

Makalenin Geliş Tarihi : 01.12.2008  
Makalenin Kabul Tarihi : 12.06.2009

## **SUSURLUK (BALIKESİR) SKARN YATAĞININ MİNERALOJİK ve PETROGRAFİK ÖZELLİKLERİ**

Ayşe ORHAN<sup>1</sup>, Halim MUTLU<sup>2</sup>

**ÖZET:** Balıkesir doğusunda yer alan Susurluk skarn yatağı Oligo-Miyosen yaşlı Çataldağ Granitoyidi ile Mesozoyik kristalize kireçtaşı ve mermer dokanağı boyunca gelişmiş tipik bir skarn yatağıdır. Yatak ornatılan yan kayacın bileşimine göre kalsik karakterli olup endo ve ekzoskarn zonları içermektedir. Granitoyidin içerisinde ve kenar zonlarında dar alanlarda gelişen endoskarn zonu plajiyoklaz-piroksen minerallerinden oluşmaktadır. Ekzoskarn zonu ise granat-piroksen-vezüvyanit-vollastonit şeklinde genel bir zonlanma sunmaktadır. Ekzoskarn zonundaki granat ve piroksenler  $Grs_{23.38-91.16}And_{2.94-73.61}Prs_{0-11.9}$  ve  $Diy_{19.82-96.19}Hed_{2.72-79.14}Joh_{0-6.52}$  bileşimlerine sahiptir. Bölgedeki skarn oluşumu, granat ve piroksenlerin bileşimlerine göre tipik bir oksitlenmiş W skarn özelliği sunmaktadır. Skarn zonları dünyadaki diğer oksitlenmiş W skarnlar gibi wollastonitçe zengin ancak Cu hariç diğer metallerce fakir oluşumlar ile karakteristiktir. Bölgedeki W ve Cu cevherleri granitoyidin farklı kristallenme evrelerinde gelişmiştir. Susurluk skarn yatağında, granitoyidin sığ derinliklere doğru yükselerek devam eden kristalizasyonu retrograd evre ürünlerinin (epidot, amfibol, biyotit vs.) gelişmemesine neden olmuştur.

**ANAHTAR KELİMELER:** Susurluk skarn yatağı, endo ve ekzoskarn, granat, piroksen.

## **MINERALOGIC AND PETROGRAPHIC PROPERTIES OF THE SUSURLUK (BALIKESİR) SKARN DEPOSIT**

**ABSTRACT:** The Susurluk skarn deposit located at the east of Balıkesir region is a typical skarn deposit that is formed along the contact between Oligo-Miocene Çataldağ Granitoid and Mesozoic crystallized limestone and marble. The deposit wall rock has a calcic character and contains both endo and exoskarn zones. The endoskarn zone that develops in narrow areas within the granitoid and its margins consists of plagioclase-pyroxene minerals. The exoskarn zone shows a general zonation consisting of garnet-pyroxene-vesuvianite-wollastonite minerals. Compositions of garnet and pyroxene in the exoskarn zone are  $Grs_{23.38-91.16}And_{2.94-73.61}Prs_{0-11.9}$  and  $Diy_{19.82-96.19}Hed_{2.72-79.14}Joh_{0-6.52}$ , respectively. These compositions yield that skarn formation in the region is of a typical W skarn. Like others oxidized W skarns in the world, Susurluk skarns are wollastonite-rich but poor in most of metals except for Cu. W and Cu ores were developed during different crystallization stages of granitoid. Due to continuous rising and crystallization of the pluton, products of retrograde stage (e.g. epidote, hornblende, biotite) are absent.

**KEYWORDS:** Susurluk skarn deposit, endo and exoskarn, garnet, pyroxene.

<sup>1,2</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,  
Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Batı Meşelik Kampüsü, 26480, ESKİŞEHİR

## ***I. GİRİŞ***

Skarn olarak tanımlanan yataklar dünyada en yaygın gelişen cevherleşme tipi olup son yıllarda yapılan maden yatakları ve mineralojik çalışmaların başlıca konusu olmuştur. Skarnlar farklı renk ve bileşime sahip değişik mineral toplulukları ile karakteristiktirler. Birçok skarn yatağında, sokulum dokanağından itibaren proksimal granat, distal piroksen ve vezüvyanit (veya piroksenoid) şeklinde genel bir zonlanma gözlenir. Mineral bileşimindeki farklılıklar magmanın ve yan kayacın kompozisyonu, oluşum derinliği ve oksidasyon derecesine bağlıdır. Ekonomik skarn yatakları ise bölgesel veya kontakt metamorfizma esnasında magmatik, metamorfik ve meteorik kaynaklı akışkanların çeşitli metasomatik etkileşimleri sonucu oluşmuştur [1-5].

