livingston Adası'nda Kretase'den Paleojen'e uzanan geniş bir yaş aralığı tanımlanmış olup (Altunkaynak vd., 2025 ve oradaki referanslar), Robert Adası'nın batı ve doğu kesimlerinin farklı magmatik evrelere ev sahipliği yaptığına işaret eden veriler mevcuttur (Smellie vd., 1984; Pankhurst ve Smellie, 1983; Zheng vd., 2022; Karlı vd., 2025). Dolayısıyla Dee ve Cecilia intrüzyonları için sadece bölgesel bir korelasyon ile net bir yaş aralığı vermek mümkün olmamaktadır.

Bu zamansal belirsizlik çerçevesinde Dee ve Cecilia için iki temel senaryo öne çıkmaktadır. Eğer iki intrüzyon da Kretase yaşlı ya da birbirine yakın zamanlarda yerleşmiş ise, gözlenen farklı yerleşim derinlikleri aynı yay sistemi içerisindeki çok seviyeli bir magmatik yerleşimi yansıtıyor olabilir. Ancak bu durumda, Dee ve Cecilia intrüzyonları arasında hesaplanan yaklaşık 10–15 km'lik yerleşim derinliği farkının, günümüzde her iki intrüzyonun da birbirine yakın konumlarda ve benzer topoğrafik seviyelerde yüzeylenmesiyle birlikte değerlendirilmesi gerekir. Böyle bir durumda Cecilia İntrüzyonu'nun Dee İntrüzyonu'na göre daha fazla yükselmiş ve aşınmış olması beklenir. Bu denli büyük ölçekte bir düşey fark ise büyük ölçekli bir faylanma ile ilişkili blok hareketi ile açıklanması mümkündür. Ancak, iki ada arasındaki alanın deniz altında kalması nedeniyle bu tür bir yapısal ilişkinin arazide

doğrudan izlenmesi mümkün olmamaktadır. Bölgedeki jeoloji haritalarında (Şekil 2) düşey bileşenli bazı faylar tanımlanmış olmakla birlikte, bunların büyük ölçüde görece genç yapılar olarak yorumlanması, intrüzyonların yerleşimi sırasında aktif olup olmadıklarının belirsiz kalmasına neden olmaktadır. Bir diğer olası senaryo ise intrüzyonların farklı yaşlara sahip olmasıdır. Bu durumda yerleşim derinliklerindeki fark, Güney Shetland yayı boyunca zaman içinde değişen kabuksal termal yapı, yükselim ve aşınma evreleri ile ilişkili olarak değerlendirilebilir. Dolayısıyla bu senaryo için Dee ve Cecilia magmatizması aynı sistemin farklı seviyelerinden ziyade, bölgesel magmatizmanın farklı evrelerini temsil eden iki ayrı intrüzyon olarak yorumlanabilir. Bu durumda Dee ve Cecilia intrüzyonlarının kabuk içerisine farklı dönemlerde yerleşmiş ve yükselme–aşınma süreçlerini birbirlerinden bağımsız olarak geçirmiş olmaları mümkündür.

Her iki senaryoda da Dee ve Cecilia intrüzyonları, Güney Shetland magmatik yayının evriminde kabuk içi magmatik depolanmanın ve yükselimin tekdüze olmadığını, aksine düşey yönde de farklı seviyelerde organize olabildiğini göstermektedir. Farklı yerleşim derinlikleri, yay magmatizmasının yalnızca magma üretimiyle değil, magmanın kabuk içerisindeki taşınımı, geçici depolanması ve evrimiyle de şekillendiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, Güney Shetland yayı boyunca tanımlanan uzun süreli ve çok evreli magmatik etkinliğin, kabuk içinde zamanla değişen bir magmatik yerleşim geçirdiğini ve aynı yay sistemi içerisinde farklı derinliklerde kristallenmiş intrüzyonların birlikte bulunmasının yay evriminin doğal bir sonucu olduğunu düşündürmektedir. Bu çıkarımların farklı sıcaklıkları temsil eden termokronolojik veriler yardımıyla kontrolü sağlandığında, hem Cecilia ve Dee intrüzyonlarının farklı yerleşim koşullarının hem de bölgedeki dalma-batma ilişkili magmatizmanın zamansal sürekliliği ve kabuksal depolanma düzeylerinin evrimi hakkında

daha ayrıntılı çıkarımlar yapılmasına olanak sağlayacaktır.

