

Turmalinin jeolojik önemi: Ekonomik mineral arayışına dair yaklaşımlar

Nazlı Ece DERİNEL¹ ve Emine ÖZKAN¹

1. Giriş

Turmalin bir zamanlar yalnızca koleksiyon yapmak için toplanan parlak bir mineral, yarı değerli bir taş veya belirli kaya türlerinde ilginç bir tali (aksesuar) mineral olarak görülüyordu. Ancak, kimya, kristalografi ve izotop sistematiğiyle ilgili son gelişmeler, turmalinin jeolojik süreçleri çözümüleme ve yorumlamada yeni bir mineral türü olarak değerlendirilmesine neden olmuştur.

Turmalin, bolluğu ve sağladığı petrolojik bilgi çeşitliliği nedeniyle en önemli borosilikat mineralidir. Turmalin, hava koşullarına karşı dayanıklı olduğu için uzun mesafeli taşınma süreçlerine maruz kalsa da deforme olmadan özgün formunu koruyabilmektedir. Özgül ağırlığı 2.9 ile 3.1 g/cm³ arasında değişen turmalin, yoğunluk farkına göre diğer minerallerden ayrılabilir (Sciuba vd., 2020).

Turmalin grubuna ait mineraller, sedimanter kayaçlarda, kırıntılı taneler üzerinde otijenik büyümeler şeklinde gözlemlenirler. Genellikle mafik, alüminyumlu veya karbonatlı kayaçların metamorfizması sonucunda meydana gelen kayaçlarda, zeolit fasiyesinden granülit fasiyesine kadar değişen metamorfik koşul aralığında gözlemlenebilirler. Ayrıca, granitler ve granitlerle ilişkili pegmatitlerde birincil faz olarak, hidrotermal kuvars damarlarında ve breş sistemlerinde, mineralize granitlerin magmatik evresinde, volkanik kökenli masif sülfid yatakları ile ilişkili olarak bulunurlar (London, 2011).

Turmalin minerali ve izotopik bileşimi, cevher oluşturabilen akışkanlarının kimyasını daha iyi anlamak için de kullanılmaktadır. Turmalin oluştuğu ortamın sadece basınç-sıcaklık (P-T) bilgisini yansıtmakla kalmaz, aynı zamanda bileşiminde geliştiği ortamlara ilişkin izleri de barındırır. Bu izler, mineral parajenezindeki değişikliklerin tespit edilmesini sağladığı gibi iz element hareketliliği ve ana ortamın izotopik özelliği hakkında da bilgi verir. Örneğin, hidrotermal ortamlarda bu element hareketliliğinin izlerini taşıyan turmalin minerali, cevher yataklarının aranmasında bir keşif aracı olarak kullanılabilir (van Hinsberg vd., 2011a). Bazı çalışmalarda, turmalin mineralleri yaş analizlerinde

etkili olarak kullanılmıştır. Turmalin mineralleri uzun zamandır bilimde önemli rol oynamış ve bilimsel düşüncenin ilerlemesine katkıda bulunmuştur.

2. Jeolojik Oluşum Koşulları

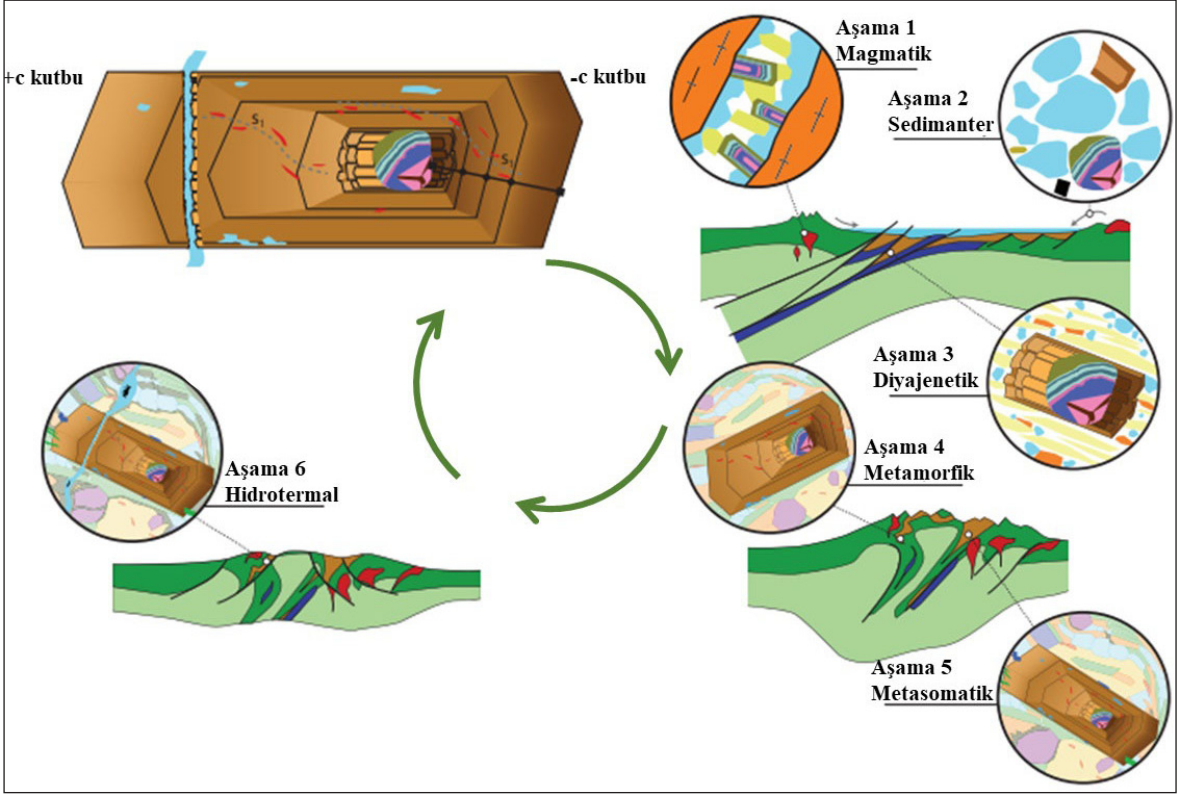
Turmalin, sedimanter havzalarda diyajenetik bir mineral olarak, cevher yataklarında gang mineral olarak, kontakt, bölgesel ve dalma-batma ile ilişkili metamorfizma, metasomatizma neticesinde oluşan ve magmatik kayaçlarda ise kristalleşen önemli bir mineral türü olarak çok çeşitli ortamlarda oluşmaktadır (Şekil 1). Bu ortamlarda, turmalin silis bakımından zengin intrüzif kayalar, sedimanlar, mafik kayalar, pelitik kayalar, kireçtaşları, evaporitler ve bunların metamorfik eşdeğerleri gibi geniş bir ana kaya yelpazesi içerisinde gözlemlenir. Bor içeren sıvılar ile metasomatizmaya maruz kalan kayaçlarda turmalinin yaygın olarak bulunması, turmalinin geniş ölçüde farklı bileşimleri barındırma yeteneğini ispatlamaktadır (van Hinsberg vd., 2011b).