Skarn yataklarındaki mineral birliktelikleri ve dokuları mineralleşme süreçleri boyunca farklılık sunar. Prograd evreyi susuz ve yüksek sıcaklık mineralleri (granat ve piroksen) retrograd evreyi ise sulu ve düşük sıcaklık mineralleri (epidot, amfibol, klorit vs.) temsil eder. Sulu mineraller çoğunlukla sığ skarn sistemlerinde yapısal kontrollü olarak (kıvrıklar boyunca) prograd evreye ait granat ve piroksenler üzerine büyüyerek gelişir. Tek bir skarn sistemi için skarn mineralojisi ve sahip olduğu dokular mineralleşme süreçleri ile prograd-retrograd evrelerinin yorumlamasına ışık tutar [6]. Bir başka deyişle, kontakt metasomatizma esnasında etkili olan akışkan kompozisyonları skarnın mineralojisi, dokusu ve kimyasal bileşimi üzerinde önemli bir kontrol mekanizması oluşturur. Skarnın kökeni, evrimi ve cevher mineralinin ekonomikliğine yönelik yapılan araştırmalarda bu hususlar göz önüne alınmıştır [3-5].

Ülkemizdeki skarn yataklarının evrimi ve skarnla ilişkili cevherleşmelerin hangi evrede geliştiğini belirlemeye yönelik birçok çalışma yapılmıştır [7-12]. Bu çalışmalarda skarn zonları arasındaki ilişki mineralojik ve petrografik yönden incelenerek mineral kompozisyonları ile skarnın cevher tipi ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışmanın konusunu oluşturan Susurluk skarn yatağı (Şekil 1) ilk olarak Erdağ (1976) [13] tarafından incelenmiş ve “skarn mineralleşmeleri” ilk kez söz konusu araştırmada bahsedilmiş ve granitoid ile mermer kontakta gelişmiş diyopsit, granat, vezüvyanit ve vollastonit minerallerinin “tipik bir kontakt metasomatik” oluşum olduğu vurgulanmıştır. Yapılan petrografik incelemeler neticesinde skarn zonunda ayrıca forsterit, kuvars, tremolit, skapolit, biyotit, kalsit, plajiyoklaz gibi mineraller ile az ve küçük oluşumlar şeklinde molibdenit, şeelit, bornit, spekülait gibi cevher mineralleri tespit edilmiştir. Zonlu

granatlarda yapılan petrografik çalışmalarda ışık kırma indisine göre granatların çekirdek kısmının andradit, bantlara doğru ise grossuların zenginleştiği belirtilmiştir. Erdinç (1978) [14] ve Çakır ve Genç (1983) [15] ise skarn zonunda gelişmiş vollastonit zuhurlarının ön etüdünü yapmışlar ve bölgede 500.000 ton mümkün rezerv olduğunu ve 100 bin tonun üzerinde saf vollastonit üretimi yapıldığını belirtmişlerdir. Arık (1995) [16] Serçeören-Örenli bölgesindeki cevher oluşumlarını (vollastonit, talk, bakır, kurşun-çinko) petrografik olarak inceleyerek vollastonit yataklarını “vollastonit damarları” ve “grossularca zengin kayalar” şeklinde iki grupta toplamıştır. Aynı araştırmacı skarn zonunda [13]’e benzer mineral birlikleri tespit etmiştir. İnceleme alanındaki skarn zonunun “siyenitik bir plütonun, muhtemelen silisli dolomitik kireçtaşları ve/veya Al içeren silisli kireçtaşları üzerine etkisi ile” vollastonit damarlarının ise “siyenitik, monzonitik damarların mermerlerle etkileşimi” neticesinde oluştuğu belirtilmiştir. Ergül ve diğ. (1980) [17], Ergül ve diğ. (1986) [18] ve Akyüz (1995) [19] ise sadece genel jeoloji amaçlı araştırmalar yapmışlardır.

Bu çalışmada granitoyid kontağından itibaren gelişmiş skarn zonları, minerallerin bolluk dereceleri ve dokusal özelliklerine göre tanımlanmıştır. Granat ve piroksenlerde yapılan mikroprob çalışmaları ile skarnın tipi ve oluşum koşulları belirlenmiştir. Ayrıca farklı mineral zonlarında gelişmiş granat ve piroksenlerin kimyasal kompozisyonları esas alınarak akışkan bileşimindeki değişimler değerlendirilmiş skarnın evrimi ve cevher minerallerinin hangi evrelerde geliştiği tespit edilmiştir.