SONUÇLAR

Saha gözlemleri, Dee Adası'nda baskın olarak gabroik intrüzyonların yüzelediğini bu kayalara yer yer sedimenter ve volkanik kayaçların eşlik ettiğini göstermektedir. Dee intrüzyonlarında, birbirine yaklaşık dik konumlanan ve üç yönlü olarak gelişmiş sistematik çatlaklar yaygın olarak izlenmektedir. Cecilia Adası'nda ise adanın büyük bölümünü kapsayan tek bir gabroik intrüzyon yüzelemekte olup, bu birime sınırlı alanlarda volkanik kayaçlar eşlik etmektedir. Cecilia İntrüzyonu'nda çatlaklar çoğunlukla tek yönlü, yer yer ise iki yönlü çatlak düzlemleri ile temsil edilmektedir.

Petrografi ve mineral kimyası verileri, Dee intrüzyonlarının plajiyoklaz (%45–60), ortopiroksen (%5–10), klinopiroksen (%10–15) ve olivin (%5–10) içeren ince taneli, holokristalen dokular sergilediğini göstermektedir. Dee intrüzyonlarına ait zonlu plajiyoklazlar çekirdeklerde yüksek anortit bileşimi (An_{88-65}), kenar zonlarda ise daha düşük An değerleri (An_{55-25}) ile belirgin normal zonlanma göstermektedir. Bu intrüzyonlarda klinopiroksenler ağırlıklı olarak ojit, ortopiroksenler ise enstatit bileşimleri ile temsil edilmektedir.

Cecilia İntrüzyonu, plajiyoklaz (%45–55), ortopiroksen (%3–10), klinopiroksen (%10–18) ve olivin (%10–15) içeren daha kaba taneli holokristalen dokular ile temsil edilmektedir. Bu intrüzyona ait plajiyoklazlar çekirdekte An_{86-74} , kenar zonlarda ise An_{58-44} aralığında bileşimler sunmakta; kristaller içerisinde osilasyonlu ve yer yer ters zonlanmalar kaydedilmektedir. Klinopiroksenler ojit–diyopsit alanına yakın, ortopiroksenler ise enstatit alanında yer almaktadır.

İki piroksen jeotermobarometresi hesaplamaları, Dee intrüzyonlarının yaklaşık

1.030–1.090 °C kristallenme sıcaklıkları ve yaklaşık 2,5–3,5 kbar basınç aralığında; Cecilia İntrüzyonu'nun ise 1.000–1.170 °C kristallenme sıcaklıkları ve yaklaşık 4,5–6,5 kbar basınç değerleri ile temsil edildiğini göstermektedir.

Fe–Ti oksit mineral kimyası sonuçları, Dee intrüzyonlarında hesaplanan oksijen fugasitesi değerlerinin $\Delta\text{NNO} \approx +0,3$ ile $+1,7$ aralığında değiştiğini; Cecilia İntrüzyonu'nda ise ΔNNO değerlerinin yaklaşık $+2,7$ civarında yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Her iki intrüzyon da manyetit–ilmenit çiftleri ile temsil edilmekte olup, oksijen fugasitesi hesaplamaları oksitleyici redoks koşullarına işaret etmektedir.

Genel olarak, saha, petrografik, mineral kimyası verileri ve jeotermobarometre hesaplamaları birlikte değerlendirildiğinde, Dee ve Cecilia intrüzyonlarının Güney Shetland Yayı boyunca gelişen mafik magmatizmanın kabuk içerisinde farklı seviyelerde yerleşmiş temsilcileri olduğunu göstermektedir. Bu intrüzyonların zamansal ilişkilerinin ortaya konulması ile Güney Shetland Yayı boyunca gelişen kabuk evrimine yaklaşımda bulunmak mümkün olabilecektir.

