



Nükleer Atık Deposu Olarak Kullanılan Granitik Kayaçlarda Termal Isı Etkisi İle Mikro Çatlak Gelişimi

Çok az miktar uranyumdan büyük miktarda enerji üretilmektedir. Bir kg U235'in gücü 1 ton kömür veya 17000 metre küplük doğalgazın enerjisine eşittir. Bununla birlikte, nükleer enerji sıfır karbon emisyonuna sahip temiz bir enerji kaynağı olarak kabul edilse de özellikle nükleer atık sızıntıları çevre ve insan sağlığını ciddi bir şekilde tehdit etmektedir.

Sibel Tatar Erkül
Akdeniz Üniversitesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü
statar@akdeniz.edu.tr

Giriş

Dünyada artan enerji talebi nedeni ile ülkeler nükleer ve yenilenebilir enerji gibi petrol dışında alternatif enerji arayışlarına yönelmiştir. Petrol alternatifleri enerji kıtlığı sorununu çözebilecek kapasitededir, ancak bu kaynakların oluşturulmasının da belirli bir bütçe gerektirmektedir [1]. Çok az miktar uranyumdan büyük miktarda enerji üretilmektedir. Bir kg U²³⁵'in gücü 1 ton kömür veya 17000 metre küplük doğalgazın enerjisine eşittir. Bununla birlikte, nükleer enerji sıfır karbon emisyonuna sahip temiz bir enerji kaynağı olarak kabul edilse de özellikle nükleer atık sızıntıları çevre ve insan sağlığını ciddi bir şekilde tehdit etmektedir. Son yıllarda alternatif enerji

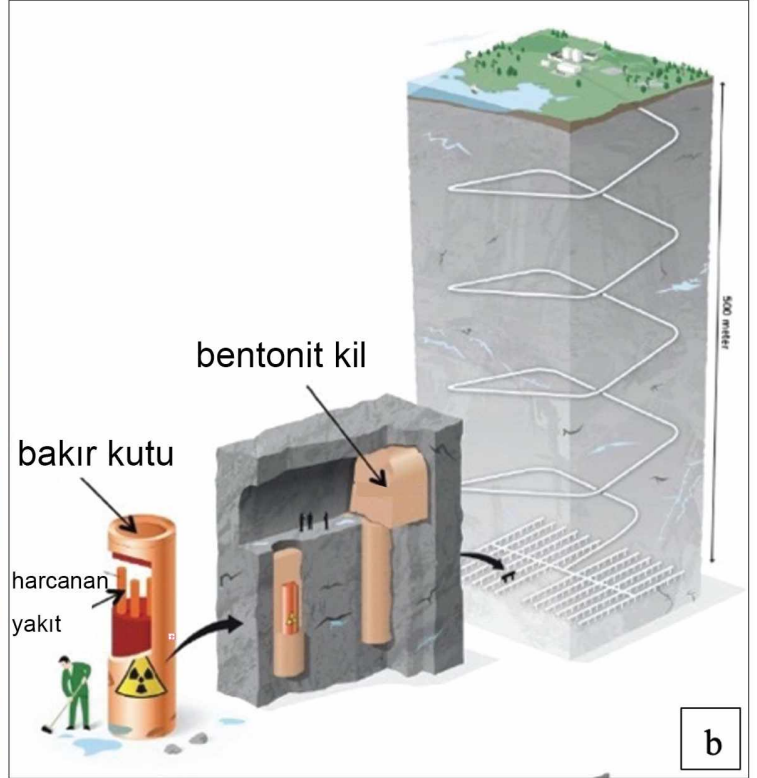
kaynaklardan birisi olarak kabul edilen nükleer atıkların derin jeolojik ortamlarda depolanması/bertaraf edilmesi ile ilgili çalışmalar oldukça fazladır ve yüksek seviyeli radyoaktif atık sorununu çözenin en uygun ve ekonomik yollarından biri olarak kabul edilmektedir [2]. Bu faaliyetler, nükleer atıkların yerin 500-1000 m altındaki jeolojik yapıların içerisine gömülmesini ve bunların insanların yaşadığı ortamdan kalıcı olarak izole edilmesi için mühendislik ve doğal bariyer sistemlerinin kullanılmasını içerir. Çeşitli ısıtma ve yakma işlemlerinden sonra aniden soğutulmuş ısıtma maruz kalan kayaçların mekanik ve kimyasal özelliklerinden yola çıkılarak nükleer atık depolama sistemleri geliştirilmeye başlanmış ve depolama için kullanılması önerilmiştir. Termal değişimlere uğrayan kayaçlarda, farklı bileşimleri, mekanik, kimyasal, fiziksel özellikleri ve termal alan dışındaki dış faktörlerin etkisi nedeniyle oldukça karmaşık değişimler görülmektedir [3].

