



Fay Kayası Mineralojisinde Deformasyonun Rolü

Ayşe Didem Kılıç^{1*}, Tuğçe Karaca²

^{1*} Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Bölümü, Elazığ, Türkiye, (ORCID: 0000-0003-3743-8631), adkili@firat.edu.tr

² Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye (ORCID: 0000-0001-7233-8797), tuğcekaraca51@gmail.com

(İlk Geliş Tarihi 6 Temmuz 2021 ve Kabul Tarihi 20 Kasım 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.963097)

ATIF/REFERENCE: Kılıç, A. D., Karaca, T. (2021). The Role of Deformation in Fault Rock Mineralogy. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (27), 942-949.

Öz

Doğu Anadolu Fayı boyunca yeralan magmatik ve sedimanter kayaç grupları, aktif fay tektoniği nedeniyle, breşten fay kilinine kadar farklı tane boyutunda fay kayalarının geliştiği geniş bir zondur. Doğu Anadolu Fay Zonu boyunca; Karbonatlaşma, silisleşme ve cevher oluşumları gelişmiştir. Alterasyon ve farklı cevher oluşumlarının varlığı, tektonizma, deformasyon ve jeokimyasal işlevlerin bir sonucudur. Bu kayaçlarda, yaygın olarak serpantin, karbonat, talk, montmorillonit, illit, klorit gibi alterasyon ürünü minerallerin varlığı, ayrıca manyezit gelişimi, sıcaklığa, redüksiyon ve permeabiliteye işaret eder. Mineralojik incelemelerle belirlenen kalsit, hematit, limonit ve klorit mineralleri progresif alterasyonu, yüksek CO₂ ve kalsiyum içeriği ise hidrotermal akışkanların, Mg-silikatlar üzerindeki etkisini gösterir. Mikroskopik incelemeler ve jeokimyasal veriler, breşik veya kil boyutundaki tüm fay kayalarında, karbonatlaşma ve eşlik eden silisleşmenin geliştiğini gösterir. Bu durum, aktif tektoniğin, orta derece sıcaklığın ve kayaç permeabilitesinin sonucu olup, tektonik aktivite silis oluşumunu artırır. Silisli-karbonat gelişimi sırasında, sıcaklığın orta-yüksek derecede olması, deformasyon sırasında mineraller arası reaksiyonun hızlanmasına sebep olur.

Anahtar Kelimeler: Silisleşme, Alterasyon, Pirit, Doğu Anadolu Fayı.

The Role of Deformation in Fault Rock Mineralogy

Abstract

The Igneous and sedimentary rock groups along the East Anatolian Fault have caused formation of fault rocks in different grain sizes from breccia to fault clay due to active fault tectonics. The carbonation, silicification and mineralizations developed along its are the result of tectonism, deformation and geochemical functions. In these rocks have been determined alteration product minerals such as serpentine, carbonate, talc, montmorillonite, illite and chlorite. Furthermore, magnesite minerals shows temperature, reduction and permeability. The progressive alteration of calcite, hematite, limonite and chlorite minerals determined by mineralogical studies. They shows effect of hydrothermal fluids with high CO₂ and calcium content on Mg-silicates. The Microscopic studys and geochemical data show that carbonation and accompanying silicification in all brecciated or clay-sized rocks are due to active tectonism, medium temperature and permeability. During siliceous-carbonate development, the medium-high temperature causes acceleration of inter-mineral reaction during deformation.

Keywords: Silicification, Alteration, Pyrite, East Anatolia Fault.

* Sorumlu Yazar: adkili@firat.edu.tr

1. Giriş

Türkiye'nin Kuzey Anadolu fayından sonra en önemli aktif faylarından birisi olan Doğu Anadolu Fay zonu, birçok araştırmacı tarafından 1960'lı yılların başından itibaren önemli çalışma alanı olmuştur. İlk defa Altınlı (1963) tarafından Karlıova ile Bingöl arasında tanımlanan bu fay, daha sonra Allen (1969) tarafından yapılan bir çalışmada kuzeyde, Kuzey Anadolu Fayı (KAF) ile kesiştiği, güneyde ise Ölü Deniz Fayı'nın (ÖDF) devamı niteliğinde olduğu ifade edilmiştir. DAF'nın bölgesel ölçekte ilk kez haritalanması ve fay ile ilgili bazı morfolojik yapıların (yükselim ve çöküntü alanları) varlığı ise Seymen ve Aydın (1972) ve Arpat ve Şaroğlu (1975) tarafından yapılan çalışmalarda ifade edilmiştir. Yaklaşık 5-8 mm/yıl kayma hızı gösteren Doğu Anadolu Fayının atım miktarı, 15-22 km arasında ve yaşı Üst Pliyosen'dir (Demirtaş, 2003). Kuzey-güney yönlü sıkışmalı tektonizma etkisindeki bölgede, Miyosen-Erken Pliyosen zaman aralığında, ters faylar ve kıvrımlar gelişmiştir. Kıvrım eksenleri sıkışma yönüne diktir. Geç Pliyosen'den itibaren doğrultu atım tektoniği etkin olup, kuzeybatı ve kuzeydoğu uzanımlı sağ/sol yanal doğrultu atımlı faylar tüm tektonik sıkışma izlerini kesmiş veya ötelemiştir (Köküm, 2019).

Fay kayaları, fayın hareketi sırasında makaslama zonu mekaniği sonucu oluşan farklı büyüklükte kayaç türlerini kapsar (Davis ve Reynolds, 1966; Sibson, 1977). Fay kayalarının adlandırılması ve sınıflandırılması çoğu araştırmacı tarafından gruplandırılmış (Spry, 1969; Higgins, 1971; Sibson, 1977; Wise vd., 1984) olup, en yaygın kullanım Sibson (1977) tarafından yapılan sınıflamadır. Bu sınıflamada, fay kayalarını, kabuğun sıg ve derin seviyelerinde makaslama zonu içerisinde yer alan kaya türlerini; breş serisi, kataklasit serisi ve milonit serisi olarak üçe bölmüş ve fiziksel koşulların (örn. sıcaklık, sürtünme özellikleri) fay kayaçlarının oluşumunda etkin olduğunu belirtmiştir.

