

Piezoelektrik Teknoloji ve Piezo-Malzeme Olarak Turmalin

E.Y. Yazıcı, İ. Alp, A.O. Yılmaz & O. Celep
Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Böl., Trabzon

M. Vieil
Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Böl., Trabzon

ÖZET: Bu çalışmada turmalin grubu minerallerin özellikleri, kullanım alanları belirtilmiştir. Turmalin mineralleri sahip olduğu renklilik, estetik görünüm ve sertliği sayesinde aranılan süstaşlan arasında yer almaktadır. Turmalinin süstaş olarak kullanımının yanında piezoelektrik özelliği onu -kuvarstan sonra- stratejik açıdan önemli bir mineral yapmaktadır. Akıllı malzemeler arasında yer alan piezo-malzemeler radarlardan mikrofonlara kadar her alanda kullanılabilen önemli malzemelerdir. Ülkemizde bulunan turmalin yataklarının sadece süstaş olarak değil, piezoelektrik malzeme olarak değerlendirilebilirliği açısından ele almak gerekmektedir.

ABSTRACT: In this study, features of tourmaline group minerals and their usage fields are stated. It is demanded as a ornament stone because of tourmaline minerals' colorfulness, esthetic view and high hardness. Besides ornament stone, tourmaline is of strategical importance than quartz because of its piezoelectric property. This property makes tourmaline very important material which can be used in smart material technology.

1. GİRİŞ

Malzeme bilimlerinin tarihsel gelişimine bakıldığında yapısal malzemelerden fonksiyonel ve son olarak da akıllı malzemelere doğru bir gelişme görülmektedir. Yapısal malzemeler (örneğin; çelik, polikarbonat, tahta, demir, çimento vb.) mekanik kuvvet ve yük taşıma kapasitelerine göre tanımlanır. Fonksiyonel malzemeler ise sahip olduğu belirli fonksiyonlara göre teknolojik amaçla kullanılmaktadır (Çizelge 1) (URL-1 ; Ball, 2001).

Çizelge 1. Fonksiyonel malzemeler ve özellikleri.

Malzeme	Özellik
Kuvars, Turmalin	Piro-piezoelektrik
Bakır oksit	Fotoelektrik
Kadmiyum sülfid	Piezoelektrik
Germanyum	Foto-iletken

Akıllı malzemeler bir veya birden fazla özelliğe sahip malzemelerdir. Bu özellikler; Algılama, Aktüvatör ve Kontrol'dür. Algılama ve Aktüvatör özellikleri yapısal veya fonksiyonel bir malzemenin

yüzeyine monte edilmesiyle oluşur. Akıllı malzemeler; aktüvatör özelliği sayesinde yapay kaslarda, algılama özelliği sayesinde sinir ve hafıza görevinde, ve beyin gibi davranan bilgisayar ağlarında; genel olarak elektriksel, magnetik, termal enerji ve ışıkla ilgili alanlarda kullanılmaktadır (Ball, 2001). Çizelge 2'de bu alanlarda kullanılan akıllı malzemeler gösterilmektedir.

Çizelge 2. Çeşitli akıllı malzemeler (URL-1).

Malzeme	Kullanıldığı Alan
*Piezo-seramikler *Piezo-polimerler	Elektriksel
*Magnetostriktif alaşımlar	Magnetik
*Hibrid malzeme sistemleri *Polimerjeller	Termal enerji
*Polimerjeller • Fotomekanik malzemeler	Işık

Turmalin kristalleri piezoelektrik özelliğe sahip doğada bulunan nadir minerallerden birisidir. Bu özelliği sayesinde akıllı malzeme üretiminde kullanılmaktadır (URL-1).