Yüksek seviyeli radyoaktif atıklar için derin jeolojik depolama alanları, yüzlerce metre derinlikteki ana kayaya kazılan tünellerin içerisine radyoaktif nükleer atık kutularının yerleştirilmesi süreçlerini kapsamaktadır [4] (Şekil 1). Bu alanların inşası, yeraltı suyunun kirlenmesini önlemek

amacı ile yeraltı suyu seviyesinin üzerine yerleştirilmesi gereken çok bariyerli bir sisteme dayanmaktadır [2]. Çoklu bariyer sistemi, tasarlanmış bir bariyer ile doğal bir ana kayadan oluşan jeolojik bariyerden oluşmaktadır. Bu nedenle jeolojik bariyer oluşturacak kayaçların yüksek sıcaklık altında dayanıklılığı son derece önemlidir (Şekil 2a). İsveç'te yapılan derin jeolojik depolarda nükleer atıklar, 5cm kalınlığında bakır kutularla çevrelenmiş dökme demir çerçevelerde 500m. derinlikteki granitik ana kaya içerisine yerleştirilmiş ve yüksek oranda sıkıştırılmış bentonit ile kaplanmıştır [4] (Şekil 2b).



Şekil 1. Morsleben, Almanya'da 500 metre derinliğinde bir jeolojik nükleer atık deposu [5].



Şekil 2. (a) Nevada test alanında granitlerde atık imha alanları [6]; (b) İsveç'te çok bariyerli derin jeolojik nükleer atık deposu [7].

Çin'deki yüksek seviyeli atık deposunda granitler nükleer atıkların depolanması için bariyer görevini görmektedir. Granitler yüksek mukavemet ve düşük geçirgenlik özellikleri nedeni ile atık depolama için ideal bir bariyerdir. Nükleer bozuma süreçlerinde oluşan nüklidler önemli miktarda ısı açığa çıkarmakta ve bu da depolama görevi gören kayacın termal çatlamalara yol açmaktadır. Sıcaklık ne kadar yüksek olursa termal hasar da o kadar şiddetli olur. Kayacın gözenek yapısı da artan sıcaklıkla birlikte değişime uğrar, gözenek kanalları genişler ve geçirgenlik artar. Geçirgenlikteki bu potansiyel artış, atık deposunun uzun vadeli güvenliği ve istikrarı için bir tehdit oluşturur. Bu nedenle, nükleer atıkların güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi için yüksek sıcaklıktaki işlemlerden sonra kayaların geçirgenlikleri mutlaka incelenmelidir [8].