## **II. GENEL JEOLojİ**

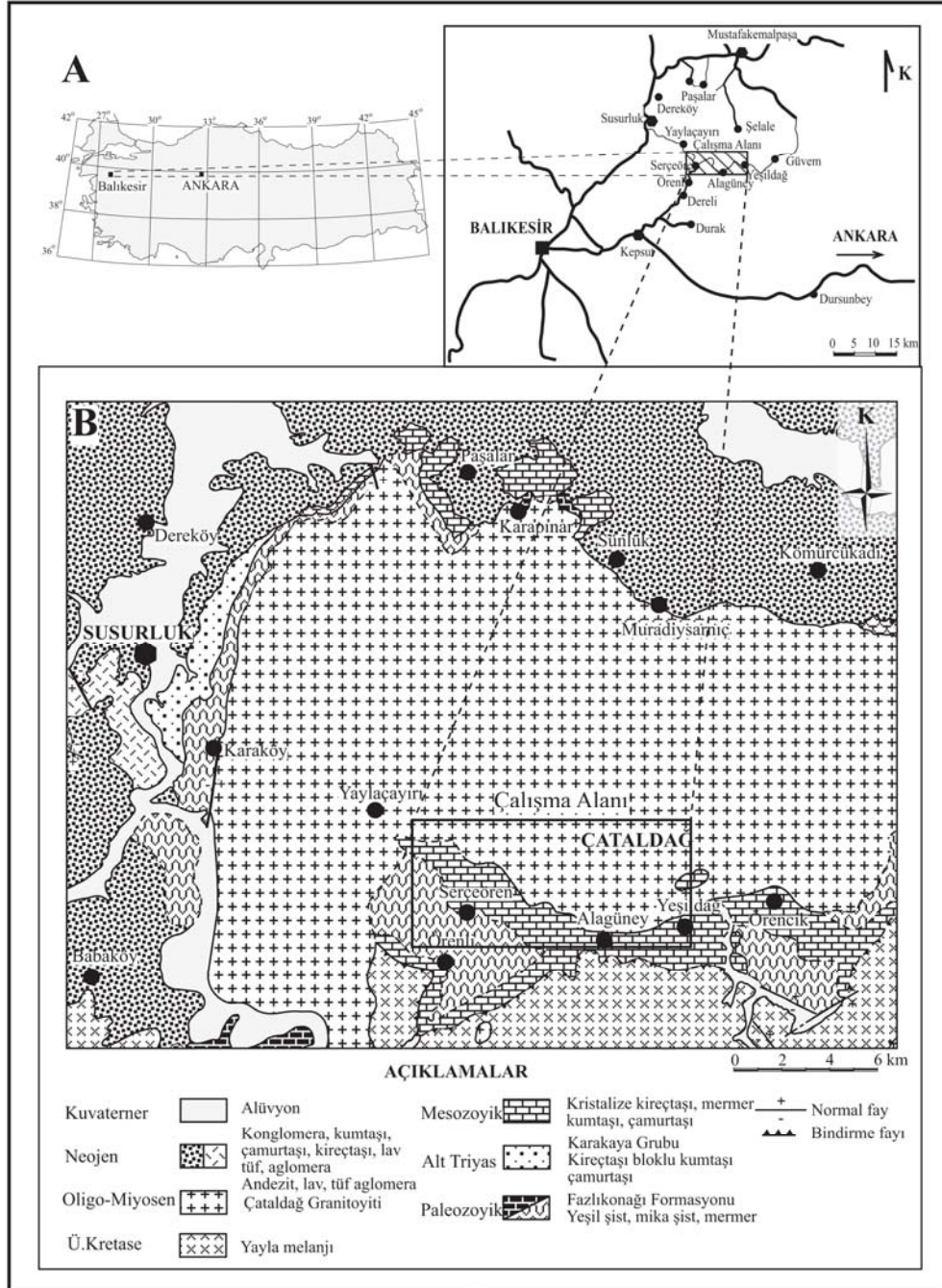
İnceleme alanında Paleozoyik yaşlı Fazlıkonağı Formasyonu, Mesozoyik yaşlı kristalize kireçtaşı ve mermer ile bu birimleri kesen Oligo-Miyosen yaşlı Çataldağ Granitoyidi yüzylemektedir (Şekil 1.b). İnceleme alanının temelini oluşturan Fazlıkonağı Formasyonu, alaca renkli şistler ve bunlar içerisinde yer yer mercek ve bant şeklindeki mermerlerden oluşmaktadır [17-19]. Birim Susurluk’un doğusunda Dereköy-Paşalar arası ile Örenli köyü çevresinde geniş yayılım sunarken, Serçeören köyü ile Alagüney ile Yeşildağ köyleri arasında ise dar bir alanda gözlenir. Çataldağ Granitoyidi şistlerin çatlak ve yapraklanma düzlemleri boyunca intrüzyon yapmış ve yer yer apilit ve pegmatit damarları ile kesmiştir. Petrografik

çalışmalar neticesinde birimin amfibolşist, mikaşist, kuvars-mikaşist, mikaşist ve talkşistten oluştuğu belirlenmiştir. Akyüz (1995) [19] mineralojik, petrografik ve elektron mikroprob çalışmaları sonucunda, metamorfizmanın 4-6 kbar ve 425-500°C'de yeşilşist fasiyesinde gerçekleştiğini belirlemiştir.

Bütünüyle karbonatlı birimlerden oluşan kristalize kireçtaşı ve mermerler, beyaz-gri rengi, şeker dokusu ve laminalı yapısı ile karakteristiktir. Birim Serçeören, Alagüney ve Yeşildağ köylerinin bulunduğu alanda yaygın olarak izlenirken Dereköy-Paşalar arasında seyrek mostralara gösterir. Skarn zonu özellikle Serçeören köyünün kuzeyinde karbonatlı kayaların Çataldağ Granitoyidi ile olan dokanaklarında oluşmuştur. Birime ait kalsit kristalleri aplit-granit dokanaklarında küçük taneli iken granit kontağında irileşmektedir.