Farklı araştırmacılar tarafından (Miller, 1998; Bonzanigo vd., 2007; Lebourg vd., 2011; Satsukawa ve Lin, 2016; Lubiniecki vd., 2019) makaslama zonu boyunca gelişen deformasyon kinematiki üzerine yapılan çalışmalar ile fay zonu kayalarında yapısal, dokusal ve mineralojik değişimler incelenmiştir. Makaslama zonu sünümlü ve gevrek deformasyonun dokusal ve mineralojik farklılıkları (Wang vd., 2020), neo-mineralizasyon, hidrotermal alterasyon ve deformasyon gibi değişimler (Orioloa vd., 2018), makaslama zonlarındaki gevrek ve sünümlü kayaçlarda akışkan ve stres basıncının etkisi ve mikroyapısal analizlerle mineral kimyasının değişimi çalışılmıştır (Prando vd., 2019). Leydier vd. (2019) yaptıkları çalışmada, Doğu Alpler'deki makaslama fayı içerisinde sünümlü deformasyon üzerinde tektonizmanın kontrolünü ve gevrek deformasyonda akışkanın tolünü deformasyon zamanıyla ilişkilendirerek tartışmışlardır. Yaklaşık 450°C sıcaklık ve yüksek akışkan basınç koşullarında, sürtünmeli ve viskoz deformasyonun düşük hareketlerle geliştiğini, yavaş depremlerin yitim bölgeleri ile sınırlı olmayabileceğini, ancak aynı zamanda günümüz kıta-kıta çarpışma ortamlarında akışkan deformasyonun meydana gelme olasılığının yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Strauhal vd. (2017) tarafından Avusturya Ötztal-Stubai kristalin kompleksinde yapılan çalışmada, makaslama zonlarının yapısal özelliklerini, mineralojik bileşimlerini ve kayaçların jeomekanik davranışlarını karşılaştırarak, makaslama yüzeylerindeki kumlu-çakıllı fay breşlerinin montmorillonit, mika ve klorit gibi filossilikatları içerdiğini belirlemişlerdir.

Ülkemizde Batı Anadolu'da Menderes Masifi yakınında düşük açılı sıyrılmaya fay zonunda (Hetzl vd., 1995), Gediz Fay

Zonu'nda (Sarıkaya, 2004), Simav Fay Zonu'nda (Işık vd., 2003) ve Orta Anadolu'da Savcılı Fay Zonu üzerinde (Çağlayan, 2010) fay kayaları ile ilişkili çalışmalar varolmasına rağmen, DAF üzerinde benzer bir çalışma mevcut değildir. Bu çalışmanın amacı, Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) içerisinde görülen fay kayalarının mineralojik ve petrografik özelliklerini, deformasyon ve alterasyon mineralojisi bakımından değerlendirmektir.

2. Materyal ve Metot

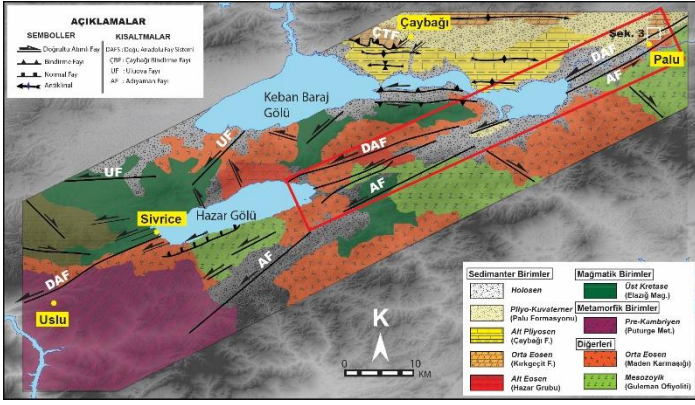
İnceleme konusu makaslama zonu kayaçları olması sebebiyle, petrografik amaçlı ince kesitlere ilave olarak tüm kaya ICP-MS analizi ve X-Ray Difraktometre analizi yapılmıştır. Araziden 30 tane kayaç ve toz numune alınmıştır. Fay kayaları gruplandırılmış ve Fırat Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği laboratuvarında 2x2x2.5 cm levhalar halinde kesilerek ince kesitleri hazırlanmıştır. Mikroskopik adlandırma için, yapılan ince kesitler Leica marka polarizan mikroskopta incelenmiş ve fotoğraflama yapılmıştır. Petrografik incelemeler sonucunda tüm kayaç kimyasal analizleri için seçilen örneklerden 12 adet örnek tüm kayaç ana oksit, iz ve nadir toprak element analizleri için ACME Analitik Laboratuvarları'na (Kanada) gönderilmiştir. Ana oksit ile iz ve nadir toprak element analizlerinde ICP-AES (indüktif coupled plasma-atomic emission spectrometresi) ve ICP-MS (inductively coupled plasma-mass spectrometry) yöntemleri kullanılmıştır. Elde edilen jeokimyasal sonuçlar, Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

3.1. Jeoloji

İnceleme alanında, Kretase'den günümüze kadar değişen yaş aralığında ve farklı türde kaya birimleri yüzeylenmektedir (Şekil 1). Bunlardan, allokon konumlu ve en yaşlı litolojik birim, Pre-Kambriyen yaşı verilen Pütürge metamorfittir. Sonraki çalışmalarda birimin granitik gnayslardaki zirkonlarda yapılan U-Pb analizi, 500-550 milyon yıl verisi elde edilmiş olup, birimin yaşı için Geç Kretase-kampaniyen önerilmiştir (Kılıç ve Ateş, 2015). İlerleyen (Amfibolit fasiyesi Stavrolit zonu) ve gerileyen (Yeşilist fasiyesi) özelliğinde iki farklı metamorfizma izi taşıyan birim, yaklaşık 628°C civarında bir metamorfizma sıcaklığına maruz kalmıştır. Bu birim, Doğu Anadolu Fay'ının Güneybatı uzanımında yüzeyleme vermektedir. Bir diğer birim, Üst Kretase yaşlı Guleman Ofiyoliti'dir. Guleman ofiyoliti eksik dizi karakterli bir birim olup, esasen peridotit kayaçlardan oluşur. Diyabaz ve plajiyogranit dayk ve damarları ile kesilen birim tektonizmadan oldukça fazla etkilenmiştir. Guleman ofiyoliti, DAF zonu üzerinde KD-GB yönlü uzanım gösterir. DAF'ın kuzeyinde Üst Meastrihtiyen-Orta Eosen yaşlı Hazar Grubu, diğer birimlere nazaran geniş yayımlıdır. Benzer şekilde, Orta Eosen yaşlı Maden Karmaşığı ile Orta Eosen yaşlı Kırkgeçit formasyonları da geniş alanlarda yayılım sunar. DAF zonu üzerindeki en genç birimler; Alt Pliyosen yaşlı Çaybağı Formasyonu, Pliyo-kuvaterner yaşlı Palu Formasyonu ve güncel alüvyonların geliştiği Holosen yaşlı dere yatağı çökelleridir (Şekil 1).