EXTENDED SUMMARY

This study presents a comparative investigation of the emplacement conditions of gabbroic intrusions exposed on Dee and Cecilia islands, located in the northern part of the Antarctic Peninsula within the South Shetland Islands, West Antarctica. The South Shetland arc represents the products of long-lived arc magmatism related to the subduction of the Phoenix Plate beneath the Antarctic Plate, with magmatic activity persisting through multiple stages from the Late Jurassic to the Paleogene (Smellie et al., 1984; Leat et al., 1995; Smellie vd, 2021). However, mineral chemistry–based thermobarometric constraints remain limited for many islands along the arc (Haase et al., 2012; Altunkaynak et al., 2025). Dee and Cecilia islands are among the areas where such data are particularly scarce. In this

study, detailed field observations, petrographic characteristics, and mineral chemistry data from mafic intrusions exposed on these two islands are presented for the first time, and these data are used to evaluate crystallization temperatures, emplacement pressures, and oxygen fugacity conditions.

Dee and Cecilia islands are located in the central part of the South Shetland archipelago, between Robert and Greenwich islands (Smellie et al., 1984; Dumont et al., 2006). Magmatic rocks dominate both islands and are mainly represented by intrusive lithologies. On Dee Island, several compositionally gabbroic intrusions crop out as independent bodies, whereas Cecilia Island is characterized by a single gabbroic intrusion covering a large portion of the island. The intrusions on Dee Island are characterized by well-developed, approximately orthogonal, three-directional fracture systems, particularly around Burro Peaks High. These fractures are interpreted as brittle deformation features that may have developed during early emplacement and/or cooling of the intrusions. In contrast, fractures within the Cecilia intrusion are predominantly single-directional, locally forming two-directional planar systems. On both islands, intrusive contacts are only locally preserved, and evidence for contact metamorphism is limited.

Petrographic analyses indicate that, although the Dee and Cecilia intrusions share similar mineralogical compositions, they display pronounced textural differences. The Dee intrusions are characterized by fine-grained, holocrystalline porphyritic textures and consist mainly of plagioclase, clinopyroxene, orthopyroxene, and olivine. The Cecilia intrusion, on the other hand, exhibits coarser-grained, holocrystalline granular textures and differs from the Dee intrusions in terms of grain size and textural relationships, despite its broadly similar mineralogy. Accessory mineral phases in both intrusions include apatite, ilmenite, and magnetite.

Plagioclase mineral chemistry provides important insights into the crystallization conditions of the intrusions. Plagioclase crystals in the Dee intrusions predominantly exhibit normal zoning, with a systematic decrease in anorthite (An) content from core to rim. These features are consistent with crystallization under relatively stable magmatic conditions (Dungan and Rhodes, 1978; Stimac and Pearce, 1992). In contrast, plagioclase crystals in the Cecilia intrusion display oscillatory and locally reverse zoning, together with sieve textures and embayed crystal margins. This compositional and textural variability suggests significant fluctuations in melt composition and physical conditions during crystallization (Nixon, 1988; La Spina et al., 2016).

Pyroxene mineral chemistry data indicate that both clinopyroxene and orthopyroxene are widespread in the intrusions. Clinopyroxenes from the Dee intrusions plot mainly in the augite field of the Wo–En–Fs diagram, while orthopyroxenes cluster within the enstatite field. Orthopyroxenes from the Cecilia intrusion show similar enstatitic compositions, whereas clinopyroxenes tend to plot closer to diopsidic composition within the augite field. These compositional characteristics indicate crystallization from mafic magmas in both intrusions.

Two-pyroxene thermobarometric calculations reveal that the Dee and Cecilia intrusions crystallized at different crustal levels. Estimated crystallization temperatures for the Dee intrusions range between approximately 1,030 and 1,090 °C, with corresponding emplacement pressures of 2.5–3.5 kbar, indicating emplacement at relatively shallow upper-crustal levels. In contrast, the Cecilia intrusion records crystallization temperatures of approximately 1000–1170 °C and emplacement pressures of 4.5–6.5 kbar, suggesting deeper emplacement within the middle to lower crust (Putirka, 2008; Brey and Köhler, 1990).

Fe–Ti oxide mineral chemistry and oxybarometric calculations indicate that both intrusions crystallized under oxidizing redox conditions. Calculated oxygen fugacity values for the Dee intrusions range between $\Delta\text{NNO} \approx +0.3$ and $+1.7$, whereas values for the Cecilia intrusion cluster around $\Delta\text{NNO} \approx +2.7$. These results suggest that the Cecilia intrusion crystallized under relatively more oxidizing conditions compared to the Dee intrusions (Sauerzapf et al., 2008; Cao et al., 2018).