2.1. Sedimanter Ortam

19. yüzyılda optik mineralojiyi ve kayaçların ayrıntılı olarak tanımlanmasını konu edinen petrografiye kullanılan petrografi mikroskobunun geliştirilmesiyle birlikte sedimanter kayaçlarda küçük detritik turmalin taneleri keşfedilmiştir. Turmalin, zirkon ve rutil ile birlikte en yaygın ağır minerallerden biri olarak tanımlanmıştır. Bu mineraller, sedimanter ortamlardaki mekanik ve kimyasal stabiliteleri nedeniyle önemli hale gelmiştir. Ayrıca, zirkon, turmalin, rutil oranlarının belirlenmesi; yani ZTR indeksinin tespiti, bir sedimanter ortamın olgunluğunu belirlemek için yararlı ve yaygın bir yöntem haline gelmiştir (Hubert, 1962).

Brammall (1926), Birleşik Krallık'ta bulunan Dartmoor granitine ait klastik tanelerini belirlemek için detrital turmalinin optik özelliklerinden faydalanmıştır. Bu yaklaşım, tane boyutuna, tanelerin yuvarlaklık derecelerine ve mineral kapanım türlerine ilişkin bilgileri içerecek şekilde zamanla gelişim göstermiştir. Sonuç olarak, turmaline ilişkin bu gözlemler, stratigrafik korelasyon açısından önemli yöntemlerin geliştirilmesine imkan sağlamıştır (Henry ve Dutrow, 2018).

¹Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye



Şekil 1- Turmalinin çeşitli jeolojik ortam ve süreçlerini gösteren şematik çizim (van Hinsberg vd., 2011a'dan değiştirilmiştir).

Turmaline, her türden ve her yaştan sedimanter ortamda rastlanabilir (Şekil 2). Bu geniş yayılım, birçok araştırmacı tarafından turmalinin jenetik veya stratigrafik öneme sahip olmayan bir mineral olarak görülmesine neden olmuştur. Sanılanın aksine turmalinin basit mineralojik yapıda olmayıp tek bir mineral türünden oluşmaması, bunun yanında son derece esnek bir formüle sahip karmaşık bir izomorf grubunu temsil etmesi ve her bir tanenin çok hassas morfolojik özelliğe sahip olması nedeniyle her bir turmalin tanesinin kökeni, yaşı ve dolayısıyla bu tanelerin içerisinde bulunduğu sedimanın kökeni ve yaşı ortaya konabilmektedir.

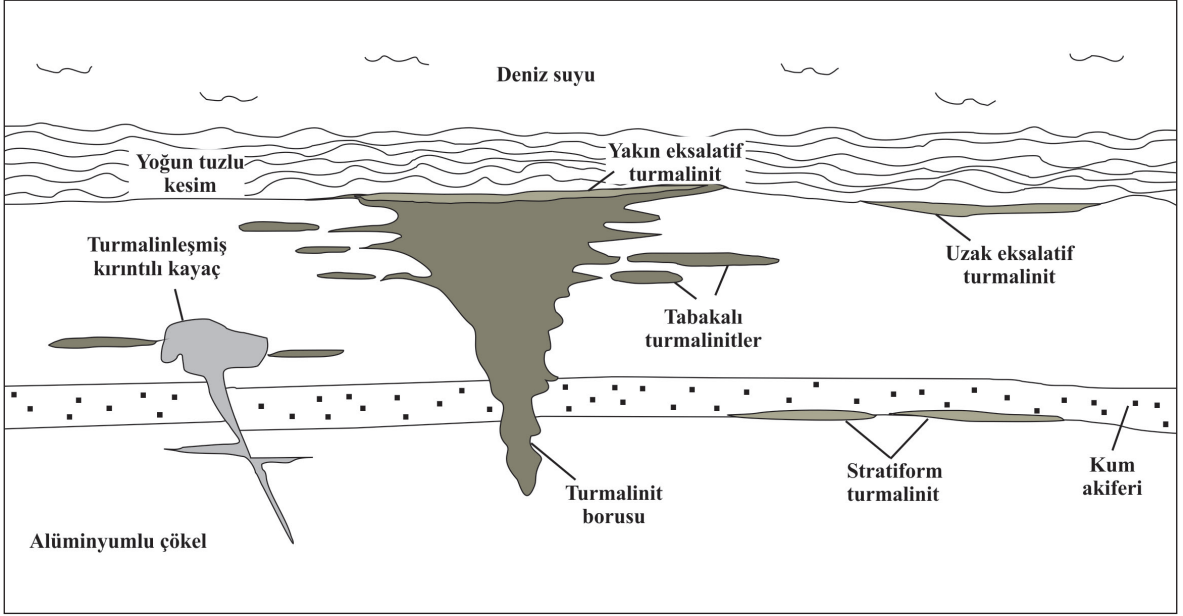
Turmalinler, oluştukları kaynağın petrolojik özelliklerini belirlemek, kaynak alanının sedimantasyon havzasının genel tektonik ve iklimsel hikayesini ortaya koymak, sedimanların çökelme esnasındaki veya öncesindeki durumlarına bakarak eski kara ve deniz arasındaki paleocoğrafik ilişkiyi belirlemek ve bu etkenlere bağlı olarak önemli ekonomik sonuçların araştırılması ve yorumlanması için kullanılmaktadır.

Bu tür çalışmaları sürdürülebilmek için turmalinin kökenini ve tanelerin kaynak alanının tespiti edilmesinden sonraki hikayesini belirlemek gerekir. Bazı turmalin çeşitleri, aynı ana kayadan gelmiş

olup benzer renk ve morfolojiye sahiptir ve aynı değişim aşamalarından geçmişlerdir. Tamamen farklı kayalardan gelen ve bu nedenle renk ve iç morfoloji açısından farklı çeşitlere sahip turmalin mineralleri de vardır; ancak hepsi aynı kaynak alanı içerisinde aynı anda taşınmış, aşınmış ve dolayısıyla yaklaşık olarak aynı miktarda değişime uğramış olup aynı yuvarlanma derecesini göstermektedir. Farklı kaynak alanlarından gelen, farklı zamanlarda ve farklı tektonik koşullar altında aşınmış olan farklı turmalin çeşitleri de vardır; bu mineraller renk çeşitliliği, iç morfoloji ve yuvarlanma açısından farklılık gösterebilirler (Krynine, 1946).