Doğu Anadolu Fay'ı K60°D doğrultulu ve yaklaşık 77 km lik bir uzanıma sahiptir. Deformasyon izlerinin en yaygın gözlemlendiği ve fay kayalarının yayılım sunduğu alan Kalebaşı tepesi ve çevresidir (Şekil 1). Şekil 1'deki jeolojik harita üzerinde de görüldüğü gibi bu alanda Kırkgeçit Formasyonunun kireçtaşları izlenir.



Şekil 1. DAFZ ve inceleme alanının jeolojik haritası (kırmızı ile çevrelenmiştir). DAF: Doğu Anadolu Fayı, AF: Adıyaman Fayı, ÇBF: Çaybağı Bindirme Fayı, UF: Uluova Fayı (Akbaş vd., 2011'de değiştirilerek alınmıştır).

3.2. Mineraloji-Petrografi

Doğu Anadolu Fay zonu volkanik, magmatik ve sedimanter kayaç grupları şeklinde farklı kayaç birimlerini keser (Şekil 1). Sibson (1977) tarafından tanımlanan fay kayaları esas alınarak, inceleme alanında breş, milonit, kataklazit, klast ve fay kili olarak beş tür kaya belirlenmiştir. Bu sınıflamada fay kayaları fiziksel koşulların (örn. sıcaklık, sürtünme özellikleri) yanında dinamik koşulların kayaç türlerinde gösterdiği farklılıkları da kapsamaktadır. Örneğin, kuvars-feldispat minerallerince zengin Elazığ magmatitleri içerisinde yer alan asitik kayaçlarda (Granit, monzonit), fay zonu içerisinde kalan bölümlerinde elastik-sürtünmeli davranış gösteren fay kili daha yaygın olarak izlenirken, breş, kataklazitik seri kayaçları daha çok volkanik veya kireçtaşı gibi kayaç türlerinde izlenir.

Doğu Anadolu fayının geçtiği alanlardaki kayaç birimlerinden kısmen Elazığ Magmatitleri ve yaygın olarak Maden Karmaşığı daha breşik (%30 dan fazla ana kaya parçası) bir özellik gösterirken, Kırkeçit ve Palu Formasyonları milonitik ve fay kili (%30 dan az ana kaya parçası) özelliği gösterir. Bağlayıcı malzeme oranına göre bu kaya türleri; Mikrobreş (%0-10), kataklazit (%50-90), foliyasyon gösteren gözlü milonitler (%50-90), milonitler (%50-90) ve fay kili şeklindedir.

Gözlü milonit-Milonit, fay boyunca genel olarak KB doğrultulu iken, ölçülen foliyasyon düzlemleri KD doğrultuludur. Sınırlı bir alanda görülen mineral lineasyonları ise K-KD doğrultulu ve yaklaşık 25°GB eğim vermesi ile foliyasyona hemen hemen paralel olduğu anlaşılır. Arazi çalışmalarında, DAFZ içerisindeki milonitik zonun Kırkeçit Formasyonu ve Hazar Grubu kayaçlarında gelişmiş olması, bu birimlerin kireçtaşı ve killi kumtaşı litolojisinde olmaları nedeniyledir (Şekil 2).

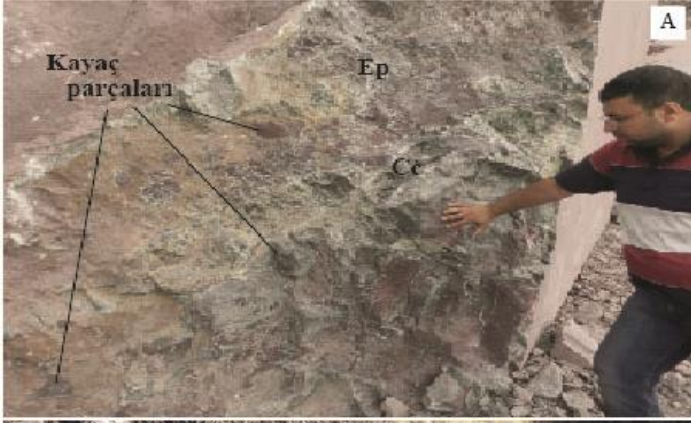
Mikrobreş, milonitik şist, milonit ve kataklazitten oluşan fay kayaları, DAF zonu içerisindeki litolojik birimlerden kayaç parçaları içerir. Fayın sığ üst bölümünde yani gevrek deformasyonun en yoğun görüldüğü kısmında mikrobreşler yaygındır. Bu fay kayaları, Maden karmaşığı ve Kırkeçit Formasyonlarından değişen büyüklükte parçalar almıştır (Şekil 2). Fay zonu boyunca mikrobreş, çakıltaşı ve detritik kireçtaşı orta katmanlanmalı bir yapı gösterir ve yer yer kiltası, killi kireçtaşı seviyeleri ile arakatmanlanlı gri/boz renkli kumtaşı çakıltaşı, mikrobreş ile birlikte izlenir (Şekil 2C).