Kuzeybatı Anadolu'da post tektonik (Alpin) olaylar sonucu gelişen magmatik intrüzyonlardan biri olan Çataldağ Granitoyidi genellikle hololökrat ve lökokrat karakterdedir [13-20]. Susurluk doğusunda yaklaşık 450 km<sup>2</sup>'lik geniş bir alan kaplayan granitoid bir dizi apofiz, dayk ve sillerden oluşmaktadır. Çataldağ Granitoyidi genellikle yaşlı birimlerin tabaka ve şistozite düzlemlerine uyumlu olarak sokulum yapmıştır. Granitoidin şistlerle olan dokanağında gelişen muskovit + margarit + siderofillit + andaluzit birlikteliği 3,5 kbar'dan düşük basınç ve 550-650°C civarında sıcaklık koşullarına işaret emektedir [19]. Peraluminyum-metaluminyum, kalk-alkalen karakterinde olan sokulumun yaşı K-Ar metodu ile 21,2±0.6 – 25,9±0.5 Ma arasında bulunmuştur (Oligosen-Miyosen) [21].

Birim çekirdekte kaba taneli holokristalin dokuda iken kenar fasiyeslere doğru porfirik doku özellik kazanır. Dokanıklara doğru belirgin bir yapraklanma ve yönlenme gösteren plüton çok sayıda kuvars damarı tarafından kesilmiştir. Skarn kontağına doğru feldspat ile biyotitlerde aşırı irileşme ve kataklazma izleri gözlenir. Çataldağ Granitoidinde dokusal özellikler ile birlikte farklı mineralojik değişimlerin de olduğu belirlenmiştir. Çekirdek kısmı kuvars, plajiyoklaz, K-feldspat ve hornblend, biyotit ± piroksen ± apatit ± sfen ± turmalin ± opak minerallerinden oluşmaktadır. Porfirik



Şekil 1.(a) İnceleme alanının yer bulduru ve

(b) Genel jeoloji haritaları (Ergül ve diğ., 1986 [18]'den alınmıştır).

dokudaki granitoyitte hornblendle yer değiştiren biyotitin kenar fasiyeslerde hakim mineral olduğu göze çarpar. Biyotit granit özelliğindeki kenar fasiyeslerde bazı örneklerin muskovit içerdiği de gözlenmiştir. Mineral bolluk derecesi ve jeokimyasal sınıflamalara göre granit ve granodiyorit arasında bileşim sergileyen [13,18-22] sokulumun granit-siyenogranit türünde olduğu da belirtilmiştir [14,17-20]. Skarn kantağına doğru biyotit ve feldspatların aşırı irileştiği, kataklastik dokuların gözlendiği zonlarda bazı örneklerin metasomatik etkileşimlerle mineral bileşimlerinin de değiştiği fark edilir. Bu zonlarda kuvars bolluğunun düştüğü, feldspat oranının ise arttığı ve epidot, piroksen, kalsit gibi diğer ikincil mineraller ile kloritleşme ve serisitleşmenin geliştiği tespit edilmiştir. Çataldağ Granitoyidi'nin bu zonlarda siyenit, monzonit ve tonalit bileşimlerini sergilediği belirlenmiştir [22]. Skarn zonunda ise granitoid ve skarn zonunu kesen damarlara ait bazı örneklerde apatitler irileşmiş ve bazılarında ise kalsit özümlemeleri yoğun bir şekilde gelişmiştir.

### **III. MATERYAL VE YÖNTEM**

Örnekleme skarn cevherleşmelerinin gözlendiği Serçeören köyünün kuzeyindeki Oyuktepe, Kocaçakıl Tepe ve Naldöken Sırtı civarında vollastonit işletmesi için açılmış yarmalardan ve yakın çevresinden mineralojik ve monomineralik değişimlere göre yapılmıştır. Mineral zonları minerallerin bolluk dereceleri ve dokusal özellikleri esas alınarak tanımlanmıştır. Ayrıca, granat ve piroksenlerin kimyasal kompozisyonları Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümündeki Zeiss Evo 50 EP taramalı elektron mikroskobu üzerinde entegre Bruker Axs XFlash 3001 SDD (Silicon Drift Detector) EDS sistemiyle analiz edilmiştir.