"Piezoelektrik etki" kavramı ilk kez Fransız mineralog René Just Haüy (1817) tarafından anılmış (Piefort, 2001) ve 1880 yılında Jacques-Pierre Curie kardeşlerin bazı kristaller üzerinde (kuvars, turmalin, topaz, Rochelle tuzu vs.) yaptıkları çalışmalar sonucunda bilimsel olarak kanıtlanmıştır (Bottom, 2003). Piezoelektriklik; Kuvars (SiO_2), Turmalin, Lityum Sülfat, Kadmiyum sülfat, Çinko oksit (ZnO), Rochelle tuzu ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), Baryum titanat (BaTiO_3), Kurşun zirkonat titanat (PZT) gibi tek kristal polar eksenine sahip maddelerde görülür. Amonyum dihidrojen fosfat (ADP), Lityum fosfat (LP), Etilen diamin tartarat (EDT), Dipotasyum tartarat (DPT) gibi suni kristallerde daha az oranlarda olmakla beraber piezoelektrik kristal yapımında kullanılır. Teorik olarak simetri merkezi olmayan bütün maddelerin piezoelektrik olması gerekmektedir. Ancak pratikte, bu tür maddelerin çoğunda bu özellik zayıf niteliktedir (Alp, 1998). Turmalin ve diğer piezoelektrik özelliğe sahip kristallerin piezoelektrik ve dielektrik sabitleri Çizelge 3'te verilmiştir. Dielektrik sabitin büyüklüğü piezoelektrik özelliğinde güçlü olduğunu gösterir (TP-238, 2003).

Çizelge 3. Piezo-kristallerin piezoelektrik ve dielektrik sabitleri.

Kristal	Piezoelektrik sabit*	Dielektrik sabiti**
Rochelle tuzu, 30°C	d_{4+550}	350
	$d_{38} -54$	9.2
	d_{+12}	9.5
Kuvars	$d_{+2.3}$	4.5
	$d_{-0.7}$	4.5
ADP ¹	$d_{-1.5}$	56
	d_{+48}	15.5
KDP ^a	$d_{+1.3}$	42
	d_{+21}	21
	$d_{+3.6}$	6.3
Turmalin	$d_{-0.3}$	63
	$d_{+0.3}$	7.1
	$d_{+1.8}$	7.1
	$d_{-3.2}$	9
ZnS	$d_{-3.2}$	9
	d_{-34}	170
	d_{+86}	170
Baryum titanat (kristal)	d_{+392}	2900
	d_{-78}	1700
	d_{+190}	1700
Baryum titanat (seramik)	d_{+260}	1450

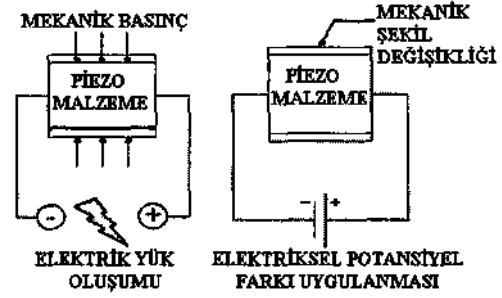
* mikromikro coulomb/newton

** "havaya göre

Amonyum dihidrojen fosfat

Potasyum dihidrojen fosfat

Piezoelektrik özellik gösteren bir malzemeye mekanik basınç uygulandığında malzemenin yüzeylerinde elektrik yüklerinin oluşmasına direkt piezoelektrik etki denir. Lippmann'ın (1881) direkt etki gösteren malzemenin ters etki göstermesi gerektiğini öne sürmesinden sonra ters piezoelektrik etki Cune kardeşler tarafından aynı yıl deneysel olarak ispatlanmıştır (Yazıcı, 2003). Şekil 1 'de direkt ve ters etki gösterilmektedir.



Şekil 1. (a) Direkt piezoelektrik etki, (b) Ters piezoelektrik etki.