2.2. Magmatik Ortam

Magmatik kayalarda bor elementi, bor bakımından zengin kaynak kayalarının kısmi ergimesi ile zenginleşebilir ve bu da turmalin oluşumuna yol açabilir. Ayrıca bor, son derece uyumsuz bir element olduğundan, ergime fazında yoğunlaşmayı tercih eder. Bu nedenle, bor zenginleşmesi, magmatik ergimelerin fraksiyonel kristalleşmesi sırasında gerçekleşir. Bu süreç, turmalinin granitler, granitik pegmatitler ve nodüler granitler gibi çok gelişmiş ergiyiklerde yaygın bir mineral olarak gözlemlenmesine neden olmaktadır.



Şekil 2- Sedimanter ortamlarda bulunan turmalinitlerin metamorfizma öncesi oluşum ortamları (Slack, 1996'dan değiştirilmiştir).

Magmanın kristalleşmesinin sonraki aşamalarında, hidrotermal akışkanların oluşması muhtemeldir ve bunlar bor açısından zenginleşebilmektedir. Bu süreçte de turmalin oluşumları için uygun koşullar söz konusu olabilir (Dutrow ve Henry, 2011).

Magmatik ortamlarda oluşan turmalin minerallerinin kimyasal bileşimleri, Fe, Mg ve Mn gibi elementler içeren ana magmanın bileşimine ve magmadan türeyen kayaların mineral topluluğuna bağlıdır. Bu nedenle, turmalin minerali, oluştuğu magma bileşiminin birinci dereceden göstergesi olarak değerlendirilebilir. Ortaç magmatik kayalardaki şörl ve dravit gibi turmalin çeşitleri genellikle Na açısından zengin olup Fe ve Mg içerikleri açısından orta düzeyde bileşimlere sahiptir. Orta derecede fraksiyonlanmış granitik kayalarda kristalize olan şörl ve foitit gibi turmalin çeşitleri ise Fe açısından zengindir. Fraksiyonlaşmanın artması ile birlikte, turmalin Li açısından zenginleşir, böylece yüksek derecede farklılaşmış pegmatitlerde Li açısından zengin elbait, flor-liddikoatit ve rosmanit türleri karakteristik olarak gözlenir. Turmalin, B (bor) açısından zengin Li-Cs-Ta ailesi pegmatitlerde yaygın olarak gözlenirken, Nb-Y-F pegmatitlerinde daha nadir olarak bulunur (Krynine, 1946; van Hinsberg ve Henry, 2011a).

Birçok magmatik plütonik kayalarla ilişkili olarak magmanın ayrışması esnasında oluşan fazların en son aşamasında oluşan hidrotermal sıvılar, bor açısından zengindir ve çevredeki ana kayalara nüfuz edebilmektedir. Bu bor akışı turmalin oluşumuna

neden olabilmektedir ve bu da magmatik kütlelerin ana kayalarında ve onların kenarlarında turmalin açısından zengin kayalar oluşturabilmektedir. Bu tür sıvılar magmatik kütlelere yakın olabildikleri gibi Fe^{3+} oranı yüksek turmalin oluşturabilirler. Bu sıvılar birçok türdeki cevher yatağı ile ilişkili olabilirler (van Hinsberg vd., 2011a).

Çözünürlüğünün sıcaklıkla birlikte düşmesi, turmalinin pegmatitlerde çoğu granit oranla neden daha yaygın bir bileşen olduğunu açıklamaktadır. Turmalin aşırı soğuma yoluyla aşırı doymun hale gelerek granitik pegmatit damarlarının kenarlarında daha fazla yoğunlaşır (London, 2008, 2011).

2.3. Metamorfik Ortam

Metamorfik kayalarda, turmalin genellikle kayaların metamorfizma sürecini ve bazı durumlarda metamorfizmadan önceki durumlarını etkili bir şekilde kaydeder. Kompleks borosilikat olan turmalinler, mekanik ve kimyasal olarak dayanıklıdır. Birçok kayalık türünde rastlanan turmalinler, diyajenez koşullarından granülit fasiyesine kadar olan geniş yelpazedeki metamorfik koşullarda duraylı olarak kalabilmektedirler. Turmalinler oluşumları sırasında, kimyasal ortama oldukça duyarlıdır, yani eş zamanlı minerallerin ve sıvıların kimyasal değişimlerine, H_2O 'nun aktivitesine, çözünmüş malzemelere, basınç ve sıcaklık koşullarına sistematik olarak yanıt verirler. Turmalinler bir ortamda oluştuğunda bileşimlerinin hacim difüzyonuyla veya yüksek sıcaklıklarda

(>700°C) yeniden değişmesi çok zordur (Henry ve Dutrow, 1996). Tüm bu özellikler, bir metamorfik kayacın geçişini araştırmak için kullanılabilir.

Metamorfik kayalarındaki turmalinlerin kimyasal bileşimleri, bölgedeki kayaların türü ve mineral topluluklarıyla ilişkilidir. Ayrıca, turmalinlerin kimyasal bileşimleri metamorfizma derecesine bağlı olarak da değişim gösterebilir. Doğal turmalinde gözlemlenen bir diğer durum, artan sıcaklıkla birlikte Ti içeriğinin artmasıdır (Thomson, 2006). Turmalinde gözlenen buna benzer değişimler mineralin jeotermometre olarak kullanılmasına imkan sağlar (Henry ve Dutrow, 1992, 1996; Ertl vd., 2010).

Detritik (kırıntılı, aşınmış) turmalin taneleri ve bunlara bağlı aşırı turmalin büyümeleri, düşük dereceli klastik metasedimanter kayaların kaynağını ve petrojenezini çözmek için bir araç olarak kullanılabilir. Detritik turmalin çekirdekleri, sedimanter kayaların hangi tür kayalardan türediğini ortaya koyabildiği gibi turmalinlerdeki aşırı büyümeler ise kayalarındaki diyajenetik ve metamorfik reaksiyonları kaydedebilir. Turmalin büyüme evreleri, düşük dereceli metamorfik kayalardaki kimyasal reaksiyonlara ilişkin bir iz sürme aracı olarak kullanılabilir (Henry ve Dutrow, 1992).

3. Turmalinin Duraylılık Koşulları

Turmalin, yer kabuğunda bulunan koşulların çoğunu kapsayan geniş bir basınç ve sıcaklık (P-T) kararlılık aralığına sahiptir ve geniş bir jeolojik akışkan yelpazesi ile dengelenebilir (Marschall vd., 2009).