### **IV. SKARN ZONLARI ve SKARN MİNERALOGİSİ**

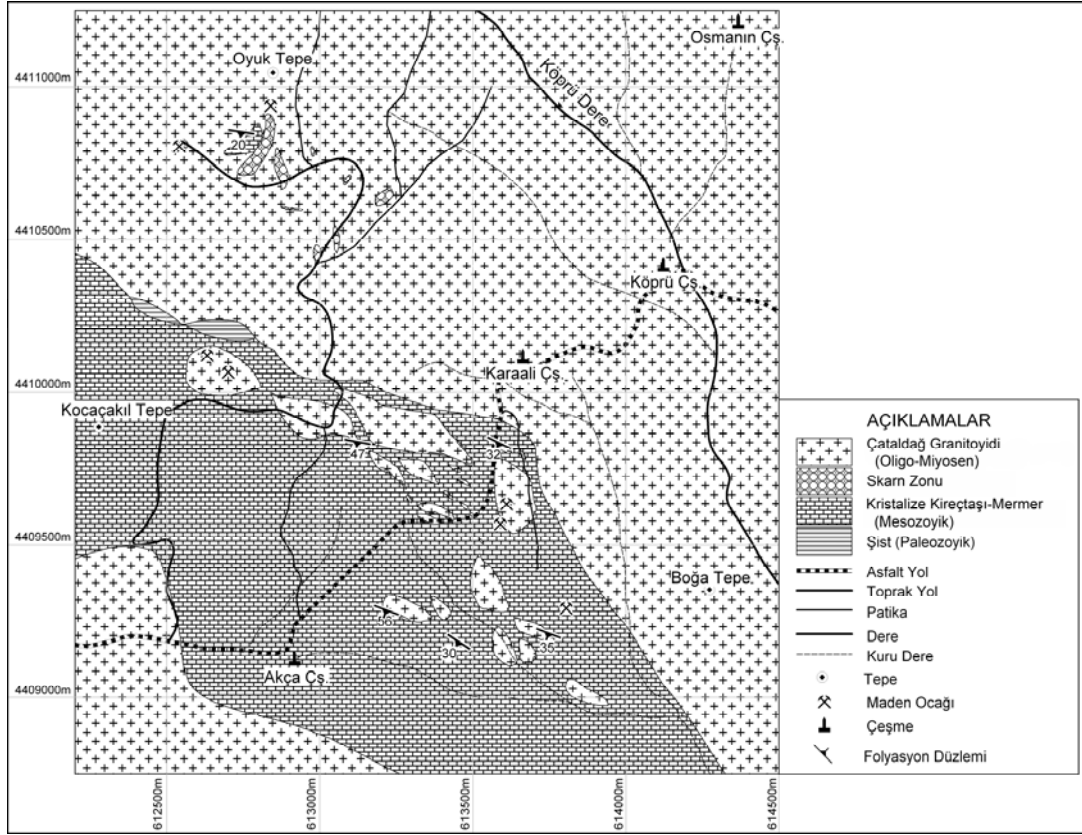
Skarn oluşumları, intrüzif kayacın dokanağından itibaren akışkan bileşimindeki değişimler, metasomatik reaksiyonlar, sıcaklık değişimleri ve akışkan infiltrasyonuna bağlı olarak büyük veya küçük ölçekli mineralojik zonlanmalar şeklinde gelişir [3-5]. Skarnın kökeni ve evrimine yönelik yapılan çalışmalar, arazide skarn zonlarının tespit edilmesi, renk ve kompozisyon değişimlerine göre mineral geçişlerinin belirlenmesi ile başlar. Skarn zonları magmatik ve

sedimanter kayaca olan dokanağına göre endo ve ekzoskarn zonları şeklinde tanımlanır. Endoskarn zonu sokulum kayacının içinde ve dokanağında yer alır. Ekzoskarn zonu ise karbonatlı kayacın içinde, dokanağında veya karbonatlı birimin gözlenmediği durumlarda magmatik kayacın içinde bulunur. Karbonatlı kayacın bileşimine bağlı olarak, skarn mineralleri magnezyumlu ve kalsik skarnlar şeklinde sınıflandırılır [1-5]. Skarn zonları ve mineral birlikteliklerinin belirlenmesi, mineraller arası geçişlerin ve skarn evrelerinin (prograd ve retrograd evre) ne şekilde geliştiğinin ortaya konmasında oldukça yararlıdır. Magmanın sokulumu ve kristalizasyon süreçlerinde gelişen prograd evre, susuz ve yüksek sıcaklık mineralleri (örneğin, granat, piroksen) ile temsil edilir. Magmanın soğuma süreci ile ilişkili gelişen retrograd evrede ise epidot, amfibol, klorit gibi sulu mineraller gözlenir. Retrograd evre ürünleri genellikle sığ skarn sistemlerinde ve yapısal kontrollü olarak (kırıklar boyunca) prograd evreye ait granat ve piroksenler üzerinde büyüyerek gelişir [1-5].