Piezoelektrik malzemelerin kullanım alanları enerji dönüşüm yönüne göre 3 bölümde incelenebilir:

Mekanik Enerji •• Elektrik Enerjisi Dönüşümü

- > Pikap kartuşları
- > Mikrofonlar
- > Titreşim algılayıcıları
- > Hızölçerler
- > Gaz ateşleyiciler
- > Sigortalar

Elektrik Enerjisi •• Mekanik Enerji Dönüşümü

- > Valfler
- > Mikro pompalar
- > Kulaklıklar
- > Ultrasonik temizleyiciler
- > Sonik dönüştürücüler

Elektrik •• Mekanik •• Elektrik Enerjisi Dönüşümü

- > Yüzey akustik dalga ölçerler
- > Sonarlar (deniz araştırmalarında)
- > Osilatörler
- > Transformatörler

Büyük turmalin kristalleri sahip olduğu piezoelektrik sebebiyle basınç ölçen cihazların yapımında ve radyo dalgalarının yayılmasında frekans kontrolü amacıyla kullanılmaktadır (Çelik veKarakaya, 1998).

2. TURMALİN VE ÖZELLİKLERİ

Turmalin, farklı kimyasal özelliklere sahip bir grup karmaşık borosilikat mineralinin ortak adıdır. "Turmalin" adı Singalese dilinde - Sri Lanka (Seylan)'nın resmi dili - "renkli taş" anlamına gelen "turamali" kelimesinden türemiştir. Halkalı (siklo) silikatların üyesi olan turmalinin genel formülü kimyasal yapısının karmaşıklığı nedeniyle kesinleşmemiştir. Kabul gören genel formül aşağıda verilmiştir (1) (Viator, 2003):

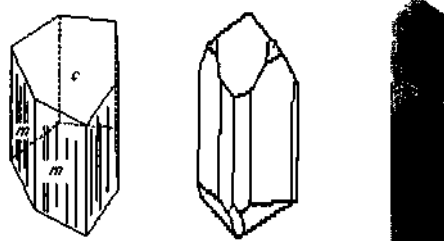


X, Y ve Z katyonik elementler: T ve W anyonik elementler içerir. Bu formülde;

- X: Başlıca Na^+ ; Ca^{2+} ve düşük miktarlarda K^+ ve boşluk
 Y: Li^+ , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Al^{3+} , Ti^{4+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} ve Zn^{2+}
 Z: Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , V^{3+} ; Mg^{2+} ve Fe^{2+} içerebilir
 T: OH^- ; düşük miktarlarda O^{2-}
 W: OH^- , O^{2-} , F

Turmalin romboedrik kristal sistemine dahildir ve kristalleri uzun prizmalar biçimindedir (Şekil 2). Simetri merkezi yoktur. Sertliği 7-7.5 (Mohs), özgül ağırlığı 2.98-3.20 g/cm³tür.

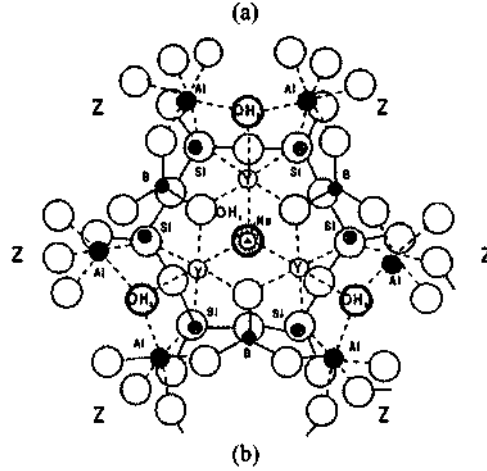
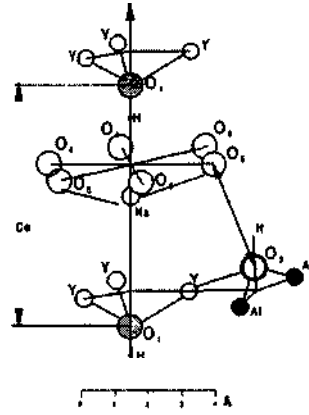
Turmalin grubundaki mineraller arasında; Şörlit/skorlit (Fe'lı turmalin, siyah), dravit (Mg'lu turmalin), elbait (Li'lu turmalin), rubellit(rubellite) (pembe renkli elbait), bürgerit, kromdravit, feruvit, foitit (foitite), indigolit (indikolite/indigolite) (Brezilya safiri, mavi), verdelit (verdelite) (Brezilya zümrütü, yeşil), olenit(olenite) ve uvit (uvite) sayılabilir. Bazı turmalinler ve formülleri Çizelge 4'de gösterilmiştir. Şekil 3'te turmalin struktur yapısı sunulmuştur.