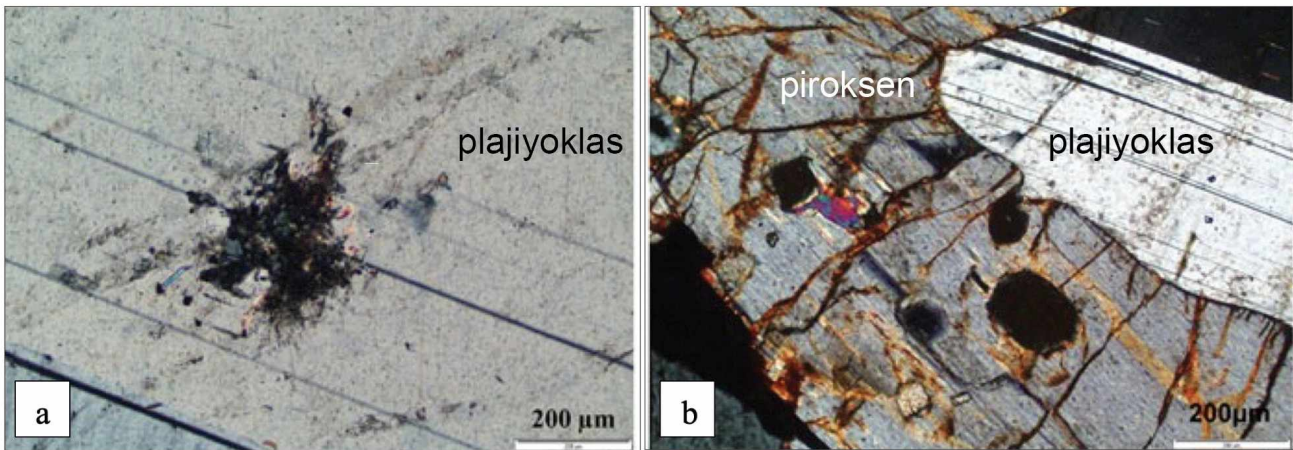
Kayaçlarda Termal Isı Etkisi

Kayaçların yüksek sıcaklıklar altındaki davranışları normal koşullardakilerden oldukça farklı olabilmektedir. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan kayaçları oluşturan mineraller termal genişlemeye uğrar. Termal gerilmelere ve kimyasal reaksiyonlara maruz kayacın mikro yapılarında hasar meydana gelebilir [9]. Kayaçların termal bozunması çeşitli şekillerde meydana gelebilir. Termal bozunmanın en yaygın biçimi mikro çatlakların ortaya çıkması, minerallerdeki kapanımlarının patlaması veya oksidas-

yon gibi kimyasal reaksiyonlardır [9, 10, 11, 12] (Şekil 3).

Kayaçlar termal etki nedeniyle renk değişimi sergilerler. Örneğin, demir oksitlerin varlığı kayacın renginin kırmızısı olmasına neden olabilir [13]. Kayaçların termal davranışı ve mikro çatlakların yayılma mekanizması kayacın mineralojik bileşimine, dokusuna ve elastikiyetine bağlıdır. Kristalin kayaçlardaki sıcaklık değişimlerine bağlı minerallerde gelişen termal genişleme nedeni ile oluşan gerilmeler kayacın tüm yapısına yayılır ve mikro çatlaklar oluşur. Termal genişleme mineral boyutuyla doğru orantılıdır ve ayrıca kristal yönelimi, şekli ve anizotropisi gibi diğer faktörlere de bağlıdır. Mikro çatlaklar, kayaçların yapısındaki termal dalgalanmalar nedeniyle oluşan bir tür deformasyondur. Polarizan ve floresan mikroskop teknikleri kullanılarak kolayca ayırt edilebilirler. Bir kayadaki mikro çatlakların yayılması, geri dönüşü olmayan deformasyonlar yaratarak kayacın petro-fiziksel özelliklerini etkileyebilmekte ve bunun sonucunda kayanın dayanıklılığını azaltabilmektedir [14].

Termal genişleme katsayısı α , bir malzemenin sıcaklıkla uzunluk değişiminin ölçüsüdür ve aynı zamanda sıcaklık ile de doğrudan ilişkilidir. Hacimsel termal genişleme katsayısı, termal olarak indüklenen değişikliklerin niceliksel bir ölçüsü olarak kullanılabilir [13]. Farklı minerallerin termal genişleme katsayıları Tablo 1'de özetlenmiştir.



Şekil 3. Yüksek sıcaklıklarda (a) kapanımların patlaması ve (b) mikro çatlaklar ve çatlaklarda gelişen oksidasyon oluşumlarının çift nikoldeki görünümü [11]

Tablo 1. Kayaç oluşturan minerallerin termal genişleme katsayıları [13].