Deneysel çalışmalar, turmalinin yüksek sıcaklık ve basınç altındaki kararlılığı hakkında önemli bilgiler ortaya koyar. Doğal metamorfik turmalin oluşumları da bu mineralin kararlılığı hakkında değerli bilgiler sunar. Doğal oluşumlar, turmalinin gerçek yeryüzü koşullarında nasıl davrandığını ve hangi koşullar altında kararlı kaldığını anlamak açısından önemlidir. Bu nedenle, turmalinin yüksek sıcaklık ve basınç koşulları altındaki kararlılığı hakkında daha fazla bilgi edinmek için hem deneysel çalışmalar hem de doğal oluşumlar dikkate alınmalıdır.

3.1. Düşük Sıcaklık ve Basınç Koşulları

Turmalin, yüzey koşullarında veya yüzeye yakın kesimlerde kararlı olarak görülmektedir. Turmalinin gaz rezervuarlarındaki gözenek boşluklarında, Arkean devrinde oluşmuş stromatolitlerde, detritik turmalin taneleri üzerinde diyajenetik ve epijenetik büyümeler olarak ve tuz kubbeleri içerisinde geliştiği bilinmektedir (Henry ve Dutrow, 1996). Turmalinin

oluşum koşullarının alt sınırları iyi tanımlanmamış olsa da, sedimanter havzalarda, diyajenetik koşullarda ve yüzeye yakın bölgelerde hidrotermal yataklarda bulunması, turmalinin kararlılığının 150 °C ve 100 MPa'a kadar veya daha da düşük olabileceğini göstermektedir (Henry ve Dutrow, 1996; Henry vd., 1999; Moore vd., 2004). Turmalinler genellikle çoğu hava koşuluna dayanıklıdır, ancak nadir durumlarda, örneğin bir demir cevherinin boksitleşmesi sırasında veya Lityumca zengin pegmatitlerde kil mineralinin oluşumu sırasında değişikliğe uğradıkları görülmüştür (Henry ve Dutrow, 1996).

3.2. Yüksek Sıcaklık Koşulları

Çoğu metamorfik kayaçta, turmalinin en azından üst amfibolit fasiyesi koşullarına kadar duraylı olduğu görülmektedir. Gömülü turmalin kristalleri ve turmalinin granat içerisinde inklüzyon olarak bulunması, sillimanit açısından zengin yüksek dereceli şistlerde yaygın olarak gözlenmektedir. Turmalin, granülit fasiyesinde metamorfize olan kayalarda, bor bakımından zengin metamorfik kayalar haricinde, nadir olarak gözlenmektedir. Bazı Mg ve Al bakımından zengin granülit fasiyesi metapelitlerinde, diğer borosilikat mineralleri olan kornepin, grandidierit veya dumortierit mineralleri turmalin ile bir arada bulunurlar veya turmalinin yerini alırlar. Üst amfibolit fasiyesinden granülit fasiyesine kadar gözlenen kalkerli metasedimanlarda, serendibit yerel olarak turmalinin yerini alabilir (Henry ve Dutrow, 1996).

Deneyler, turmalinin basınca ve bileşime bağlı olarak 725 °C ile en az 950 °C arasında ergidiğini ortaya koymaktadır. Yapılan deneyler sonucunda dravit kararlılığı, deneylerde en az 950 °C'ye kadar süreklilik göstermektedir (Werdning ve Schreyer, 1996; van Hinsberg vd., 2011b).

3.3. Yüksek Basınç Koşulları

Deneysel ve petrolojik araştırmalara dayanarak, turmalinin ultra yüksek basınç (UHP) koşullarında kararlı olduğu ortaya konulmuştur. Basınç açısından bakıldığında, turmalin en azından yüksek basınçlı eklojit fasiyesi koşullarında duraylıdır. Dravit türü turmalin, Batı Alpler'deki Dora Maira Masifi'nin yüksek basınçlı (37 kbar) magnezyumca zengin şistlerinde bulunan pirop türü granatların içerisinde disten ve koezit ile birlikte mineral kapanımı olarak yer almaktadır. Magnezyodumortierit de turmalin ile birlikte pirop megakristallerinde mineral kapanımı olarak bulunmaktadır, bu da borosilikat fazının yüksek basınç koşullarında duraylı olabileceğini göstermektedir (Schertl vd., 1991).

Krosse (1995) tarafından yapılan deneylere göre dravit türü turmalin 6-8 GPa gibi yüksek basınçlarda farklı Al-Mg fazları üretmek için parçalanır. Ayrıca, deneyler sonucunda ortamda koezite varlığında doğal turmalin mineralinin, 800-850 °C sıcaklık aralığında 4.0 GPa'yı aştığı ve yaklaşık 700 °C'de 4.5-5.0 GPa basınçlara kadar kararlı olduğu tespit edilmiştir (Ota vd., 2008).

3.4. Akışkanların Duraylılığı Etkisi

Akışkan fazının kimyasının düşük sıcaklık koşullarında turmalin duraylılığı üzerinde etkisi vardır. Turmalinlerin oluşumu sırasında ortamdaki pH seviyesi önemlidir. Sulu akışkanların varlığında turmalin mineralinin, alkali çözeltilerden ziyade yüksek derecedeki asidik veya nötr çözeltilerde oluşması daha mümkündür. Turmalinin büyümesi ve çözünmesi, sulu çözelti içerisindeki katyon ve anyonların oranlarına da bağlıdır. Değişen pH değerleri ve sulu akışkan kimyasallarının etkileşimleri, turmalinde bazı karmaşık dokusal ve kimyasal ilişkilere neden olabilmektedir (Henry ve Dutrow, 2011, 2012).

4. Turmalinin Ekonomik Maden Aramaları Açısından Önemi

Yerkabuğunun sıvı ve eriyik hareketleriyle farklılaşması, belirli elementlerin belirli bölgelerde zenginleşmesine yol açar. Bu zenginleşmiş bölgeler, cevher yatakları olarak bilinir ve ekonomik olarak madencilik işlemlerini kârlı hale getirecek kadar önemli elementlerin konsantrasyonlarını içerebilir. Bu yatakların oluşumu, iç yapısı ve mekânsal yayılımı hakkında bilgi sahibi olmak, keşif ve madencilik açısından büyük önem taşımaktadır.