Şekil 2. Turmalin formülleri (URL-2).

Çizelge 4. Bazı turmalin grubu mineraller ve formülleri.

Mineral	Formül
Elbait(elbait)	Na(Li,Al),Al,(BO ₃),Si ₆ O ₁₈ ,OH
DravU(dravite)	NaMg ₃ (Al,Fe),(BO ₃),Si ₆ O ₁₈ ,OH
Şörlit(schorl)	NaFe ₃ (Al,Fe),(BO ₃),Si ₆ O ₁₈ ,OH
Borjittbuergente)	NaFe ₃ AU(BO ₃),Si ₆ O ₁₈ ,OH
Liddikont(liddicoatite)	Ca(Li,Al),AWBO ₃ ,Si ₆ O ₁₈ ,OH
Uvit(uvite)	Ca(Mg,Fe),Al,Mg(BO ₃),Si ₆ O ₁₈ ,OH
Feruvit(feruvite)	(Ca,Na)(Fe,Mg,Tl)(Al,Fe) ₃ (BO ₃),Si ₆ O ₁₈ ,OH
Kromdravit(chromdravite)	NaMg ₃ Cr ₃ (BO ₃),Si ₆ O ₁₈ ,OH
Foitit(foitite)	Na(Fe,Al),Al,(BO ₃),Si ₆ O ₁₈ ,OH
Povendrait(povondrate)	NaFe ₃ Fe ₃ (BO ₃),Si ₆ O ₁₈ ,OH



Şekil 3. OH, X(Na^+), Y(Fe^{+2} veya Li^+ , Al^{+3}) katyonlarının pozisyonlarını gösteren turmalinin struktur görünüşü (a), turmalin strüktürünün ab düzlemi üzerine projeksiyonu (b) (Castaneda, 2000).

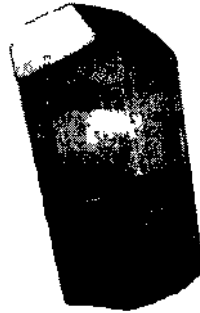
Turmalin HF' le temas ettiğinde alkali karbonat ve bisulfatlara ayrışır Lityum içeren turmalinler (elbat) erimeye karşı dayanıklıdır Bazı türleri pleokroizma gösterir (Çelik ve Karakaya, 1998) Turmalin kristalleri güçlü piroelektrik ve piezoelektrik özelliklere sahiptir Turmalin, genellikle granitik pegmatitlerde, pegmatitleri çevreleyen kayalarda, çeşitli şist ve gnays türlerinde bulunur Aşağıda turmalinin bulunduğu ortamlar belirtilmiştir (Çiftçi, 2003, Hurlbut, 1982)

- Plaser tutmalın yatakları
- Pegmatitlere bağlı turmalın yatakları
- Kuvars-turmalın sulfurlu damarlar
- Kalsiyum sülkatlı kayalarda (metamorfik) volframla birlikte oluşmuş tutmalın yatakları
- Knstalen masiflerdeki pegmatitler ve riftlere bağlı turmalın yatakları
- Sedimanter kayalar içinde ekselatif sulfitlere bağlı tutmalın yatakları
- Granitlere bağlı kalay yataklarında oluşmuş turmalınler
- Krom yatakları içinde bulunan turmalınler
- Oksidasyon ve ayrışma zonunda ikincil olarak zenginleşmiş turmalın yatakları

3. TURMALININ KULLANIM ALANLARI

3 1 Sus Tası Olarak Değerlendirilmesi

Bilinen 2700 mineral çeşidinden yaklaşık 100 tanesi kıymetli ve yarı kıymetli sustası olarak kullanılmaktadır (DPT, 2001) Sustaları içinde renk çeşitliliği yönünden diğerlerinden kolaylıkla ayırt edilebilen turmalinin saydam ve güzel renkli olanları yarı kıymetli sustası olarak mücevher endüstrisinde değerlendirilmektedir