The collective evaluation of plagioclase zoning characteristics, pyroxene equilibrium relationships, and thermobarometric results indicate that the Dee and Cecilia intrusions crystallized under contrasting equilibrium and disequilibrium conditions. The narrow range of KD (Fe–Mg) values and the dominance of normal zoning in the Dee intrusions indicate a relatively equilibrated, single-stage crystallization history. In contrast, the wide dispersion of KD values in the Cecilia intrusion, together with oscillatory and reverse zoning, points to a more dynamic and multi-stage magmatic evolution. These disequilibrium features may be related to processes such as magma mixing, replenishment by hotter magma and/or prolonged magma storage at deeper crustal levels (Annen et al., 2015; Paterson et al., 2016).

There is no data in the literature about the absolute ages of the Dee and Cecilia intrusions; however, available regional geochronological data suggest that they most likely formed during the Late Cretaceous to Eocene interval (Pankhurst and Smellie, 1983; Smellie et al., 1984; Zheng et al., 2022; Altunkaynak et al., 2025). The significant variability of magmatic ages both between different islands and within individual islands along the South Shetland arc necessitates caution in making direct correlations. The intrusions may represent either different crustal-level intrusions of the same magmatic system or two distinct intrusive events related to separate stages of arc magmatism.

In conclusion, the integration of field observations, petrographic analyses, mineral chemistry data, and geothermobarometric calculations demonstrate that the Dee and Cecilia intrusions represent mafic magmatic bodies emplaced at different crustal levels along the South Shetland arc. These results indicate that crustal magma storage and emplacement within the arc were vertically heterogeneous rather than uniform, and they may contribute to a more comprehensive understanding of the magmatic evolution of the South Shetland arc system with further studies in the future.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma T.C. Cumhurbaşkanlığı himayelerinde, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı uhdesinde, TÜBİTAK MAM KARE'nin koordinasyonunda TAE VIII. bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada elde edilen veriler yazarın yürütücülüğünü yaptığı 125Y065 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında üretilmiştir. Mineral kimyası çalışmalarındaki destekleri sebebiyle sayın İbrahim Uysal ve Dirk Mueller'e teşekkürlerini sunmaktayım. Özellikle örnek hazırlama esnasındaki yardımları için Gökçenur Bayram ve Nisa Nur Sevinç'e de destekleri için teşekkür ederim. Bununla beraber, bu çalışma sırasında faydalı bilimsel fikir alışverişi ve tüm desteği nedeniyle sayın Şafak Altunkaynak'a minnetlerimi sunarım. Son olarak üç anonim hakeme ve sayın editör Erdiñ Yiğitbaş'a makaleye olan katkıları nedeniyle teşekkürlerimi iletirim.

ORCID

Alp Ünal  <https://orcid.org/0000-0002-5078-9244>

KAYNAKÇA / REFERENCES

Altunkaynak, Ş., Aldanmaz, E., Güraslan, I. N., Çalışkanoglu, A. Z., Ünal, A. & Nývlt, D. (2018).

Lithostratigraphy and petrology of Lachman Crags and Cape Lachman lava-fed deltas, Ulu Peninsula, James Ross Island, north-eastern Antarctic Peninsula: Preliminary results. *Czech Polar Reports*, 8(1).
<https://doi.org/10.5817/CPR2018-1-5>

Altunkaynak, Ş., Ünal, A., Howarth, G. H., Aldanmaz, E. & Nývlt, D. (2019). The origin of low-Ca olivine from ultramafic xenoliths and host basaltic lavas in a back-arc setting, James Ross Island, Antarctic Peninsula. *Lithos*, 342-343, 276-287.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.039>

Altunkaynak, Ş., Aldanmaz, E. & Nývlt, D. (2022). Effects of mantle hybridization by interaction with slab derived melts in the genesis of alkaline lavas across the back-arc region of South Shetland subduction system. *Journal of Petrology*, 63(11), Article egac111.
<https://doi.org/10.1093/petrology/egac111>

Altunkaynak, Ş., Aldanmaz, E., Velez, S., Forster, M. & Yang, J. H. (2025). Early Cretaceous to Eocene magmatic evolution of Livingston Island, South Shetland Archipelago: Geochronological and isotope geochemical constraints from intrusive suites. *Lithos*, 492-493, Article 107877.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107877>

Annen, C., Blundy, J. D., Leuthold, J. & Sparks, R. S. J. (2015). Construction and evolution of igneous bodies: Towards an integrated perspective of crustal magmatism. *Lithos*, 230, 206–221.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.05.008>

Bacon, C. R. & Hirschmann, M. M. (1988). Mg/Mn partitioning as a test for equilibrium between coexisting Fe–Ti oxides. *American Mineralogist*, 73(1–2), 57–61.