Bölgedeki skarn mineralleşmeleri Serçeören köyünün kuzeyinden doğusuna doğru yaklaşık 250-800 m genişlikteki bir zonda düzensiz oluşumlar şeklinde (şekil 2). Oyuk Tepe'nin güneyindeki skarn oluşumları granit ile çevrelenmiş mermer çıkıntıları arasında oluşurken, Serçeören'in doğusunda ise Kocaçakıl Tepe, Naldöken Sırtı ve Boğa Tepe civarında mermer içerisine sokulmuş granit intrüzyonları arasında gelişmiştir. Serçeören kuzeyindeki bazı alanlarda, granitin mermerlere sokulum yapması mermerlerin granitleri örtüyormuş gibi görünmelerine neden olmuştur. Mermerlerin granitoyid içinde tavan blokları şeklinde gözlenmesi bu kayaçların magmatik stoplama ya da asılı blok olarak granit içine alındığını göstermektedir. Dolayısıyla haritalanamayacak ölçekte mermer bloklarının kırık ve yapraklanma düzlemleri boyunca 50 cm-5 m kalınlığında skarn oluşumları gelişmiştir. Oyuk Tepe, Kocaçakıl Tepe, Naldöken Sırtı ve Boğa Tepe civarlarında önceki yıllarda işletilmiş vollastonit ve bakır ocaklarında açılmış yarmalarda skarn zonunun kalınlığı 50 m'ye ulaşmaktadır.

Skarnlaşma, granit-mermer dokanağı boyunca veya granit ve mermerler içerisinde damarlar şeklinde endo ve/veya ekzoskarn zonları şeklinde gelişmiştir. Genel olarak granit-endoskarn-ekzoskarn-mermer şeklinde bir zonlanma gözlenir. Granitoyid ile skarn arasındaki dokanaklar keskin olup endo ve ekzoskarn zonları renk, doku, mineral bileşimleri ile arazide ayırt edilebilir özelliktedir. Granitin kenar zonlarında veya içerisinde merccek veya ince damarlar şeklinde dar

alanlarda gelişen endoskarn zonları esas olarak piroksenden oluşmaktadır (Şekil 3A). Zon genellikle masif ve ondüleli yapıda olup piroksenler koyu yeşil renkleri ile dikkat çekmektedir. Ekzoskarn zonu ise



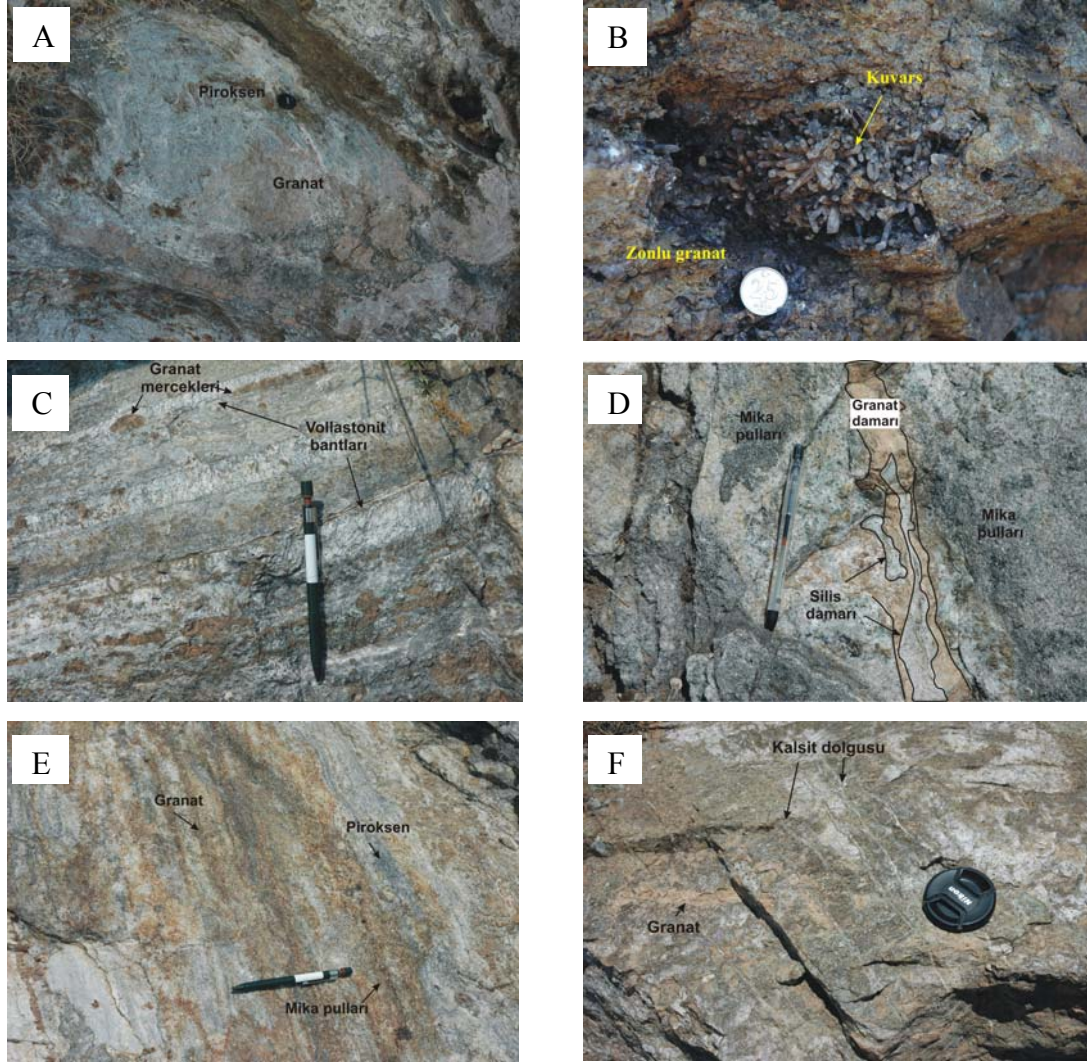
Şekil 2. Serçeören bölgesinin skarn zon haritası.