Kataklazitler, afanitik dokuda ve yönlenme göstermeyen yaklaşık 0.2 mm'den küçük boyutludur. Fay kayası olarak klastlar <math><30\%</math> altındadır. Klastlar, milonitlerden tane boyutu ve kısmen yönlenme göstermemeleri ile farklıdır (Şekil 3). Kırılardan sünek deformasyona geçiş, 300–400°C sıcaklıklarda ve metasomatik reaksiyonların varlığında gelişebilir. Örneğin; albit mineralinin, muskovit veya K-feldispat ile yer değiştirmesi veya klorit ile biyotitin yer değiştirmesi, epidot ve hornblend'in klorite dönüşmesi gibi (Şekil 4). DAF zonu kayalarının mikroskop incelemelerinde de sıkça gözlenen klorit, 400° C'den daha düşük bir sıcaklık aralığının işaretidir (Warr ve Cox, 2001). Fay zonlardan derine inildikçe yani yüksek sıcaklıklarda (1200°C), serbest elektronların varlığı, alterasyon reaksiyonlarını hızlandırır. Örneğin lokal redoks koşullarında, simektit, montmorillonit ve pirit mineralleri, kaolinit ve karbonat minerallerine dönüşür (Şekil 5).

Fay kili, faylanmaya bağlı olarak açığa çıkan ısı ve hidrotermal akışkanların etkisiyle, kayaç türlerinin ufalanması sonucu gelişmiştir. İnceleme alanında yapılan bir çalışmada (Kılıç, 2021) kil örneklerinin X-ışınımı difraktometresi analizlerinde; Serpantin, talk, manyezit, illit, montmorillonit, klorit, kalsit ve dolomit belirlenmiştir. Karbonat ve kil minerallerinin varlığı ise hidrotermal çıkışların sonucudur. Fay zonu deformasyonunda, ana kaya bileşimi, ortamdaki akışkanlar kadar önemli olan bir diğer faktör de kayaç permeabilitesidir (Kılıç ve İnceöz, 2014). Karbondioksit bileşimli akışkanlar, kırık ve çatlak yüzeylerine yerleşirken kalsit, dolomit türü karbonat mineralleri gelişir.

Doğu Anadolu Fay zonu belirlenen bir kesimini kapsayan çalışma alanında (Şekil 1'de kırmızıyla çevrelenmiştir), deformasyona bağlı alterasyonlar, hidrotermal cevherleşmeler ve farklı özelliklerde fay kayalarının gelişmiş olması aktif tektonizmanın bir sonucudur (Şekil 3, 4, 5).

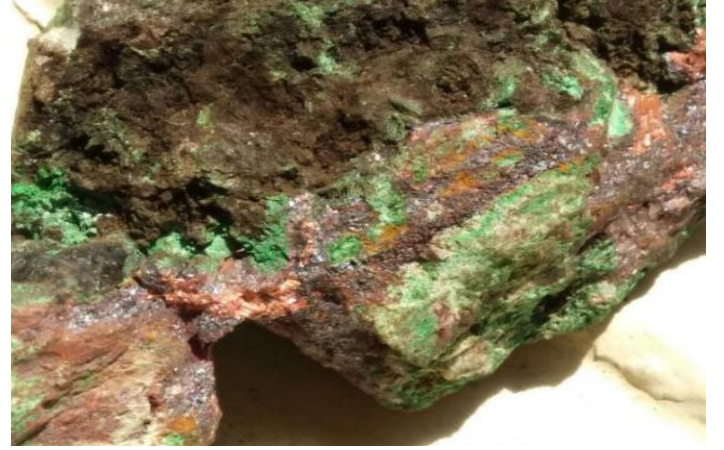
İnceleme alanında, magmatikten sedimantere kadar farklı kaya türleri bulunur. Bu kayaların dayanımları ve bileşimleri birbirinden farklı olduğundan, tektonizma sonucu farklı alterasyonlar gelişir. Genel olarak, karbonatlaşma, serizitleşme ve silisleşme yaygın fay kayası alterasyonlarıdır (Şekil 5). Bu tür alterasyonların gelişiminde, kayaçın mineral içeriği, etkili stres basıncı, sürtünme ısı gibi fiziksel koşullar etkilidir (Andreani ve diğ., 2009; Ash ve Arksey, 1990) Fay breşi ve kataklazitlerin çatlak ve oyuklarda karbonat mineralleri belirgindir (Şekil 4, 5). Hematitleşme ve limonitleşme gibi oksidasyon zonları ile pirit, epidot, malahit gibi hidrotermal işlevlerin ürünü mineraller, breşik fay kayalarında fazla miktarda, milonit ve klastlarda nadiren izlenen diğer oluşumlardır (Şekil 4).



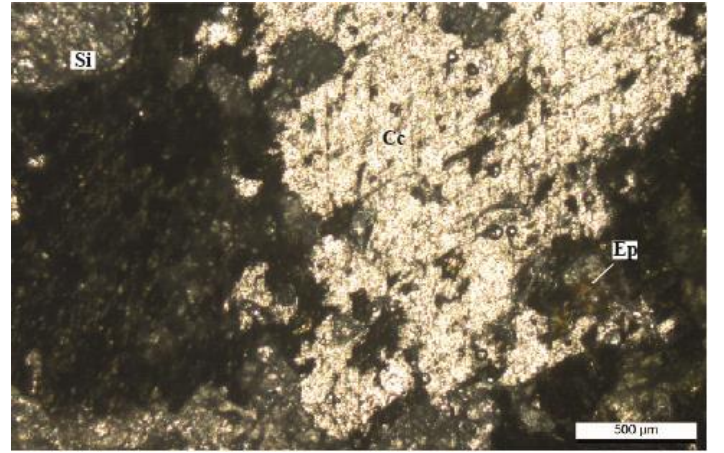
Şekil 2. Fay kayalarından alınmış arazi görüntüleri. A)Breşik kayaçlar; B)Kataklaç ve fay kili, C)Mikrobreş, çakıltaşı arıdanması.