Bastías, J., Chew, D., Villanueva, C., Riley, T., Manfroi, J., Trevisan, C. ... & Jaña, R. (2023). The South Shetland Islands, Antarctica: Lithostratigraphy and geological map. *Frontiers in Earth Science*, 10, Article 1002760.
<https://doi.org/10.3389/feart.2022.1002760>

Berrocso, M., Fernández-Ros, A., Prates, G., García, A. & Kraus, S. (2016). Geodetic implications on block formation and geodynamic domains in the South Shetland Islands, Antarctic Peninsula. *Tectonophysics*, 666, 211–219.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.10.023>

- Brey, G. P. & Köhler, T. (1990). Geothermobarometry in four-phase Lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology*, *31*(6), 1353–1378.
<https://doi.org/10.1093/petrology/31.6.1353>
- Brown, M. (2013). Granite: From genesis to emplacement. *Geological Society of America Bulletin*, *125*(7–8), 1079–1113.
<https://doi.org/10.1130/B30877.1>
- Cao, M., Hollings, P., Cooke, D. R., Evans, N. J., McInnes, B. I., Qin, K. & Baker, M. (2018). Physicochemical processes in the magma chamber under the Black Mountain porphyry Cu–Au deposit, Philippines: Insights from mineral chemistry and implications for mineralization. *Economic Geology*, *113*(1), 63–82.
<https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4544>
- Dalziel, I. W. D. & Elliot, D. H. (1982). West Antarctica: Problem child of Gondwanaland. *Tectonics*, *1*(1), 3–19. <https://doi.org/10.1029/TC001i001p00003>
- de Silva, S. L., Riggs, N. R. & Barth, A. P. (2015). Quickening the pulse: Fractal tempos in continental arc magmatism. *Elements*, *11*(2), 113–118.
<https://doi.org/10.2113/gselements.11.2.113>
- Ducea, M. N., Paterson, S. R. & DeCelles, P. G. (2015). High-volume magmatic events in subduction systems. *Elements*, *11*(2), 99–104.
<https://doi.org/10.2113/gselements.11.2.99>
- Ducea, M. N., Bergantz, G. W., Crowley, J. L. & Otamendi, J. (2017). Ultrafast magmatic buildup and diversification to produce continental crust during subduction. *Geology*, *45*(3), 235–238.
<https://doi.org/10.1130/G38726.1>
- Dumont, J. F., Santana, E., Hervé, F. & Zapata, C. (2006). Regional structures and geodynamic evolution of North Greenwich (Fort Williams Point) and Dee Islands, South Shetland Islands. In Fütterer, D.K., Damaske, D., Kleinschmidt, G., Miller, H. & Tessensohn, F. (Eds.), *Antarctica, Contributions to Global Earth Sciences* (pp.: 255–260). Springer, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/3-540-32934-X_31
- Dungan, M. A. & Rhodes, J. M. (1978). Residual glasses and melt inclusions in basalts from DSDP Legs 45 and 46: evidence for magma mixing. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *67*(4), 417–431. <https://doi.org/10.1007/BF00383301>
- Fitzgerald, P. G. (2002). Tectonics and landscape evolution of the Antarctic plate since the breakup of Gondwana, with an emphasis on the West Antarctic Rift System and the Transantarctic Mountains. In J. A. Gamble, D. N. B. Skinner & S. Henry (Eds.), *Antarctica at the Close of a Millennium, Royal Society of New Zealand Bulletin*, *35*, 453–469.
- Guterch, A., Grad, M., Janik, T., Perčuć, E. & Pajchel, J. (1985). Seismic studies of the crustal structure in West Antarctica 1979–1980—preliminary results. *Tectonophysics*, *114*(1–4), 411–429.
[https://doi.org/10.1016/0040-1951\(85\)90024-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(85)90024-1)
- Haase, K. M., Beier, C., Fretzdorff, S., Smellie, J. L. & Garbe-Schönberg, D. (2012). Magmatic evolution of the South Shetland Islands, Antarctica, and implications for continental crust formation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *163*(6), 1103–1119.
<https://doi.org/10.1007/s00410-012-0719-7>
- Hawkesworth, C. J., Blake, S., Evans, P., Hughes, R., Macdonald, R., Thomas, L. E., Turner, S.P. & Zellmer, G. (2000). Time scales of crystal fractionation in magma chambers-integrating physical, isotopic and geochemical perspectives. *Journal of Petrology*, *41*(7), 991–1006.
<https://doi.org/10.1093/petrology/41.7.991>
- Jankowski, E. J. & Drewry, D. J. (1981). The structure of West Antarctica from geophysical studies. *Nature*, *291*, 17–21. <https://doi.org/10.1038/291017a0>
- Jiang, W. P., E, D. C., Zhan, B. W. & Liu, Y. W. (2009). New model of Antarctic plate motion and its analysis. *Chinese Journal of Geophysics*, *52*(1), 23–32. <https://doi.org/10.1002/cjg2.1323>
- Kamenov, B. K. (2008). Multiepisodic dyke systems in Hurd Peninsula, Livingston Island, South Shetland Islands Volcanic Arc (Antarctica): Petrological and geochemical implications for their magma evolution. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology*, *46*, 103–142.
- Karlı, O., Moghadam, H. S., Kandemir, R., Aydın, F., Santos, J. F. & Demir, Y. (2025). Cretaceous arc magmatism in the Antarctic subduction system: Insights from major and trace element geochemistry and Sr–Nd–Hf–Pb isotopes. *Lithos*, *516–517*, Article 108277.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2025.108277>