Şekil 4 Rubellit (pembe turm) kristali (Afganistan)

Turmalinlerin renkleri genellikle siyah ve mavimsi siyah, renksiz, mavi, pembe, yeşil, şeffaf opak rengindedir Sustası olarak çok sayıda turmalın türü belirlenmiştir Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır,

- Siyah turmalınler
- İki uçlu siyah turmalınler
- Yarı şeffaf yeşil turmalınler
- Büyük kedi gozu yeşil turmalınler
- Yeşil turmalınler
- Siyahımsı yeşil (koyu yeşil) turmalınler
- Pembe turmalınler
- Koyu kırmızı turmalınler
- Pembe ve şeftali renkli turmalınler
- Karpuz yeşili şeffaf turmalınler
- Çok renkli turmalınler
- Zümrüt yeşili turmalınler
- Zümrüt yeşili ve pembe şeffaf turmalınler
- Yeşil-mavi-mor renkli turmalınler
- Mavi-yeşil ve mor(eflatun) renkli turmalınler
- Mavi-yeşil ve pembe renkli turmalınler
- Pembe ve yeşil ve renksiz turmalınler
- Yeşil ve pembe turmalınler
- Kırmızımsı pembe turmalınler
- Şeffaf yeşil ve pembe turmalınler
- Açık mavi pembe turmalınler
- Mavi-yeşil renkli turmalınler
- Pembe-yeşil ve siyah turmalınler
- Yeşil-mavi ve pembe turmalınler

3 2 Potansiyel Bor Minerali Kaynağı Olarak

Doğada bor elementi içeren yaklaşık 150 mineralden ticari değeri olanlardan bazıları, tınkal, kolemanit, kemit (razorit), uleksit, probertit, sasolit, myoit, hidroborasit, borasit, datolit, szarbalıte olarak sayılabilir Turmalın bor içeren silikat mineralleriyle birlikte pegmatit-pnematolitik devrede oluşur (Özkan ve ark , 1997)

Turmalın, borosilikat minerali olarak ağırlıkça ortalama %3 bor elementi içermesiyle potansiyel bir bor kaynağıdır fakat düşük bor tenoru ve turmalından bor elde etmek için gerekli prosesin zorluğu onu ekonomik yönden değersiz kılmaktadır (Smith, 2002)

3.3. Piroelektrik Teknolojide Kullanımı

Turmalin ısıya maruz kaldığında elektrik yükü üretir. Bu özelliği sayesinde 18 ve 19.yy'da bacalardan çıkan toz ve kül parçacıklarının temizlenmesinde kullanılmıştır. Bacadan çıkan ısı sayesinde turmalinin yüzeyinde elektrik yükü oluşmakta ve ince tanecikleri üzerinde toplamaktadır. Yeşil turmalin, turmalin kaması yapımında ve polarizasyon aletlerinin yapımında kullanılmaktadır (DPT, 2001).

3.4. Piezoelektrik Malzeme Olarak Değerlendirilmesi

Askeri uygulamalarda ve diğer birçok uygulamada kuvars kristalleri yüksek performans ve düşük maliyetlerinden dolayı tercih edilmektedir.

2001 yılında Kuzey Amerika piezoelektrik kristal ve cihazları piyasası 1,15 milyar dolardır. Yıllık %10' luk ortalama büyüme oranıyla 2006 yılında 1,86 milyar dolar olması beklenmektedir (Çizelge 5). Kuzey Amerika piezoelektrik kristal endüstrisi 150 kadar üretici ve ithalatçı şirketten oluşmaktadır. 2000 yılı toplam tüketimi 1,27 milyar dolar olarak tahmin edilmektedir. Bunun %47,2' si ithal ürünlerden oluşmaktadır. (Abraham, 2001)