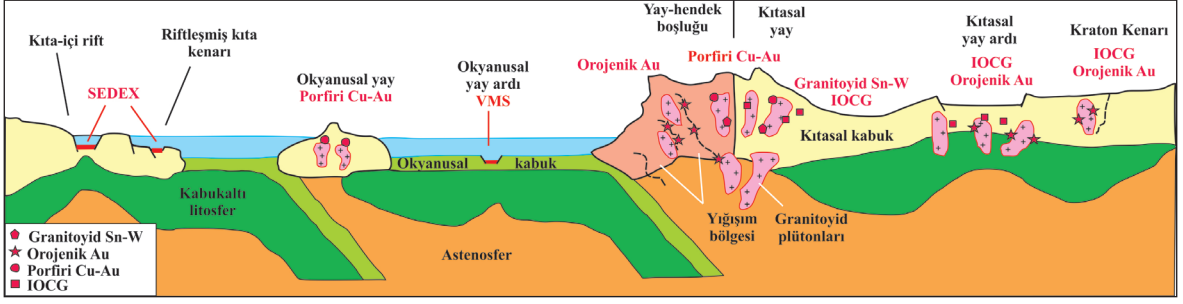
20. yüzyılın başlarında, turmalinin birçok türdeki hidrotermal cevher yataklarıyla ilişkili önemli bir gang minerali olduğu biliniyordu (Henry ve Dutrow, 2018). Turmalin mineraline kassiteritin eşlik etmesi, çoğu kalay yatakları için kabul gören bir durum haline gelmiştir (örneğin; Lehmann ve Harmanto, 1990; Duchoslav vd., 2017; Torro vd., 2024). Daha sonraki çalışmalar neticesinde, Cornwall ve Bolivya'nın iyi bilinen kalay yataklarında kalay-turmalin ilişkileri daha da pekiştirilmiştir (örneğin; Gordon, 1944; Hall, 1971). Daha fazla türdeki cevher yatakları tanımlandıkça, daha fazla turmalin ilişkisi tespit edilmiştir. Kanada, Ontario'da orta dereceli şistlerde altın içeren turmalin-kuvars damarları keşfedilmiştir (Means, 1914). Kuzey ve Orta Şili (örneğin; Warnaars vd., 1985; Skewes vd., 2003) ile Arjantin (örneğin; Dill vd., 2012) gibi bölgelerde bakır içeren turmalin breş boruları (bacaları) çalışılmıştır. Lausen (1926) Arizona'nın zinober yataklarında, metamorfik ana

kayaçlarda turmalin ve kuvars arasında yakın bir ilişki tespit etmiştir.

Turmalin minerali, çeşitli tektonik ortamlarda meydana gelen birçok türdeki hidrotermal cevher yatağında yaygın bir mineral olarak bulunmaktadır (Şekil 3). En yaygın olarak bilinen iki tür hidrotermal yatak çeşidi vardır. Bu yataklardan birinde cevher mevcut kayaçlar üzerinde, genellikle damarlar, breşler halinde veya önceden var olan kayaçların üzerinde sonradan "epijenetik" olarak oluşmuştur. Bir diğer yatak türünde ise cevher "sinjenetik" olarak ana kayacın oluşumu sırasında meydana gelmiştir (Slack ve Trumbull, 2011).

Epijenetik kategori içerisinde, granit intrüzyonlarının içerisinde veya yakınında porfiri Cu±Mo yatakları, Cu-Au breş boruları, Sn-W damarları bulunmaktadır. Yeşilist ve amfibolit fasiyesi metamorfik kayaçlarında gelişen orojenik altın-kuvars damarları, bu kayaçlarda granit intrüzyonları yakınında gelişen altın-kuvars-sülfür damarları ve kıtasal ortamlarda gelişen demir oksit-bakır-altın (IOCG) yatakları da epijenetik kategoriye dahil edilmiştir. Sinjenetik kategori, genellikle deniz tabanı ortamlarında oluşan eksalatif sedimanter tip (SEDEX) Zn-Pb-Ag yatakları ve volkanojenik masif sülfid (VMS) Cu-Zn-Pb-Ag-Au yataklarını içermektedir. Bu yatak türleri, okyanus ortamından derin yer kabuğu koşullarına kadar geniş bir kimyasal ortam ile basınç-sıcaklık koşullarını kapsamaktadır. Turmalinin farklı ortamlarda oluşması, geniş duraylılık aralığının bir kanıtıdır (Slack, 1996; Slack ve Trumbull, 2011).

Önceki çalışmalar, turmalinin ana element bileşiminin metasomatik ve metamorfik ortamlarda tüm kayaç ve akışkan bileşimlerini kaydettiğini göstermiştir. Örneğin; yüksek Li konsantrasyonu, pegmatitlerde ve granitlerde magmatik turmalin açısından tipiktir. Yüksek Sn içeriği ise kalay yataklarında yaygındır. Turmalinlerdeki Sn konsantrasyonunun, Sn magmatik verimliliği için iyi bir gösterge olduğu öne sürülmüştür. Hong vd. (2017), yüksek Sn ve Zn/Nb, Co/Nb, Sr/Ta, ve Co/La oranlarını kullanarak, turmalinlerin oluştuğu verimli Sn granitlerinden verimsiz granitleri ayırmayı başarmıştır. Diğer çalışmalar, magmatik ve hidrotermal ortamlarda turmalin kompozisyonunun, hidrotermal sıvının basıncına, sıcaklığına, tuzluluğuna ve ana kayaç kompozisyonuna bağlı olduğunu göstermiştir. Örneğin; şörl magmatik kayaçlarda daha yaygındır, oysa dravit SEDEX ve VMS hidrotermal topluluklarında tipiktir. Povondraite turmalini, yüksek tuzluluğa sahip akışkanlarda oluşmayı tercih etmektedir (Sciuba vd., 2020).



Şekil 3- Turmalin içeren hidrotermal cevher yataklarının tektonik ortamlarını gösteren şematik diyagram (Slack ve Trumbull, 2011'den değiştirilmiştir).

Metamorfik süreçlere maruz kalmış ultramafik kayalar, genellikle değişken miktarlarda Cr ve Ni içeren dravitik turmalin bileşimine sahiptir. Birçok durumda, turmalinler, olasılıkla borun kaynağı olan pegmatitik damarlar tarafından kesilen alanlarda gelişim göstermektedir. Bu turmalinler Fe bakımından zengin ve karışık kimyasal özelliğe sahip olabilirler. Birçok metamorfik bölgede yaygın olan; Cr açısından zengin şist ve gnayslar, Cr ve V açısından zengin dravit türü turmalinler içermektedirler (Henry ve Dutrow, 1996).