- Keller, R. A., Fisk, M. R., White, W. M. & Birkenmajer, K. (1992). Isotopic and trace element constraints on mixing and melting models of marginal basin volcanism, Bransfield Strait, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, 111(2–4), 287–303. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(92\)90185-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(92)90185-X)
- La Spina, G., Burton, M., de' Michieli Vitturi, M. & Arzilli, F. (2016). Role of syn-eruptive plagioclase disequilibrium crystallization in basaltic magma ascent dynamics. *Nature Communications*, 7, Article 13402. <https://doi.org/10.1038/ncomms13402>
- Leat, P. T. & Riley, T. R. (2021). Antarctic Peninsula and South Shetland Islands: Volcanology. *Geological Society, London, Memoirs*, 55(1), 185–212. <https://doi.org/10.1144/M55-2018-52>
- Leat, P. T., Scarrow, J. H. & Millar, I. L. (1995). On the Antarctic Peninsula batholith. *Geological Magazine*, 132(4), 399–412. <https://doi.org/10.1017/S0016756800021464>
- Machado, A., Lima, E. F., Chemale Jr., F., Morata, D., Oteiza, O., Almeida, D. P. M. & Urrutia, J. L. (2005). Geochemistry constraints of Mesozoic–Cenozoic calc-alkaline magmatism in the South Shetland arc, Antarctica. *Journal of South American Earth Sciences*, 18(3–4), 407–425. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.11.011>
- Moreno-Alfonso, S. C., Okumura, S., Kilgour, G., Ubide, T., Iizuka, Y., Yasutake, M., Uesugi K., Jegal Y., Mead S. & Zellmer, G. F. (2026). Short crystal residence times and fast magma ascent prior to effusive eruptions at Mount Ruapehu, New Zealand. *Journal of Petrology*, 67(2), Article egag005. <https://doi.org/10.1093/petrology/egag005>
- Nixon, G. T. (1988). Petrology of the younger andesites and dacites of Iztaccihuatl volcano, Mexico: II. Chemical stratigraphy, magma mixing, and the composition of basaltic magma influx. *Journal of Petrology*, 29(2), 265–303. <https://doi.org/10.1093/petrology/29.2.265>
- Pankhurst, R. J. & Smellie, J. L. (1983). K–Ar geochronology of the South Shetland Islands, Lesser Antarctica: Apparent lateral migration of Jurassic to Quaternary island arc volcanism. *Earth and Planetary Science Letters*, 66, 214–222. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90137-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90137-1)
- Paterson, S. R. & Ducea, M. N. (2015). Arc magmatic tempos: Gathering the evidence. *Elements*, 11(2), 91–98. <https://doi.org/10.2113/gselements.11.2.91>
- Paterson, S. R., Memeti, V., Mundil, R. & Žák, J. (2016). Repeated, multiscale, magmatic erosion and recycling in an upper-crustal pluton: Implications for magma chamber dynamics and magma volume estimates. *American Mineralogist*, 101(10), 2176–2198. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5576>
- Petford, N., Cruden, A. R., McCaffrey, K. J. W. & Vigneresse, J. L. (2000). Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. *Nature*, 408(6813), 669–673. <https://doi.org/10.1038/35047000>
- Petsch, C., Rosa, K. K. D., Oliveira, M. A. D., Velho, L. F., Silva, S. L., Sotille, M. E. & Simões, J. C. (2022). An inventory of glacial lakes in the South Shetland Islands (Antarctica): Temporal variation and environmental patterns. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 94(Suppl. 1), Article e20210683. <https://doi.org/10.1590/0001-37652022020210683>
- Putirka, K. D. (2008). Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1), 61–120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>
- Riley, T. R., Burton-Johnson, A., Flowerdew, M. J. & Whitehouse, M. J. (2018). Episodicity within a mid-Cretaceous magmatic flare-up in West Antarctica: U–Pb ages of the Lassiter Coast intrusive suite, Antarctic Peninsula, and correlations along the Gondwana margin. *Geological Society of America Bulletin*, 130(7–8), 1177–1196. <https://doi.org/10.1130/B31800.1>
- Sauerzapf, U., Lattard, D., Burchard, M. & Engelmann, R. (2008). The titanomagnetite–ilmenite equilibrium: New experimental data and thermo-oxobarometric application to the crystallization of basic to intermediate rocks. *Journal of Petrology*, 49(6), 1161–1185. <https://doi.org/10.1093/petrology/egn021>
- Schärer, U., Kornprobst, J., Beslier, M. O., Boillot, G. & Girardeau, J. (1995). Gabbro and related rock emplacement beneath rifting continental crust: U–Pb geochronological and geochemical constraints for the Galicia passive margin (Spain). *Earth and*