Amerikan hükümeti kuvars dışındaki tek kristalli piezoelektrik malzemelerin geliştirilmesi için araştırma ve geliştirme projeleri yürütmektedir. Kablosuz iletişimin ortaya çıkmasıyla ve veri iletiminin kablolu iletişimdeki öneminin artmasıyla birlikte piezoelektrik kristaller ve kristal cihazlar piyasada hızla yükselmektedir. Kuvars kristaller ve kristal cihazlar için talebin yükselmesiyle Kuzey Amerika tüketimin yaklaşık %50' si başta Asya olmak üzere diğer ülkelerden ithal edilerek sağlanmıştır (Alp ve Ark., 2003).

Çizelge 5. Piezoelektrik kristal ve cihazlar için Kuzey Amerika piyasası(mil.dolar)(Abraham,2001).

	2001	2006	Yıllık büyüme (2001-06), %
Kuvars kristalleri	1,140	1,840	10,0
Kuvars dışı kris. (turmalin vs.)	13	20	9,0
Toplam	1,15	1,860	10,0

4. DÜNYADA VE TÜRKİYEDE TURMALİN KAYNAKLARI VE ÜRETİMİ

Turmalin rezervine sahip başlıca ülkeler arasında Afganistan, Brezilya, Madagaskar, Tanzanya yer almaktadır (Olson, 2001). Bunların dışında turmalin rezervine sahip diğer ülkeler; Elba Adası, Rusya (Urallar) , Birmanya, Sri Lanka, Sibirya; Meksika, A.B.D. (Maine, Connecticut, Newyork ve California), Nijerya ve Zambiya olarak sayılabilir.

4.1 Dünyada Üretim

2001'de en fazla satan renkli süstaşları sırasıyla; mavi safir, inci, tanzanit, yakut, zümrüt, ametist, yeşil turmalin, rodolit, garnet, süslü(fancy) safir, pembe turmalin(rubellit) ve mavi topaz' dır (Olson, 2001). Çizelge 6'da bazı ülkelerin yıllara göre turmalin üretimleri verilmiştir. Bu ülkelerde üretilen turmalin yarı-kıymetli taş olarak mücevhercilik endüstrisinde kullanılmaktadır.

Çizelge 6. Bazı ülkelerin turmalin üretimleri (ton).

	1998	1999	2000	2001
Brezilya¹	80	80	80	80
Madagaskar²	1,3	1,4	1,9	0,8
Zambiya³	-	2	2	2

¹Gurmedi, 2001; ²Yager, 2001; ³Coakley, 2001

4.2. Türkiye'deki Turmalin Kaynakları

Manisa'da Gördes-Demirci-Borlu ilçeleri arasındaki Kuzu ve Kovancı köyleri arasında pegmatoitik ortam ürünü olan şörl minerali bulunmuştur (Şekil 5).

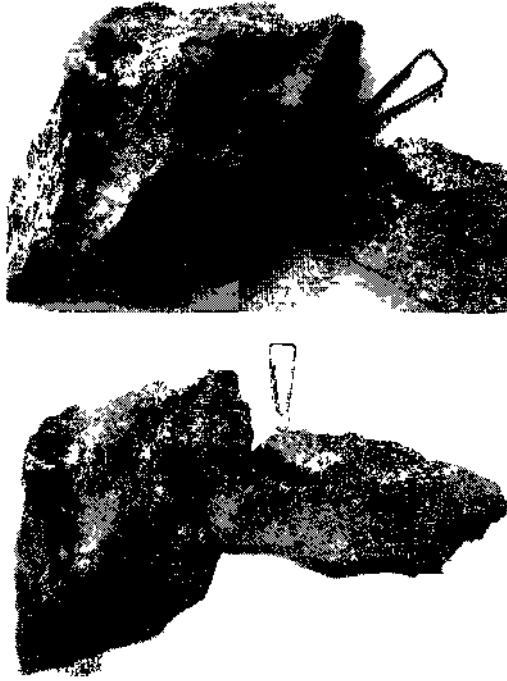


Şekil 5. Manisa-Demirci-Kuzuköy yöresinde bulunan siyah turmalinler.