Şekil 3.Fay zonu boyunca kataklastik kayaçların görünümü



Şekil 4. Fay zonu alterasyon mineallerinin el örneği görünümü



Şekil 5. Karbonatlaşma, serizitleşme ve silisleşmenin mikroskop görüntüsü

3.3. Jeokimya

Doğu Anadolu Fay zonunun içinde yer alan farklı kökenli kayaçlardan ibaret fay kayalarından (breş, milonit, kataklaç) jeokimyasal tüm kayaç ana oksit ve iz element analizleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir. Bu sonuçlarda, fay kayalarının malzeme aldığı sedimanter kökenli, Kırkgeçit ve Palu formasyonlarına ait örneklerin CaO oranının yüksek olduğu görülür. Breşik yapıdaki çamurtaşlarında kalsit/dolomit gibi karbonat minerallerinin varlığı, kalsiyum içeriğinin yüksek olmasına bağlanmıştır. Ancak, çatlak izleri içerisinde de yaygın olarak silis mineralleri bulunur. SiO₂’nin tüm kayaç gruplarında yüksek olması silisleşmeye, Al₂O₃ ve CaO harici diğer ana oksit oranlarının yüksek olması cevherleşmelerde sebep olan hidrotermal akışkanlara bağlanmıştır. Bu durum, fay kayası örneklerinde karbonatlaşma ve hidrotermal etkilerle gelişen yaygın bir alterasyonun kanıtıdır. Ana oksitlerden CaO, sedimanter örneklerde ortalama %18.76- 17.35, magmatiklerde ortalama %4.16-18.44’dır. Maden karmaşığına ait breşik özellikteki örneklerde ise bu değer ortalama %18.44 olup yüksektir. Karbonatlaşma ve silisleşmenin geliştiği örneklerde, Ni, Co, Na₂O ve MnO oranları yüksektir. NaO, MnO miktarı fay kili örneklerinde ana kayaya göre yüksek olup, kil minerallerinden montmorillonit varlığı görülür.

Caritat ve diğerleri (2017) tarafından kullanılan element oranları için korelasyon analiz diyagramları, fay kayaları için de kullanılmıştır. Bu diyagramlarda, Alüminyum ve diğer major elementlerin kıyaslandığı bu diyagramlarda, Al’un, Ca elementi dışında Si, Na, Fe, K, Ti ve P elementlerince pozitif bir değişim

gösteriyor olması, karbonat minerallerinden ziyade bu elementlerin silikat içeriğinden kaynaklandığını işaret eder (Strauhal ve diğ., 2017; Kılıç, 2017). Bi diğer oksitlerden MgO'nin Palu Formasyonuna ait örneklerde ortalama %5.59, Kırkgeçit Formasyonuna ait örneklerde ortalama %3.65, magmatitlerde ise ortalama %2.42-24.74'dir. Aynı zamanda MgO, K, P, Ti, Cr gibi ana oksitlerle pozitif bir değişim ve Ca, Mn, Na gibi ana oksitlerle negatif değişim gösterir (Tablo 1,2). Bunun olivin, piroksen gibi ferromagnezyen minerallerden veya hematitleşmeden kaynaklanabileceği sonucuna varılmıştır. Fe₂O₃ oranı ise, Palu Formasyonuna ait örneklerde ortalama %5.24, Kırkgeçit Formasyonuna ait örneklerde ortalama %5.39, magmatitlerde ise %7.56-5.42 dir. Mg, K, Ti, P ve Cr gibi ana oksitlerde pozitif artış görülür. Fe₂O₃ değerinin, CaO ve Na₂O ana oksitlerle negatif bir azalma eğilimi sunması, Mg-Fe oksit minerallerinin varlığına ve alüminyum silikat alterasyonuna bağlanmaktadır (İnceöz ve Kılıç, 2014; Kılıç ve Arslan, 2018).

İz elementler açısından fay kayaları irdelendiğinde, Ba miktarı Palu Formasyonuna ait örneklerde, ortalama 171 ppm, Kırkgeçit Formasyonuna ait örneklerde, ortalama 166 ppm, diğer magmatik birimlerde ise 4.3-156 ppm arasındadır. Ba aslında Rb ve Sr gibi feldispat ve biyotit oranına bağlı bir elementtir (Tablo 2). Baryum, Kalsiyum ve Stronsiyum elementlerinin yüksek oranı, plajiyoklaz minerallerinin sedimanter birimlere göre magmatitlerde yüksek olmasından ileri gelir. Stronsiyum, alterasyon sırasında kristal yapıdan hızla uzaklaşan bir özellik göstermesi fay killerindeki yüksek stronsiyum da açıklar (Wilson, 1989). Özellikle, karbonatlara bağlı olarak Stronsiyum, Kalsiyum ile pozitif değişim gösterir. Bir diğer iz element Rb, K-feldispat ve biyotit minerallerinin yapısında mevcut olan bir elementtir. Genellikle, ana elementlerden K ile birlikte, sedimanter birimlerde ortalama %1.19, magmatik birimlerde ise ortalama % 0.97 kadar bulunur.

Cu, Fe ve Na ana elementinin yerine geçebildiğinden alterasyon derecesine göre kil minerallerinin bileşiminde de görülebilir. Bazik magmatitlerde özellikle Maden Karmaşığı'na ait örneklerde Cu'nın yanında Co'nın da yüksek olması kökenin bazik olmasını ve alterasyondan az etkilenmeyi gösterir. Analizi yapılan örneklerin Co miktarı sedimanter örneklerde ortalama 21.25-22.5 ppm, magmatiklerde ortalama 47-25.7 ppm dir. Bu durum, olivin, piroksen, amfibol (hornblend) ve mika (biyotit) minerallerinin magmatik örneklerde fazla olmasının işaretidir. Sedimanter birimlerde Fe-Co'nın yüksek oranda ve doğrusal artış göstermesi, Co⁺² elementinin Fe⁺² elementi ile yer değiştirebilmesi özelliğinin bir sonucudur. Zn sedimanterlerde ortalama 35.3-36.5 ppm, magmatik birimlere ait örneklerde ortalama 50-55 ppm' dir. Mika, feldispat ve kil gibi alüminosilikatlarda bulunan çinko, Fe ve Mg⁺² ana elementleri ile yer değiştirebilir (Brindley and Brown, 1980). Bu nedenle, çinkonun demir ile pozitif değişim göstermesi, bu elementin mafik detritik silikatlarından kaynaklanabilir. Çoğunlukla, Çinko sülfid fazında da bulunabilen bir elementtir (Hanski, 1986). Ayrıca, Zn elementinin Sr ve Ca gibi karbonatlara bağlı elementler ile negatif değişimi, sülfid-karbonat fazı ayrışmasının işaretidir (Tablo 2). Mg'un iyon yarıçapının farklı olması ve kristal içerisinde Ca>Cr>Fe>Co iyon yarıçapı

büyüklüğüyle diffüzyon gelişmesi, mineralin yapısında çinkonun nikelenden, nikelin bakırdan, bakırın ise kobaltdan hızlı hareketi alterasyon ve diffüzyon bağımlı gösterir.