İz elementler de ana kayaların tüm kayaç bileşimini yansıtmaktadırlar ve akışkan kökenini gösterebilmektedirler. VMS ve SEDEX yataklarındaki turmalinler Cu, Pb ve Zn ilişkili cevherleşmenin ana ürünlerini yansıtır (Sciuba vd., 2020). Baksheev vd. (2012), turmalinin Mg, F, Fe_{tot} içeriğindeki ve Fe^{3+}/Fe_{tot} oranındaki değişimlere dayanarak porfir yataklarının (Cu, Au ve Sn) türünü ayırt etmede iyi bir potansiyele sahip olduğunu öne sürmüştür.

5. Hidrotermal Cevher Yataklarının İzotop Sistemleri

Turmalin, masif sülfid, mezotermal altın, granit ilişkili kalay-tungsten ve uranyum yatakları gibi çeşitli hidrotermal cevher yataklarında yaygındır. Turmalin, geniş bir izotopik ve elementel kompozisyon yelpazesini kaydedebilme yeteneği sayesinde, bu yatakların incelenmesi açısından değerli bir mineral olarak kabul görmektedir (Marschall ve Jiang, 2011).

Marschall ve Jiang (2011)'a göre turmalin minerallerinde bulunan bor izotopları ve diğer izotopik sistemler (örneğin; O, H, Si, Sr, Nd ve Pb) kullanılarak akışkan-kaya etkileşimi, sıvı kökeni ve evrimi, cevher yataklarının kaynakları ve oluşumları ile turmalin üreten magmatik, metamorfik ve hidrotermal olayların zamanlaması hakkında önemli bilgiler elde edilebilir.

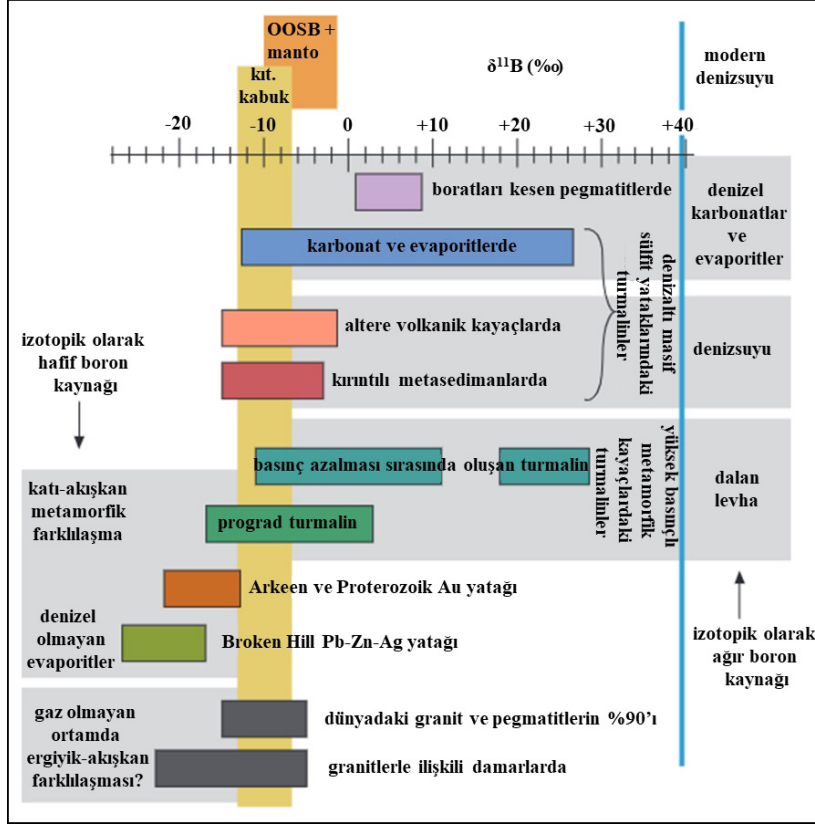
5.1. Oksijen ve Hidrojen İzotopları ($\delta^{18}O$ ve δD)

Turmalin'in oksijen ve hidrojen izotop kompozisyonları, turmalinizasyon ve ilişkili cevher oluşumunun sıcaklıkları, hidrotermal sıvıların kaynakları ve yatakların jenetik evrimi hakkında önemli bilgiler sağlar (Marschall ve Jiang, 2011).

Taylor vd. (1992)'nin yaptığı araştırmada granitler, aplitler ve turmalinli metasedimanlardan alınan turmalin üzerinde yapılan O ve H izotop çalışması, sedimanter bir protolitin göstergesi olan yüksek $\delta^{18}O$ değerlerini ve geç magmatik turmalindeki sıcaklık azalmasını yansıtan yüksek değerleri göstermiştir. Ayrıca, France-Lanord vd. (1988), turmalinin H izotoplarının diğer granitler ve pegmatitlerde bulunanlara benzer olduğunu, Taylor ve Slack (1984) ise masif sülfid yatakları ile aynı olmadığını tespit etmişlerdir. Pelitik ana kayalardaki turmalinler, daha düşük sıcaklıkları yansıtan daha düşük H ve O değerlerine sahiptirler (Henry ve Dutrow, 1996). Turmalin ve kuvars arasındaki oksijen izotop fraksiyonasyonu, düşük sıcaklık koşullarını tespit etmek amacıyla başarılı bir şekilde kullanılmıştır (Kotzer vd., 1993).

5.2. Bor İzotopları ($\delta^{11}B$)

Bor izotopları, cevher yataklarının incelenmesinde merkezi bir rol oynamaktadır. Fazla sayıda masif sülfid yatağı ve ilişkili turmalinitler üzerinde yapılan küresel bir B izotop çalışması, taban kayalarının doğasını gösteren geniş bir B izotop kompozisyon yelpazesini ortaya koymuştur (Marschall ve Jiang, 2011). Sonuç olarak, kıtasal kabuk kayaçlarındaki B, mantodaki B'dan izotopik olarak daha hafiftir ve denizel kayalar, mantoya ve kıtasal kabuğa nazaran ^{11}B bakımından daha zengindir (Şekil 4).



Şekil 4- Ana kayaç türüne göre ölçülen B izotop bileşimini (renkli kutular) ve çıkarılan B kaynaklarını (gri bantlar) gösteren diyagram (van Hinsberg vd., 2011b'den değiştirilmiştir).

5.3. Silikon İzotopları ($\delta^{30}\text{Si}$)

Son zamanlarda, Si izotop ölçümlerindeki hassasiyetin artması, birçok jeolojik ortamda Si kaynaklarının değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Jiang vd. (1994), Sullivan Pb-Zn yatağındaki turmalinitlerin oluşumu için detritik ve hidrotermal kaynakları ayırt etmeye olanak sağlayan Si'un izotopik özelliğini koruduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, Si izotoplarının metamorfizma sırasında stabil gibi görüldüğünü ve bu izotopik sistemin etkili bir paleo-çevresel gösterge aracı olabileceğini de tespit etmişlerdir. Çoğu kayada Si bolluğunun yüksek olması, orijinal izotopik bileşimin önemli ölçüde değişmesi açısından büyük miktarlarda Si değişimini gerektirdiğinden, Si izotoplarının metamorfik koşullardan etkilenmediğini göstermektedir (Henry ve Dutrow, 1996).