granit içerisinde endoskarn zonunu takip eden oluşumlar veya mono mineralik zonlanmalar (Şekil 3B; C) ve damarlar, mermer içerisinde damar ve merccekler (Şekil 3D) ve mermerin tabaka düzlemlerine uyumlu bantlar halindedir (Şekil 3E). Benzer mineralleşmelerin geliştiği bu oluşumlarda granat-piroksen-vezüvyanit-vollastonit şeklinde genel bir zonlanma gözlenir. Mermer kantağına doğru rengi soluklaşan granat ve piroksenlerin boşluk ve çatlakları kalsit ile kuvars tarafından doldurulmuştur (Şekil 3D, F). Mermer dokanağında ise sadece mika pulları gelişmiştir (Şekil 3E).



#### IV.I. Endoskarn Mineralojisi

Granit içinde veya kenar zonlarında gelişmiş endoskarn zonu *plajiyoklaz-piroksen zonundan* oluşmaktadır. Bu zonda plajiyoklaz ve piroksene ortoklaz, kuvars ve sfen eşlik etmektedir. Mikroprob çalışmalarına göre hedenberjit bileşimindeki klinopiroksenler yeşil renkte ve yüksek girişim renklerinde gözlenir. Plajiyoklazlar yüksek anortit oranına sahip olup sönme açlarına



**Şekil 3.** A. Endoskarn (A) ve ekzoskarn (B,C,D,E,F) zonlarının arazi görüntüleri.

(A) Granit kantağında gelişmiş endoskarn zonu, (B) zonlu granat ve boşluklarındaki kuvars kristalleri, (C) vollastonit bant ve granat mercekleri, (D) mermer içerisinde damar şeklinde gelişmiş granat ve silis dolguları, (E) mermer içerisinde gelişmiş bantlı yapıdaki skarn mineralleri, (F) skarnlaşmadaki kalsit çatlak dolguları.

göre labrador-bitovnit bileşimindedir. Skarn zonlarında yaygın tali bileşen olarak gözlenen sfen yüksek rölyef ve girişim rengi ile göze çarpar. Dikkati çeken diğer bir özellik de bazı örneklerde ikincil çatlakların gelişmesi ve bunların kuvars tarafından doldurulmuş olmasıdır.

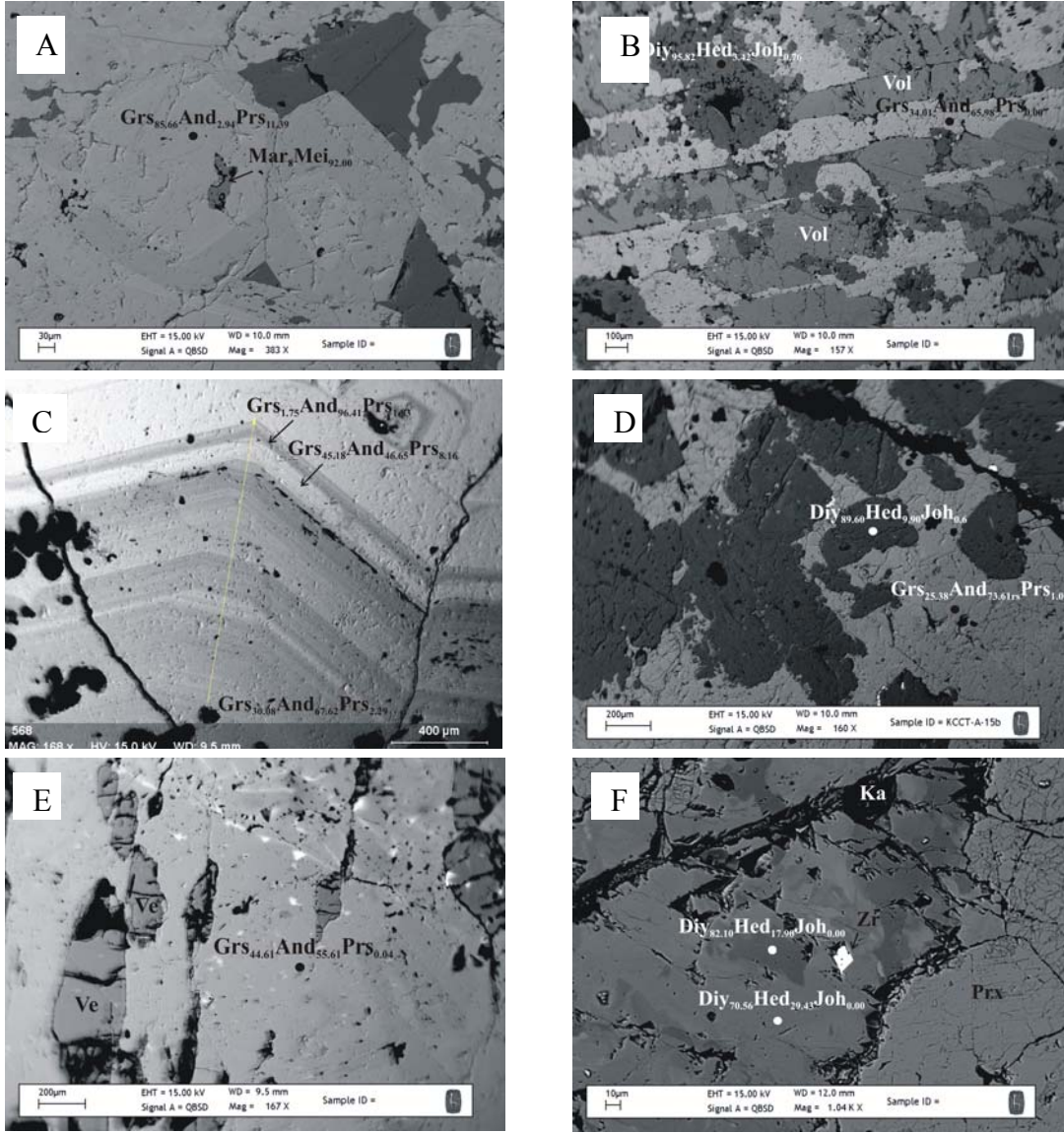
#### ***IV.II. Ekzoskarn Mineralojisi***