Gnaıslar içerisinde m kristaller halinde bulunan şörl siyah renkte, opak görünümlü ve yapısı varil şeklinde dir (Hatıpoğlu ve Gökçen, 1999). Bunun dışında Yozgat-Doğankent-Orukiar köyü yakınlarında granit-aplit ve pegmatitlere bağlı olarak rubellit (pembe turmalin) zuhuru bulunmuştur (Bozkurt, 2003) fakat işletilebilir nitelikte değildir (DPT, 1996).

4 2 1 Doğu Karadeniz Bölgesi Turmalin Kaynakları

Doğu Karadeniz bölgesi jeolojik yönden volkanik ve plütonik kayaların zengin olduğu bir bölge olduğu kadar maden yatakları açısından da çok zengindir. Polimetalik yatakların araştırılması sırasında siyah turmalinlerin varlığı belirlenmiştir. Granitler içinde kuvarslarla birlikte oluşan turmalinler granit dokanaklarına yakın olarak şebınkarahisar-Asarcık' ta belirlenmiştir (şekil 6).



şekil 6. şebınkarahisar-Asarcık yöresi granitik kayaç içindeki siyah turmalinler.

İğne şeklinde ışınsal ve demet şeklinde siyah turmalin oluşumlarının gemolojik olarak çeşitli takılarda kullanılması dışünülmüştür. Buradaki turmalin iğneciklerinin kalınlığı 1-2 mm arasında değişmektedir. Bu nedenle piezoelektrik teknolojide kullanılması zor gözükmektedir.

Gümüşhane-Torul-Karadağ polimetalik cevherinde kuvars gangı ile bulunan turmalinler ince ve küçük özellikle olduğu için ancak kuvarsla birlikte gemolojik amaçla yapılan çalışmalarda kullanılabılır niteliktedir.

şimdiye kadar belirlenen turmalin yataklarının varlığı yörede yapılacak gemolojik incelemelerle yem turmalin yataklarının bulunma ihtimalini arttırmaktadır. Bölgenin jeolojik yapısı ve turmalin yataklarının bulunduğu ortamlar göz önüne alındığında Doğu Karadeniz bölgesinin turmalin açısından geniş bir potansiyele sahip olduğu söylenebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ülkemizdeki varlığı bilinen turmalin yataklarının türleri ve bu yataklardaki turmalinlerin özelliklerine göre kullanım alanları belirtilmiştir. Yapılacak yeni araştırmalarla yeni bulunacak turmalinlerin hangi amaçlarla kullanılabileceğine ışık tutulabilecektir. Genellikle sustası olarak kullanılan turmalin malzeme bilimleri açısında bakıldığında akıllı yapılarda kullanılabilecek önemli bir mineraldir.

Sahip olduğu piezoelektrik özelliği sayesinde mikrofon, hız ölçer vb. sık kullanılan alanlarda ve radar, tıbbi ultrason gibi daha teknolojik alanlarda kullanılmaktadır. Özellikle son zamanlarda ilerleyen malzeme bilimlerini inceleyerek akıllı yapıların hayatımızda daha fazla yer alacağını söyleyebiliriz. Ülkemizdeki turmalin kaynaklarının sadece süstaşı/yarı değerli sustası olarak değeril, akıllı malzeme olarak teknolojide nasıl kullanılabileceğimiz araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

Abraham, T., 2001, *Piezoelectric Crystals and Devices*, Business Communications Company, Inc., Norwalk.