Fay kayalarında Th, U, Y ve Sr gibi elementlerin daha fazla olması, tektonohidrotermal işlevlerin işaretidir (İnceöz ve Kılıç, 2014). Düşük Ni'e nazaran yüksek As oranı, silisleşme ve karbonatlaşmayı gösterir (Rolinson, 1993). Nb oranı incelendiğinde, breşik ve milonitik yapıdaki sedimanter örneklerde ortalama %4, magmatik örneklerde ortalama %6 dir. Bunun sebebi rutil, zirkon ve sfen gibi aksesuar mineralleri olabilir. Çünkü Nb bu minerallerde yüksek oranda bulunur. Feldispat ve kuvars minerallerinde bulunan Y elementi, Ca⁺² ana elementinin yerini alabilir. Ancak, Y elementi sedimanter örneklerde ortalama 13.6 ppm, magmatiklerde ortalama 0.43-14.2'dir. Co oranının >10 ppm üzerinde olması, kalsit oranıyla ilgili olup karbonat-silikat ayırımında belirleyicidir.

Tablo 1. DAF zonu fay kayalarının ana oksit veirleri

Oksitler	Elazığ Magmatitleri			Maden Karmaşığı			Kırkgeçit Formasyonu			Palu Formasyonu	
	TE-1	TE-2	TE-3	TM-1	TM-1	TM-1	TK-1	TK-2	TK-3	TP-1	TP-2
SiO ₂	61.80	62.10	55.91	2.07	10.40	32.69	37.26	37.06	38.31	37.95	36.88
Al ₂ O ₃	17.84	17.46	14.90	0.08	0.05	14.40	9.88	9.75	9.63	9.11	9.63
Fe ₂ O ₃	7.71	7.50	7.47	5.45	3.11	7.72	5.40	5.31	5.27	5.08	5.41
MgO	1.40	1.35	4.50	18.18	19.17	36.89	3.73	3.78	3.44	5.02	6.17
CaO	3.59	3.08	5.82	28.64	26.34	0.34	19.66	19.70	19.92	18.2	16.51
Na ₂ O	4.30	4.24	4.29	0.05	0.02	5.42	1.24	1.19	1.20	0.96	0.73
K ₂ O	2.33	2.18	1.09	<0.01	<0.01	1.36	1.12	1.10	1.11	1.25	1.40
TiO ₂	0.41	0.55	0.79	<0.01	<0.01	0.31	0.49	0.50	0.44	0.45	0.50
P ₂ O ₅	0.20	0.21	0.13	0.20	0.01	0.11	0.07	0.08	0.09	0.08	0.07
MnO	0.05	0.04	0.11	0.50	0.25	0.5	0.08	0.06	0.08	0.07	0.09
Cr ₂ O ₃	0.01	0.0002	0.01	0.079	0.007	0.005	0.03	0.03	0.03	0.036	0.030
As	1.9	1.3	1.4	89.6	0.8	92	2.7	19	2.9	8.3	8.9
Ni	<20	<20	88.36	230	202	<20	101	102	100	131.6	143.4
Sc	5	3	28	24	<1	7	15	15	15	15	14
Zn	51	52	47	55	51	58	35	33	38	41	32
Ateş kaybı	0.12	1.21	4.88	44.2	41.3	0.14	20.59	19.51	21.05	21.4	22.2
Toplam	99.64	99.92	99.90	99.46	99.37	99.88	99.55	99.07	100.57	99.89	99.42

Tablo 2. DAF zonu fay kayalarının iz element analiz sonuçları

Örnekler	Ba	Be	Co	Cu	Mo	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sn	Sr	Ta	Th	Zr	Y	U	V
P-1	173	1	21.6	33.4	0.2	3.0	8.2	1.8	3.9	20.5	1	302.9	0.3	3.2	66.7	13.4	109	117
P-2	168	0.8	20.9	31.2	0.2	2.6	8.0	1.5	4.5	23.8	1	215.3	0.5	2.5	70.6	13.8	87	215
TK-1	171	1	22.8	27.4	0.3	3.0	8.6	1.7	4.1	21.2	2	202.8	0.4	3.0	66.7	13.4	109	117
TK-2	166	0.9	22.7	29.8	0.2	2.5	8.0	1.8	4.3	15.1	2	165.7	0.3	2.8	70.6	13.8	87	215
TK-3	160	0.9	22.2	28.2	0.1	2.8	8.1	1.7	4.4	14.3	2	163.3	0.3	2.7	70.6	13.8	87	215
TM-1	4	<1	21.5	46.7	0.3	0.1	0.5	4.5	5.3	40.1	<1	344.6	0.3	<0.2	0.6	1	18	102
TM-2	3	<1	1.5	49.3	0.3	0.4	<0.5	5.2	5.7	30.7	2	355.5	0.4	<0.2	0.3	0.2	0.5	110
TM-3	6	<1	90	46.9	0.0	0.1	<0.5	<0.1	5.2	29.2	<1	360.1	0.2	0.1	05	0.1	1.3	95
TE-1	144	<1	22.7	23.5	0.1	2.3	9.3	1.7	5.1	42.6	1	503.3	0.3	3.0	70.1	15.2	1.2	107
TE-2	124	<1	21.2	27.1	0.1	2.9	8.2	1.9	4.9	34.7	2	422.2	0.3	2.7	78.1	13.3	0.9	110
TE-3	199	<1	22.9	26.7	0.1	3.0	9.1	2.1	5.8	38.1	1	510.8	0.3	3.2	69.3	14.2	1.0	113

4. Sonuç

Alp orojenik sistemi içerisindeki Türkiye arazisinde Kuzey Anadolu fayı, Ege graben sistemi, Doğu Anadolu fayı gibi birçok aktif fay bulunur. DAF önemli bir makaslanma zonu olduğundan deformasyon, mikro-tektonik dokular, mineral alterasyonu, neomineralizasyon, hidrotermal işlevler gibi birçok jeolojik değişimi barındırır. Farklı köken ve mineraljik bileşimdeki kayalar yapılarının tektonizmaya gösterdiği direnç farklılığı farklı fay kayalarının gelişmesine sebep olur.