5.4. Rubidyum - Stronsiyum İzotopları (Rb-Sr)

Turmalinlerdeki Rb-Sr sistemi, son zamanlarda jeokimyasal araştırmalar için kullanılmaya başlanan yöntemlerden biridir. King ve Kerrich (1989), damar

tipi altın yataklarındaki turmalinin $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranlarını değerlendirmiş ve Sr'un (ve muhtemelen Au'nun) litolojik olarak ultramafik-mafik volkanik kayalar, daha yaşlı sialik temel kayaları ve türevleri gibi karmaşık kaynak bölgelerinden geldiğini bulmuşlardır. Mueller vd. (1991), Arkeen altın yataklarıyla ilişkili turmalinlerdeki Sr izotop bileşimlerini kullanarak altın içeren hidrotermal sıvıların yerel Sr izotopik özelliklerini araştırmış ve hidrotermal sıvılar için olası kaynak kayaları belirlemiştir. Başka bir çalışmada ise, turmalinlerdeki Sr izotoplarına göre, Proterozoik mezotermal altın yataklarındaki mineralleşmenin muhtemelen Proterozoik ada yayı kayaları ile granitoyitlerden türediği ortaya konulmuştur (Henry ve Dutrow, 1996).

6. Turmalin Jeokronolojisi

Turmalin Rb-Sr, Sm-Nd, Pb-Pb, K-Ar ve $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ gibi yöntemlerle doğrudan çeşitli radyometrik yöntemlerle yaşlandırılabilir. Bu yöntemlerle yapılan mineral ayrımı analizleri, mineral kapanımının etkileri dikkatlice değerlendirildiğinde veya ortadan kaldırıldığında anlamlı sonuçlar vermektedir.

Düşük K içerikleri ve turmalindeki fazla ^{40}Ar sorunlarının ele alınabilmesi durumunda yüksek hassasiyetli $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ yaşlandırma uygulamaları turmalinler için de kullanılabilir. Turmalin jeokronolojisinin, cevher yatakları çalışmalarında kullanımı henüz tam olarak keşfedilmemiştir, ancak uygun minerallerin yaşlandırılması ve cevher yatakları açısından kritik önemde yaşlandırma potansiyeline sahip olduğu tespit edilmiştir (Slack ve Trumbull, 2011).

7. Sonuçlar

Turmalin, geliştiği kayaçların jeolojik evrimine tanıklık eden kimyasal ve dokusal bilgileri kaydetme ve koruma yeteneğine sahiptir. Bu mineraller, hava koşulları, diyajenez, metamorfizma, aşınma, taşınma ve depolanma süreçlerinden geçerek tam bir jeolojik “yaşam döngüsünü” takip edebilmektedirler. Turmalinin kristalografisi ve element içeriği konusundaki mevcut anlayış, son zamanlarda yapılan turmalin akışkan deneylerinin sonuçları ve yeni nesil analitik ekipmanların kullanılabilirliği turmalinin mineraloji biliminde kullanılabilecek başlıca araçlardan biri olma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Değerlenen Belgeler

- Baksheev, I. A., Prokofiev, V. Y., Zaraisky, G. P., Chitalin, A. F., Yapaskurt, V. O., Nikolaev, Y. N., Kononov, O. V. 2012. Tourmaline as a prospecting guide for the porphyry-style deposits. *European Journal of Mineralogy*, 24(6), 957.
- Brammell, A. 1926. The Dartmoor granite. *Proceedings of the Geologists' Association* 37, 251–277.
- Dill, H. G., Garrido, M. M., Melcher, F., Gomez, M. C., Luna, L. I. 2012. Depth-related variation of tourmaline in the breccia pipe of the San Jorge porphyry copper deposit, Mendoza, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 48, 271–277.
- Duchoslav, M., Marks, M. A., Drost, K., McCammon, C., Marschall, H. R., Wenzel, T., Markl, G. 2017. Changes in tourmaline composition during magmatic and hydrothermal processes leading to tin-ore deposition: The Cornubian Batholith, SW England. *Ore Geology Reviews*, 83, 215–234.
- Dutrow, B. L., Henry, D. J. 2011. Tourmaline: A geologic DVD. *Elements*, 7(5), 301–306.
- Ertl, A., Marschall, H. R., Giester, G., Henry, D.J., Scherti, H. P., Ntafos, T., Luvizotto, G. L., Nasdala, L., Tillmanns, E. 2010. Metamorphic ultrahigh-pressure tourmaline: Structure, chemistry, and correlation to P-T conditions. *American Mineralogist*, 95, 1–10.

- France-Lanord, C., Sheppard, S. M. F., Le Fort, P. 1988. Hydrogen and oxygen isotope variations in the High Himalaya peraluminous Manaslu leucogranite: evidence for heterogeneous sedimentary source. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 513–526.
- Gordon, S. G. 1944. The mineralogy of the tin mines of Cerro de Llallagua, Bolivia. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia* 96, 279–359.
- Hall, A. 1971. Greisenization in the granite of Cligga Head, Cornwall. *Proceedings of the Geologists' Association* 82: 209–230.
- Henry, D. J., Dutrow, B. L. 1992. Tourmaline in a low grade clastic metasedimentary rock: an example of the petrogenetic potential of tourmaline. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 112, 203–218.
- Henry, D. J., Dutrow, B. L. 1996. Metamorphic tourmaline and its petrologic applications. In: Grew, E.S., Anovitz, L.M. (Eds.), *Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry*. *Reviews in Mineralogy*, 33, 503–557.
- Henry, D. J., Dutrow, B.L. 2011. The incorporation of fluorine in tourmaline: internal crystallographic controls or external environmental influences?, *The Canadian Mineralogist*, 49, 41-56.
- Henry, D. J., Dutrow, B. L. 2012. Tourmaline at diagenetic to low-grade metamorphic conditions: Its petrologic applicability. *Lithos* 154, 16–32.
- Henry, D. J., Dutrow, B. L. 2018. Tourmaline studies through time: contributions to scientific advancements. *Journal of Geosciences*, 63, 2, 77–98.
- Henry, D. J., Kirkland, B. L., Kirkland, D. W. 1999. Sector-zoned tourmaline from the cap rock of a salt dome. *European Journal of Mineralogy*, 11, 263–280.
- Hong, W., Cooke, D. R., Zhang, L., Fox, N., Thompson, J. 2017. Tourmaline-rich features in the Heemskirk and Pieman Heads granites from western Tasmania, Australia: characteristics, origins, and implications for tin mineralization. *American Mineralogist*, 102, 876–899.
- Hubert, J. F. 1962. A zircon-tourmaline-rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstones. *Journal of Sedimentary Research*, 32, 440–450.
- Jiang, S. Y., Palmer, M. R., Ding, T. P., Wan, D. F. 1994. Silicon isotope geochemistry of the Sullivan Pb-Zn deposit, Canada. A preliminary study. *Economic Geology*, 89, 1623–1629.