- Alp, İ., 1998, Ultrases Dalgalarının Cevher Hazırlamada Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Osman Gazi Üniversitesi, FBE, Eskişehir.
- Alp, İ., Yazıcı, E.Y., Kaygusuz, A., Kolaylı, H., Vieil, M., 2003, *Kristal Kuvars ve Piezoelektrik Malzemelerinin Ekonomik Olarak Değerlendirilebilirliği*, I. Gemoloji Sempozyumu, 5-8 Mart, Ankara, Syf.30-34.
- Ball, P., 2001, *Materials Of The Future*, A chapter for the UNESCO Encyclopaedia of Life Support Systems, London, UK
- Bozkurt, R., *Türkiye'de Yarı Kıymetli Taşların Durumu*, Ekim 2003, Osmangazi Üniversitesi MMF Jeoloji Mühendisliği Bölümü, (www.turkishtime.org)
- Bottom, V. E., 2003, *A history of the Quartz Crystal Industry in the USA.*, Corning Frequency Co., Texas.
- Castafieda, C, Figueiredo, E. Oliveira, Gomes, N., Soares, A. C. P., 2000, *Infrared Study Of Oh Sites In Tourmaline From The Elbaite-Schorl Series*, American Mineralogist, Sayı 85, Syf. 1503-1507.
- Çelik, M., Karakaya, K., 1998, *Sistemik Mineraloji*, Syf. 69, Konya.
- Çiftçi, E., *Yer Bilimleri Teknik Bilimler Sözlüğü*, Syf.525, Niğde.
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1992, *An Introduction to Rock Forming Minerals*, Syf. 132.
- DPT, 2001, *Özel ihtisas komisyonu raporu endüstriyel hammaddeler alt komisyonu genel endüstri mineralleri III (nadir toprak elementleri kıymetli ve yarı kıymetli taşlar) çalışma grubu raporu*, Ankara.
- DPT, Mart 1996, *Madencilik Özel ihtisas Komisyonu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu: Diğer Endüstri Mineralleri Çalışma Grubu raporu. Kıymetli Ve Yarı Kıymetli Taşlar/Süs Taşları*, Ankara.
- Hatipoğlu, M., Gökçen, N., 1999, *Batı Anadolu'nun Yarı Kıymetli Süstaşlarının Başlıca Mineralojik, Jeolojik ve Ekonomik Nitelikleri*. Baksem-99 (1. Batı Anadolu Hammadde Kaynakları Sempozyumu, 8-14 Mart) Bildiriler Kitabı, Syf. 438-447. İzmir.
- Helvacı, C., Ekim 2003, *Türkiye Borat Yatakları: Jeolojik Konumu, Ekonomik Önemi ve Bor Politikası*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 35100 Bornova, İzmir, (www.jmo.org.tr)
- Hurlbut, C. S., 1982, *Mineraloji Cilt-IJ* (Çeviri: İnan, K., Tanyolu, E.), İstanbul, Syf. 161-162.
- Olson, D. W., 2001, *Gemstones*, U.S. Geological Survey Minerals Yearbook.
- Özkan, Ş. G., Çebi, H., Delice, S., Doğan, M., Ekim 1997, *Bor Minerallerinin Özellikleri ve Madenciligi*, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir.
- Piefort, V., 2001, *Finite Element Modelling of Piezoelectric Active Structures*, Doktora Tezi, Université Libre de Bruxelles, Syf. 1.
- Smith, R. A., *Basic Geology and Chemistry of Borate*, August 2002, U.S. Borax Inc., Valencia, Calif. American Ceramic Society Bulletin, Vol. 81, No. 8.
- TP-238, *Technical Publication -Piezoelectricity*, Ekim 2003, www.morgan-electroceramics.com.
- Viator, D. B., 2003, *Detrital Tourmaline as an Indicator of Provenance: A Chemical and Sedimentological Study of Modern Sands from the Black Hills, South Dakota*, Yüksek Lisans Tezi, Louisiana State University, Syf.8
- Yazıcı, E.Y., Alp, İ., Kaygusuz, A., Kolaylı, H., Vieil, M., 2003, *Piezoelectric Technology And Study Of Evaluation Of East Karadeniz Region Quartz Deposits*, Industrial Minerals and Building Stones(IMBS), Eylül 15-18, İstanbul, Syf. 775-781.
- URL-1: www.me.polyu.edu.hk/subject/me423/notes/chap_t23.pdf (11.01.2004)
- URL-2: www.members.aol.com/imichaelh (09.01.2004)