Mineral	Hacim Genişleme (α_v)	$\alpha//c$	$\alpha//b$	$\alpha//a$
kuvars	37.0	7.70	13.3	13.30
albit	14.1	0.38	4.38	11.30
mikroklin	15.8	0.49	0.49	14.96
ortoklas	6.13	0.00	0.00	6.13
muskovit	35.4	13.80	9.9	11.10
biyotit	36.6	17.30	9.65	9.65
hornblend	23.8	6.25	7.50	6.25
hedenberjit	29.8	6.00	17.6	7.20
diyopsit	33.3	6.50	20.5	7.80
enstatit	25.0	-	-	-
bronzit	44.7	16.80	14.5	16.40
olivin	27.1	10.40	8.06	5.93
granat/pirop	20.7	6.90	6.90	6.90
hersinit	27.0	-	-	-

$\alpha//c$: c doğrultusuna/yönüne bağlı genişleme katsayısı

$\alpha//b$: b doğrultusuna/yönüne bağlı genişleme katsayısı

$\alpha//a$: z doğrultusuna/yönüne bağlı genişleme katsayısı

Genel olarak, minerallerin doğrusal termal genişmeleri arasında büyük farklar gözlemlenebilir. Yani kristalin uzun eksen ve kısa eksen boyunca genişleme arasındaki fark dolayısıyla minerallerin çoğu anizotropik termal genişleme katsayıları gösterir. Kuvars, mikroklin ve biyotit anizotropik mineraller olarak kabul edilir. Tablo 1’de kuvars, c eksenine (uzun eksen) paralel olarak en küçük termal genişleme değerine ($\alpha = 7.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), ona dik olan eksen boyunca ise en yüksek termal genişleme değerine ($\alpha = 13.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) sahiptir. Biyotit uzun eksenine paralel $17.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ve ona dik $9.65 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ısıl genişlemeye sahiptir. Albit minerali anizotropik bir termal davranışa sahiptir. Daha fazla anortit içeren plajiyoklazlar ise nispeten daha az anizotropik termal genişleme sergilerler [13].

Granitoidler, mukavemetleri, yüksek dirençleri ve çok düşük geçirgenlikleri nedeniyle nükleer atık depoları için en uygun kayaçlar olarak

kabul edilmektedir [4]. Ancak, granitoidlerin termal özellikleri, çok bileşenli, yani birden fazla mineral türünden oluşması, tane boyu, dağılımı vb. parametrelere göre farklılık sergilemektedir [12]. Sıcaklığın granitin geçirgenliği üzerinde önemli bir etkisi vardır. Sıcaklık arttıkça granitin iç yapısında ciddi hasarlar meydana gelir ve bu da geçirgenliğin sürekli artmasına neden olur. Granitin geçirgenliği efektif gerilmenin artmasıyla azalır. Düşük sıcaklıklarda kayadaki çatlaklar yalnızca deformasyona uğrar. Yüksek sıcaklıklarda, termal stresin neden olduğu çatlak uzaması, mineral parçacıkları arasındaki bağı zayıflatır, bu sadece çatlakların deformasyonuna değil aynı zamanda mineral parçacıklarının ayrılmasına ve kayaçlarda geçirgenliğin azalmasına neden olur. Granit geçirgenliğindeki değişim hem sıcaklıktan hem de efektif stresten etkilenir [8].

Mineralojik Bileşimin Kayaçın Termo-Mekanik Davranışına Etkisi

Kayaçların mineralojik bileşimi ve kristalografik yönelimi, yüksek sıcaklıklara maruz kalan kayaçların termo-mekanik davranışlarının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Minerallerin farklı termal genişleme katsayıları nedeniyle, yüksek sıcaklıklarda kayanın mikro yapısında geniş bir aralıkta termal gerilimler oluşmaktadır. Bu nedenle kayalardaki termal ısı sonrası gelişen hasarın mekanizması kayaçın mineralojisi ile doğrudan ilişkilidir (Tablo 2). Tek bileşenli kayaçlarda sıcaklık değişimi sırasında oluşan taneler/kristaller arası termal gerilimler, kristallerin anizotropisine ve heterojenliğine bağlı iken, granitler gibi farklı minerallere sahip kayaçlarda, farklı mineral kristalleri arasındaki termal genişleme uyumsuzluğundan dolayı termal çatlakların oluşumu karmaşık bir hale gelmektedir [12, 15].

Kayaçlarda Termal Isı Nedeni İle Gelişen Mikro Çatlakların Sınıflandırılması

Kayaçlarda mikro çatlaklar,

- (1) önceden var olan süreksizliklerin genişletilmesi (bölünme düzlemleri gibi),
- (2) önceden var olan mikro çatlakların yayılması ve
- (3) yeni mikro çatlakların çekirdeklenmesi şeklinde gelişir.