- King, R. W., Kerrich, R. W. 1989. Strontium isotope compositions of tourmaline from lode gold deposits of the Archean Abitibi greenstone belt (Ontario-Quebec, Canada); implications for source reservoirs. *Chemical Geology Isotope Geoscience Section* 79, 225–240.
- Kotzer, T. G., Kyser, T. K., King, R. W., Kerrich, R. 1993. An empirical oxygen- and hydrogen-isotope geothermometer for quartz–tourmaline and tourmaline–water. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57, 3421–3426.
- Krosse, S. 1995. Hochdrucksynthese, Stabilität und Eigenschaften der Borsilikate Dravit und Kornerupin, sowie Darstellung und Stabilitätsverhalten eines neuen Mg-Al-borates. Thesis, Ruhr-Universität Bochum.
- Krynine, P.D. 1946. The tourmaline group in sediments. *The Journal of Geology*, 54(2), 65–87.
- Lausen, C. 1926. Tourmaline-bearing cinnabar veins of the Mazatzal Mountains, Arizona. *Economic Geology*, 21, 782–791.
- Lehmann, B., Harmanto, 1990. Large-scale tin depletion in the Tanjungpandan tin granite, Belitung Island, Indonesia. *Economic Geology*, 85(1), 99–111.
- London, D. 2008. Pegmatites. *The Canadian Mineralogist Special Publication*, 10, 347 pp.
- London, D. 2011. Experimental synthesis and stability of tourmaline: a historical overview. *The Canadian Mineralogist*, 49(1), 117–136.
- Marschall, H. R., Jiang, S. Y. 2011. Tourmaline isotopes: no element left behind. *Elements*, 7(5), 313–319.
- Marschall, H. R., Korsakov, A. V., Luvizotto, G. L., Nasdala, L., Ludwig, T. 2009. On the occurrence and boron isotopic composition of tourmaline in (ultra) high-pressure metamorphic rocks. *Journal of the Geological Society, London*, 166, 811–823.
- Means, A. H. 1914. Tourmaline-bearing gold quartz veins of the Michipicoten District, Ontario. *Economic Geology*, 9, 122–135.
- Moore, J. N., Christenson, B. W., Allis, R. G., Browne, P. R. L., Lutz, S. J. 2004. The mineralogical consequences and behavior of descending acid-sulfate waters: an example from the Karaha–Telaga Bodas geothermal system, Indonesia. *The Canadian Mineralogist*, 42, 1483–1499.
- Mueller, A. G., de Laeter, J. R., Groves, D. I. 1991. Strontium isotope systematics of hydrothermal minerals from epigenetic Archean gold deposits in the Yilgam Block, Western Australia. *Economic Geology*, 86, 780–809.
- Ota, T., Kobayashi, K., Katsura, T., Nakamura, E. 2008. Tourmaline breakdown in a pelitic system; implications for boron cycling through subduction zones. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Springer, 155, 19–32.
- Schertl, H. P., Schreyer, W., Chopin, C. 1991. The pyrope–coesite rocks and their country rocks at Parigi, Dora Maira Massif, Western Alps: detailed petrography, mineral chemistry and PT-path. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Springer, 108, 1–21.
- Sciuba, M., Beaudoin, G., Makvandi, S. 2020. Chemical composition of tourmaline in orogenic gold deposits. *Mineralium Deposita*, 56, 537–560.
- Skewes, M. A., Holmgren, C., Stern, C. R. 2003. The Donoso copper-rich, tourmaline-bearing breccia pipe in central Chile: petrologic, fluid inclusion and stable isotope evidence for an origin from magmatic fluids. *Mineralium Deposita*, Springer, 38, 2–21.
- Slack, J. F. 1996. Tourmaline associations with hydrothermal ore deposits. *Reviews in Mineralogy*, 33, 559–644.
- Slack, J. F., Trumbull, R. B. 2011. Tourmaline as a recorder of ore-forming processes. *Elements*, 7(5), 321–326.
- Taylor, B. E., Slack, J. F. 1984. Tourmalines from Appalachian-Caledonian massive sulfide deposits: Textural, chemical, and isotopic relationships. *Economic Geology*, 79, 1703–1726.
- Taylor, R. P., Ikingura, J. R., Fallick, A. E., Huang, Y., Watkinson, D. H. 1992. Stable isotope compositions of tourmalines from granites and related hydrothermal rocks of the Karagwe-Ankolean Belt, Northwest Tanzania. *Chemical Geology Isotope Geoscience Section* 94, 215–227.
- Thomson, J. A. 2006. A rare garnet - tourmaline - sillimanite - biotite - ilmenite - quartz assemblage from the granulite facies region of south-central Massachusetts. *American Mineralogist*, 91, 1730–1738.
- Torró, L., Harlaux, M., Castro-Morante, A., Vallance, J., Tavazzani, L., Bouvier, A. S., Carles Melgarejo, J. 2024. Tin Mineralization in the Triassic Chacaltaya District (Cordillera Real, Bolivia) Traced by In Situ Chemical and $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{11}\text{B}$ Compositions of Tourmaline. *Economic Geology*, 119(2), 471–500.
- van Hinsberg, V. J., Henry, D. J., Dutrow, B. L. 2011a. Tourmaline as a petrologic forensic mineral: A unique recorder of its geologic past. *Elements*, 7, 327–332.

- van Hinsberg, V. J., Henry, D. J., Marschall, H. R. 2011*b*. Tourmaline: an ideal indicator of its host environment. *The Canadian Mineralogist*, 49(1), 1–16.
- Warnaars, F. W., Holmgren, D. C., Barassi, F. S. 1985. Porphyry copper and tourmaline breccias at Los Bronces-Río Blanco, Chile. *Economic Geology*, 80(6), 1544–1565.
- Werding, G., Schreyer, W. 1996. Experimental studies on borosilicates and selected borates. In: Grew, E.S., Anovitz, L.M. (eds.) *Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry*. Mineralogical Society of America *Reviews in Mineralogy*, 33, 117–163.