Fay zonu içerisinde, fay breşi, mikrobreş, kataklazit, milonit ve fay kili gibi kataklaz etkisini gözlemlemek mümkündür. Fay breşi fay zonu içerisindeki litolojik tüm birimlerden malzeme almıştır. Kayalar arasındaki bağlayıcı malzemenin kalsit, dolomit gibi karbonat mineralleri olduğu belirlenmiştir. Fay kili ise, montmorillonit, illit ve kaolinit olup diğer silikat bileşenleri feldspat, kuvars, kalsit ve mika mineralleridir. Çalışma alanında deformasyon ve makaslama etkilerinin yoğun izlendiği fay killlerinde illit ve montmorillonit mineralleri oluşmuştur. Fay kili içerisindeki feldspatlar anakayadaki alterasyonun kısmen korunduğunu minerallerden biri olup, çoğunlukla kalsit ve dolomit gibi karbonat mineralleri ve kile dönüşmüştür. Milonitleşme ve kataklaz etkilerinin alterasyon gelişiminde önemli bir unsur olduğu, pirit, klorit, hematit, malahit gibi yeni mineral oluşum süreçlerinin varlığından anlaşılan bir durumdur.

Montmorillonit, illit gibi hidrotermal mineraller ve kuvars minerali maksimum 300°C ye kadar bir sıcaklığın varlığını gösterir. Çatlak hatları boyunca veya kataklaz parçaların çevresinde gelişen karbonat-silis oluşumu, hidrotermal akışkanların varlığında progresif alterasyonu, permeabiliteyi ve redüksiyon koşullarında gelişmiş tektonik aktiviteyi gösterir. Permeabilitenin önemi ve incelenen fay zonu boyunca olan etkisi talk-manyezit mineral çiftinin varlığından teyit edilebilir. Petrografik gözlemler, fay hattı kırık sistemindeki gözlemler, karbonatlaşma, silisleşme, hematitleşme, piritleşmenin yaygın olması ve jeokimyasal analizlerin değerlendirilmesiyle, Doğu Anadolu makaslama zonu üzerinde yoğun bir deformasyon ve deformasyona bağlı olarak gelişmiş hidrotermal alterasyon mineralleri mevcuttur.

5. Teşekkür

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Proje Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından MF 20.41. nolu proje kapsamında desteklenmiş olup, araştırmacılar olarak teşekkür ederiz.

Kaynakça

- Akbaş, B., Akdeniz, N., Aksay, A., Altun, İ.E., Balcı, V., Bilginer, E., Bilgiç, T., Duru, M., Ercan, T., Gedik, İ., Günay, Y., Güven, İ.H., Hakyemez, H.Y., Konak, N., Papak, İ., Pehlivan, Ş., Sevin, M., Şenel, M., Tarhan, N., Turhan, N., Türkecan, A., Ulu, Ü., Uğuz, M.F., Yurtsever, A. ve diğerleri, (2011). 1:1.250.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayını, Ankara-Türkiye.
- Allen, C. R., (1969). Active faulting in northern Turkey: Division of Geological Sciences. California Institute of Technology Contribution, (1577), 32.

- Altınlı, İ.E. (1963). Explanatory text of the Geological Map of Turkey of 1:500 000 scale; Erzurum sheet. Publ. Bulletin of Mineral Research and Exploration Inst., Ankara.
- Andreani, M., Luquot, L., Gouze, P., Godard, M., Hoise, E., Gibert, B., (2009). Experimental study of carbon sequestration reactions controlled by the percolation of CO₂-rich brine through peridotites. Environmental Science & Technology, (43), 1226-1231.
- Arpat, E., Şaroğlu, F. (1975). Türkiye'de Bazı Önemli Genç Tektonik Olaylar. Türkiye Jeoloji Bülteni, (18 /1-2), 91-101.
- Ash, C. H. and Arksey, R. L., (1990). The listwanite-lode gold association in British Columbia. Geological Fieldwork 1989, B.C. Department of Energy and Mines, (1990-1),365- 364.
- Bonzanigo L, Eberhardt E, Loew, S. (2007). Long-term investigation of a deep-seated creeping landslide in crystalline rock. Part I. Geological and hydromechanical factors controlling the Campo Vallemaggia landslide. Can Geotech J. (44), 1157-1180.
- Brindley, G.W. and Brown, G. (1980). X-Ray Diffraction Procedures for Clay Mineral Identification. In: Brindley, G.W. and Brown, G., Eds., Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-Ray Identification. Mineralogical Society, 305-356.
- Caritat, P. de, Main, P.T., Grunsky, E.C. & Mann, A. (2017). Recognition of geochemical footprints of mineral systems in the regolith at regional to continental scales. Australian Journal of Earth Sciences, (64-8,) 1033-1043.
- Çağlayan, A. (2010). Savcılı Fay Zonunun (Kırşehir) Yapısal Analizi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, yayımlanmamış.
- Davis, H.G. and Reynolds, S.J. (1996). Structural Geology of Rocks and Regions. John Wiley & Sons, Inc. 776.
- Demirtaş, R., (2003). DAFZ'nda Deprem Üreten Diri Faylar; 1900-2003 Yılları Arasında Doğu Anadolu Fay Zonunda Olmuş Hasar Yapıcı Depremler. Deprem ve Kentleşme. 23-24-25 Eylül 2003, TMMOB Jeoloji Müh.Odası yayımları, (78), 3.
- Duman, T. Y., Emre, Ö. (2013). The East Anatolian Fault: geometry, segmentation and jog characteristics. Geological Society, London, Special Publications, 372.
- Hanski, E. (1986). The Gabbro-Wehrlite Association in the Eastern Part of the Baltic Shield. In: Friedrich, G. H., Genkin, A. D., Naldrett, A. J., Ridge, J. D., Sillitoe, R. H., and Vokes, F. M. (eds.) Geology and Metallogeny of Copper Deposits. Proceedings of the Copper Symposium 27th International Geological Congress Moscow, 1984. Special Publication No. 4 of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits. Verlag, Berlin Heidelberg 151-17.
- Hetzl, R., Ring, U., Akal, C., & Troesch, M. (1995). Miocene NNE-directed extensional unroofing in the Menderes Massif, southwestern Turkey. Journal of the Geological Society, (152-4), 639-654.
- Higgins, M.W. (1971). Cataclastic rocks. In: Professional Paper. United States Geological Survey, (687), 97.
- Işık, V., Seyitoğlu, G. Cemen, I. (2003). Ductile-brittle transition along the Alasehir shear zone and its structural relationship with the Simav detachment, Menderes massif, western Turkey. Tectonophysics, (374), 1-18.
- İnceöz, M., Kılıç, A. D. (2014). Tektonizma, Alterasyon ve Ultramafik Sistemlerin Rolü. Fırat University Journal of Engineering. 26 (2), 149-157.