Tablo 2. Kayaç oluşturan yaygın minerallerin termal özellikleri ve davranışları [1, 8, 10, 12, 13, 19].

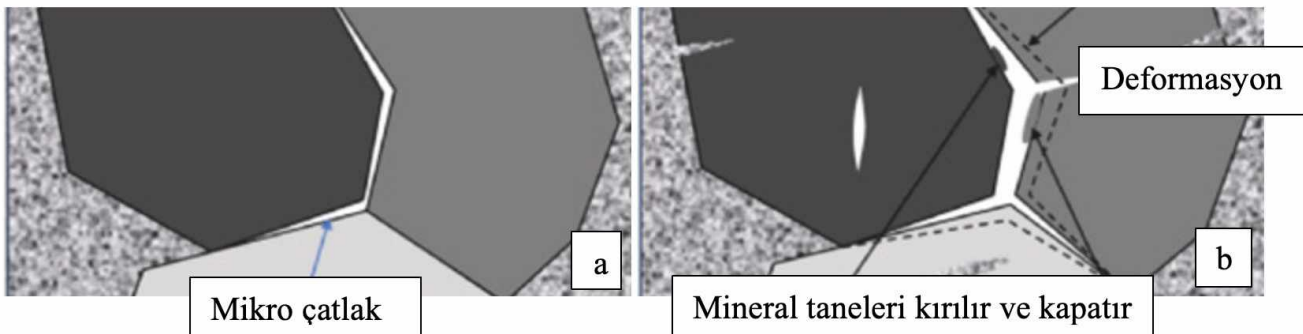
Kuvars+kalsit	Feldispat	Plajiyoklaz	Mika
<p>* Kuvars ve kalsit, çok yüksek anizotropik termal genişmeleri nedeniyle kayaçların termal bozunmasını kontrol eden ana minerallerdir.</p> <p>* Kuvarsın yüksek ve anizotropik termal genişmesine rağmen, büyük miktarda kuvarsın bir kayaçın mikro yapısında mutlaka büyük gerilimlerin oluşmasına neden olmayacağı simülasyonlarla kanıtlanmıştır.</p> <p>* Kuvars çoğunlukla düzensiz tane içi mikro çatlaklar sergiler çünkü artık gerilimler kristallerinde yoğunlaşır.</p> <p>* Kuvarsın termal genişleme katsayısı feldispatlardan çok daha yüksektir.</p>	<p>* Feldispatların düşük ve izotropik termal genişmeleri nedeniyle termal bozunmaya katkısı nispeten düşüktür.</p> <p>* Feldispatlarda tane içi mikro çatlaklar, ikiz lamel ve yarıma düzlemleri gibi zayıf bölgeler boyunca yayılır.</p> <p>* Feldispatların dayanıklılıklarının düşük olması nedeniyle genellikle transkristalin mikro çatlaklar görülür.</p>	<p>* Plajiyoklaz mineralleri K-feldispatlara göre daha fazla mikro çatlak içerir.</p> <p>* 400°C'nin altındaki sıcaklıklarda plajiyoklazın termal genişleme katsayısı K-feldispatlara göre daha yüksektir.</p>	<p>* Mika mineralleri ısınma sırasında temel gerilmelerin artmasına neden olur, kayaçlar ciddi şekilde çatlak ve hasar görür.</p> <p>* Artan sıcaklıkla birlikte, biyotit minerallerinin dilinim düzlemleri açılır, mika minerallerinin sınırları boyunca çok yüksek gerilimlerin yoğunlaşmasına neden olur, bu durum mika minerallerinin kendisini değil çevresindeki mineralleri etkiler.</p>

Söz konusu mekanizmaların etkisi ile gelişen mikro çatlaklar üçe ayrılır:

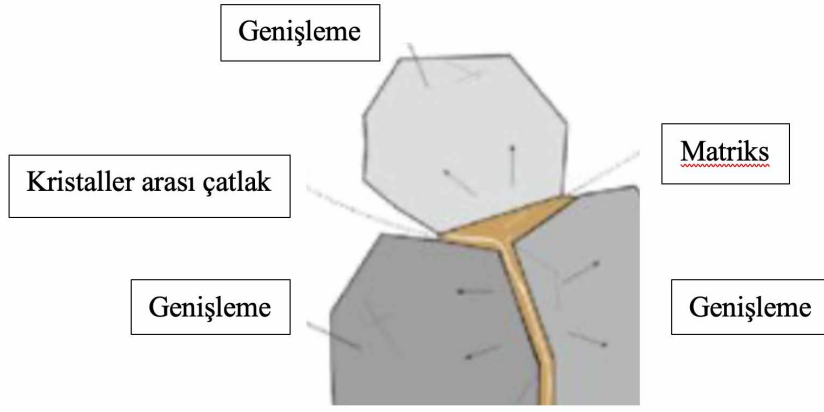
(1) Kristal içi çatlaklar: Kristalin kendi içinde mikro çatlak oluşmasıdır. Genel olarak, kristal içi çatlakların yayılması, plajiyoklaz ve biyotit durumunda olduğu gibi, kristalin ikiz lamelleri ve bölünme düzlemleri gibi zayıf bölgelerini takip eder. Öte yandan, mineralin kuvars gibi zayıf bölgeleri veya düzlemleri yoksa, kristal içi çatlaklar belirli

bir yol izlemeden kristal içinde rastgele yayılacaktır [8, 14] (Şekil 4),

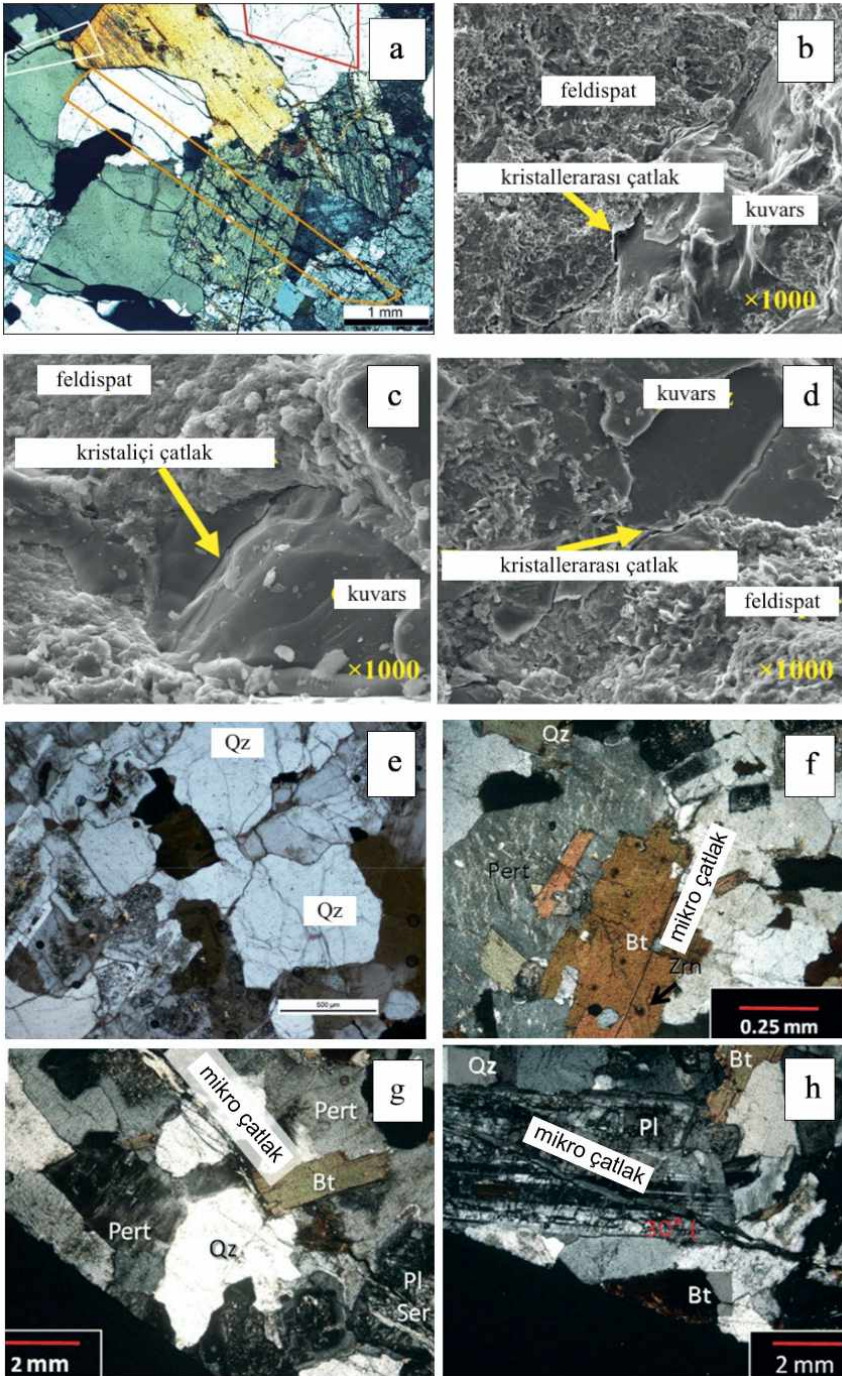
(2) Kristaller arası çatlaklar: Kristaller arası çatlaklar, farklı minerallerin kristalleri arasında veya aynı minerale ait kristaller arasında ortaya çıkar. Kristallerin sınırları boyunca yayılırlar ve ayrıca birbirleriyle birleşerek çokgenler oluşturabilirler [14] (Şekil 5).