- Planetary Science Letters*, 130(1–4), 187–200. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)00261-V](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)00261-V)
- Smellie, J. L., Pankhurst, R. J., Thomson, M. R. A. & Davies, R. E. S. (1984). The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution. *British Antarctic Survey Scientific Reports*, 87, 1–85.
- Smellie, J. L. (2020). The role of volcanism in the making of Antarctica. In Oliva, M, & Ruiz-Fernández, J. (Eds.), *Past Antarctica, Paleoclimatology and Climate Change* (ss. 69–87). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817925-3.00004-5>
- Smellie, J. L., Panter, K. S. & Geyer, A. (2021). Volcanism in Antarctica: 200 million years of subduction, rifting and continental break-up. *Geological Society of London Memoirs*, 55, 1–6. <https://doi.org/10.1144/M55>
- Smith, J. V. & Brown, W. L. (1988). *Feldspar minerals* (2. Edt.). Springer-Verlag.
- Stern, R. J. (2015). Magmatism at convergent plate boundaries. In *Encyclopedia of Marine Geosciences* (ss. 1–12). Springer.
- Streck, M. J. (2008). Mineral textures and zoning as evidence for open system processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1), 595–622. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.15>
- Stimac, J. A. & Pearce, T. H. (1992). Textural evidence of mafic–felsic magma interaction in dacite lavas, Clear Lake, California. *American Mineralogist*, 77(7–8), 795–809.
- Ünal, A. (2025). Preliminary results on the geology and petrography of the Burro Peaks and Cecilia intrusions, South Shetland Islands (Antarctica). In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (EGU25-10432).
- Zheng, G. G., Liu, X., Pei, J., Zhao, Y., Chen, H. & Li, J. (2022). Early Palaeogene mafic–intermediate dykes, Robert Island, West Antarctica: Petrogenesis, zircon U–Pb geochronology, and tectonic significance. *Geological Journal*, 57(6), 2209–2220. <https://doi.org/10.1002/gj.4402>