- Kılıç, A.D., Ateş, C., (2015). Geochronology of the Late Cretaceous magmatism and metamorphism, Pütürge massif. Turkey. *Acta Petrologica Sinica*, (31/5), 93-101.
- Kılıç, A.D., (2017). Microstructure and Mineralogic Evidences of Fractional Differentiation: The Yeşilova Ophiolite Example. *Journal of Earth Science and Engineering*, (7), 28-36.
- Kılıç, A.D., Arslan, G., (2018). Ca-Fe-Si granatlarda raman spektroskopisi uygulaması, mineralojik ve jeokimyasal özellikleri. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, (9:1), 291-299.
- Kılıç, A.D. (2021). Fay Kili Mineralojisinde SEM ve XRD Veri Analizi, *ICOMNAS'21-Bildiri Özleri Kitabı*, 32-35.
- Köküm, M., İnceöz, M., (2018). Structural analysis of the northern part of the East Anatolian Fault System. *Journal of Structural Geology*, (114), 55-63.
- Köküm, M., (2019). Landsat TM Görüntüleri Üzerinden Doğu Anadolu Fay Sistemi'nin Palu (Elazığ)-Pütürge (Malatya) Arasındaki Bölümünün Çizgisellik Analizi. *Güfbed/Gustij*, (9/1), 119-127.
- Lebourg T, Hernandez M, Jomard H, El Bedoui S, Bois T, Zerathe S, Tric E, Vidal M. (2011). Temporal evolution of weathered cataclastic material in gravitational faults of the La Clapiere deep-seated landslide by mechanical approach. *Landslides*, (8), 241–252.
- Leydier, T., Goncalves, P., Lanari, P., Oliot, E. (2019). On the petrology of brittle precursors of shear zones – An expression of concomitant brittle deformation and fluid–rock interactions in the ‘ductile’ continental crust?. *Journal of Metamorfik Petroloji*, (37/8), 1129-1149.
- Lubiniecki, D. C., White, S. R., King, R. C., Holford, S. P., Bunch, M. A., Hill, S. M. (2019). Structural evolution of carbonate-hosted cataclastic bands adjacent to a major neotectonic fault, Sellicks Beach, South Australia. *Journal of Structural Geology*, (1269), 11-24.
- Miller, D. D. (1998). Distributed shear, rotation, and partitioned strain along the San Andreas fault, central California. *Geology*, (26), 867–870.
- Orioloa, S., Wemmerb, K., Oyhantçabalca, P., Fossend, H., Schulze, B., Siegesmundb, S., (2018). Geochronology of shear zones – A review. *Earth-Science Reviews*, (185), 665-683.
- Prando, F., Menegon, L., Anderson, M.W., Marchesini, B., Mattila, J., Viola, G. (2019). Fluid-mediated, brittle-ductile deformation at seismogenic depth: Part II – Stress history and fluid pressure variations in a shear zone in a nuclear waste repository (Olkiluoto Island, Finland).
- Reeder, R. J., (1983). Crystal chemistry of the rhombohedral carbonates. *Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy*, (11), 1-47.
- Sarıkaya, M. A. (2004). Gediz ayrılma zonu: Fay kayacı stratigrafisi ve tektonik önemi. *Yerbilimleri Dergisi*, (25/30), 63-79.
- Satsukawa, T.; Lin, A. 2016. Structural analysis of cataclastic rock of active fault damage zones: An example from Nojima and Arima-Takatsuki fault zones (SW Japan), *American Geophysical Union, Fall Meeting 2016*.
- Seymen, İ. ve Aydın, A., (1972) Bingöl deprem fayı ve bunun Kuzey Anadolu fayı ile ilişkisi. *MTA Bülteni*, (79), 1-8.
- Sibson, R. H. (1977). Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of the Geological Society*, (133/3), 191-213.
- Spry, A. (1969). *Metamorphic Textures*. Pergamon, London.
- Strauhal, T., Zangerl, C., Fellin, W., Holzmann, M., Engl, D. A., Brandner, R., Tropper, P., Tessadri, R., (2017). Structure, Mineralogy and Geomechanical Properties of Shear Zones of Deep-Seated Rockslides in Metamorphic Rocks (Tyrol, Austria). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, (50), 419–438.
- Wang, Y., Zhou, L., Zwingmann, H., Lo, C. H., Li, G., Hao, J., (2020). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of cataclastic K-feldspar: A new approach for establishing the chronology of brittle deformation. *Journal of Structural Geology*, (131), 103-948.
- Warr LN, Cox S (2001). Clay mineral transformation and weakening mechanisms along the Trans Alpine Fault, New Zealand, *Geological Society London. Spec Publ.*, (186), 85–101.
- Wilson, M. (1989). *Igneous Petrogeoesis*. Oxford University Press., 466 pp.
- Wise, D.U., Dunn, D.E., Engelder, J.T., Geiser, P.A., Hatcher, R.D., Kish, S.A., Odom, A.L. and Schamel, S. (1984). Fault-related rocks: Suggestion for terminology. *Geology*, (12), 391-394.