Şekil 4. Farklı basınç koşullarında granitlerde gelişen kristal içi çatlakların şematik görünümü (a) 25 °C, 4.5 MPa, (b) 600 °C, 29.5MPa [8].



Şekil 5. Granitoidlerde gelişen iki çatlak modeli. Kristaller arası çatlak gelişimi [16].



Şekil 6. (a) Kristal içi (beyaz alan), kristaller arası (kırmızı alan) ve transkristalin (turuncu alan) mikro çatlaklar [13]; (b-d) Kumtaşı örneğindeki mikro çatlak türlerine ait SEM görüntüleri [17]; (e-h) Silezya granitinde (Çek Cumhuriyeti) kristal içi ve arası süreksizlikler ve mikro çatlakların çift nikoldeki görünümü (700°C'ye kadar ısıtılmış numune). Qz: kuvars, Bt: biyotit, Pert: (3) Transkristalin çatlaklar: Bir çatlak birden fazla kristalden geçerek yayıldığında transkristalin çatlak olarak adlandırılır (Şekil 6a-h). perit, Pl: plajiyoklas [18].

Sonuçlar

Nükleer atıkların derin jeolojik ortamlarda depolanması/bertaraf edilmesi yüksek seviyeli radyoaktif atık sorununu çözenin en uygun ve ekonomik yollarından biri olarak kabul edilmiş ve ısı işlem görmüş kayaçların mekanik ve kimyasal özelliklerinden yola çıkılarak nükleer atık depolama sistemleri geliştirilmiştir.

Derin jeolojik depolama alanları, yüzlerce metre derinlikteki ana kayaya kazılan tünellerin içerisine atıkların yerleştirilmesini kapsar. Atıkların saklandığı kapların geometrisi, malzemesi, jeolojik depo alanlarındaki kayacın bileşimi son derece önemlidir.

Kayaçların bileşimi termal olaylardan etkilenmektedir ve termal etkilere bağlı olarak kayaçta fiziksel ve mekanik etkiler meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan kayaçları oluşturan mineraller termal genişlemeye uğrar ve bunun sonucunda mikro çatlaklar, minerallerdeki kapanımlarının patlaması veya oksidasyon gibi kimyasal reaksiyonlar gelişebilir.

Granitoidler, nükleer atık depolama ve bertarafı için en uygun depolama alanları olarak kabul edilmektedir ancak termal özellikleri, polijenik bileşenleri, tane boyu, dağılımı vb. parametrelere göre farklılık gösterirler. Termal etkiler sonucunda kayaçlarda meydana gelen mikro çatlaklar ve kimyasal reaksiyonların doğru bir şekilde tespiti ve doğru bir şekilde yorumlanması son derece önemlidir.

Katkı Belirtme

Bu derlemeye katkı veren Nawaf Al-MURISH ve Fuat ERKÜL'e teşekkür ederim.

Kaynakça

- [1] Tiskatine, R., Eddemani, A., Gourdo, L., Abnay, B., Ihlal, A., Aharoune, A., Bouirden, L. 2016. Experimental evaluation of thermo-mechanical performances of candidate rocks for use in high temperature thermal storage. *ACS Appl. Eng. Mater. ACS.* 171, 243-255.
- [2] Rogers, K.A. 2009. Fire in the hole: A review of national spent nuclear fuel disposal policy. *Prog. Nucl. Energy* 51 (2), 281-289.
- [3] Plevová, E., Vaculikova, L., Kozusnikova, A., Ritz, M., Martynkova, G.S. 2016. Thermal expansion behaviour of granites. *J. Therm. Anal. Calorim.* 123 (2), 1555-1561.
- [4] Gautam, P.K., Dwivedi, R., Kumar, A., Kumar, A., Verma, A.K., Singh, K.H., Singh, T.N. 2021. Damage characteristics of jalore granitic rocks after thermal cycling effect for nuclear waste repository. *Rock Mech. and Rock Eng.* 54 (1), 235-254.

- [5] Wolf, J. 2011. Alamy. <https://www.alamy.com/stock-photo-stacks-of-yellow-barrels-stand-in-the-500-metre-deep-underground-nuclear-58108096.html>.
- [6] Patrick, W.C. 1986. Spent-Fuel Test-Climax: An evolution of the technical feasibility of geologic storage of spent nuclear fuel in granite. UCLR-53762. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California.
- [7] Ozharovsky, A. 2016. BELLONA. <https://bellona.org/news/nuclear-issues/radioactive-waste-and-spent-nuclear-fuel/2016-08-21710>.
- [8] Wang, L., Wu, Y., Huang, Z., Lin, J., Wang, Y. 2024. Effects of temperature and confining pressure on the permeability of Beishan granite from high-level radioactive waste disposal repository. *Case Stud. Therm. Eng.*
- [9] Tian, H., Mei, G., Jiang, G. S., Qin, Y. 2017. High-temperature influence on mechanical properties of diorite. *Rock Mech. Rock Eng.* 50 (6), 1661-1666.
- [10] Freire-Lista, D.M., Gomez-Villalba, L.S., Fort, R. 2015. Microcracking of granite feldspar during thermal artificial processes. *Periodico di mineralogia* 84 (3A).
- [11] Keshavarz, M., Pellet, F.L., Loret, B. 2010. Damage and changes in mechanical properties of a gabbro thermally loaded up to 1000 C. *Pure Appl. Geophys.* 167 (12), 1511-1523.
- [12] Vázquez, P., Shushakova, V., Gómez-Heras, M. 2015. Influence of mineralogy on granite decay induced by temperature increase: experimental observations and stress simulation. *Eng. Geol.* 189, 58-67.
- [13] Siegesmund, S., Sousa, L., Knell, C. 2018. Thermal expansion of granitoids. *Environ. Earth Sci.* 77 (2), 1-29.
- [14] Freire-Lista, D.M., Fort, R., Varas-Muriel, M.J. 2016. Thermal stress-induced microcracking in building granite. *Eng. Geol.* 206, 83-93.
- [15] Luque, A., Leiss, B., Alvarez-Lloret, P., Cultrone, G., Siegesmund, S., Sebastian, E., Cardell, C. 2011. Potential thermal expansion of calcitic and dolomitic marbles from Andalusia (Spain). *J. Appl. Crystallogr.* 44 (6), 1227-1237.
- [16] Shen, Y.J., Hou, X., Yuan, J.Q., Wang, S-F., Zhao, C. 2020. Thermal cracking characteristics of high-temperature granite suffering from different cooling shocks. *Int. J. Fract.* 225, 153-168.
- [17] Ni, X., Shen, X., Zhu, Z. 2019. Microscopic Characteristics of Fractured Sandstone after Cyclic Freezing-Thawing and Triaxial Unloading Tests. *Adv. Civ. Eng.* 2019, 6512461.
- [18] Kožušniková, A., Konecny, P., Plevova, E., Králová, I. 2017. Changes of Physical Properties of Silesian Granite Due to Heat Loading. *Procedia Eng.* 191, 426-433.
- [19] Yang, S. Q., Ranjith, P. G., Jing, H. W., Tian, W. L., Ju, Y. 2017. An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments. *Geothermics* 65, 180- 197.