Ekzoskarn zonu, endoskarn dan veya granitoyitten itibaren mermere doğru farklı renk ve mineral birlikleri sunmaktadır. Endoskarn dokanağında itibaren granatlar görülmeye başlar. İnce oluşum ve damarcıklar şeklinde gelişen zon mineral bolluk derecesine göre *piroksen-granat zonu* olarak adlandırılmıştır. Bu zonda granatlar içerisinde piroksen ve bazı örneklerde çok az miktarlarda vezüvyanit, skapolit (menionit) mineralleri kapanımlar halinde gözlenir (Şekil 4A). Vezüvyanit röllyefi granat ile aynıdır, ancak izotrop özellikte olan granattan zeytin yeşili girişim rengi, tek optik eksen ve pozitif optik işareti ile ayırt edilir. Granatlar genellikle özşekilsiz-yarı özşekli küçük taneler halindedir. Piroksenlerin giderek yaygınlaşmaya başladığı *granat-piroksen zonunda* ise ince çatlakların vollastonit tarafından doldurulduğu göze çarpmaktadır. Kuvars, sfen ve kalsitin gözlendiği bu zonda bazı el örnekleri Ultraviyole Floresans Lambası (UF) altında saçınımlı olarak çivit mavisi renkte ışımaya göstermişlerdir ve bu da şeelitin varlığına işaret etmektedir. Mikroprob verileri bu zonlara ait granat ve piroksenlerin baskın olarak grossular ve hedenberjit bileşiminde olduğunu göstermiştir.

Endoskarn veya granit kontağında gözlenen *vollastonit-piroksen-granat zonu* vollastonitin beyaz-krem rengi ve lifsi yapısı ile kolayca ayırt edilir. Bu zonda piroksen renginin koyu tonlardan açık yeşil tonlara geçtiği gözlenmiştir. Vollastonit bolluğunun piroksen ve granattan daha az olduğu, granatlar içerisinde kapanımlar ve granatların kenar kısımlarında piroksenlerle birliktelik oluşturduğu saptanmıştır. Vollastonitler yüksek rölyefleri, düşük girişim renkleri ve yapraksı görünümüleriyle kolayca tanınır. Granatlar baskın olarak andradit, piroksenler ise diyopsit bileşimindedir (Şekil 4B). Ayrıca kuvars ile az miktarda vezüvyanit, kalsit ve sfen de tespit edilmiştir.

Ekzoskarn zonunda granitoyit dokanağında mono mineralik oluşumlar halinde maksimum 3 cm boyutunda zonlu granatlar gelişmiştir (Şekil 3B). Yeşil ve kahve renklerde gözlenen bu granatların boşlukları kuvars kristalleri ile doldurulmuştur. Kocaçakıl Tepe civarında ise, vollastonit içeren zonlar üzerinde granatlar ince damarlar şeklinde gelişmiştir. *Granat mineral*

zonu olarak adlandırılan bu zonda granatların çekirdek kısmı daha koyu renkte dış kısımları ise açık-koyu bantlar halindedir (Şekil4C). Genellikle özşekli olarak gözlenen granatların çekirdek ve kenarları boyunca az miktarda kloritleşme gelişmiştir. Bazı granatlarda çatlakların



Şekil 4. Ekzoskarn zonlarının SEM görüntüleri ve mineral bileşimleri.

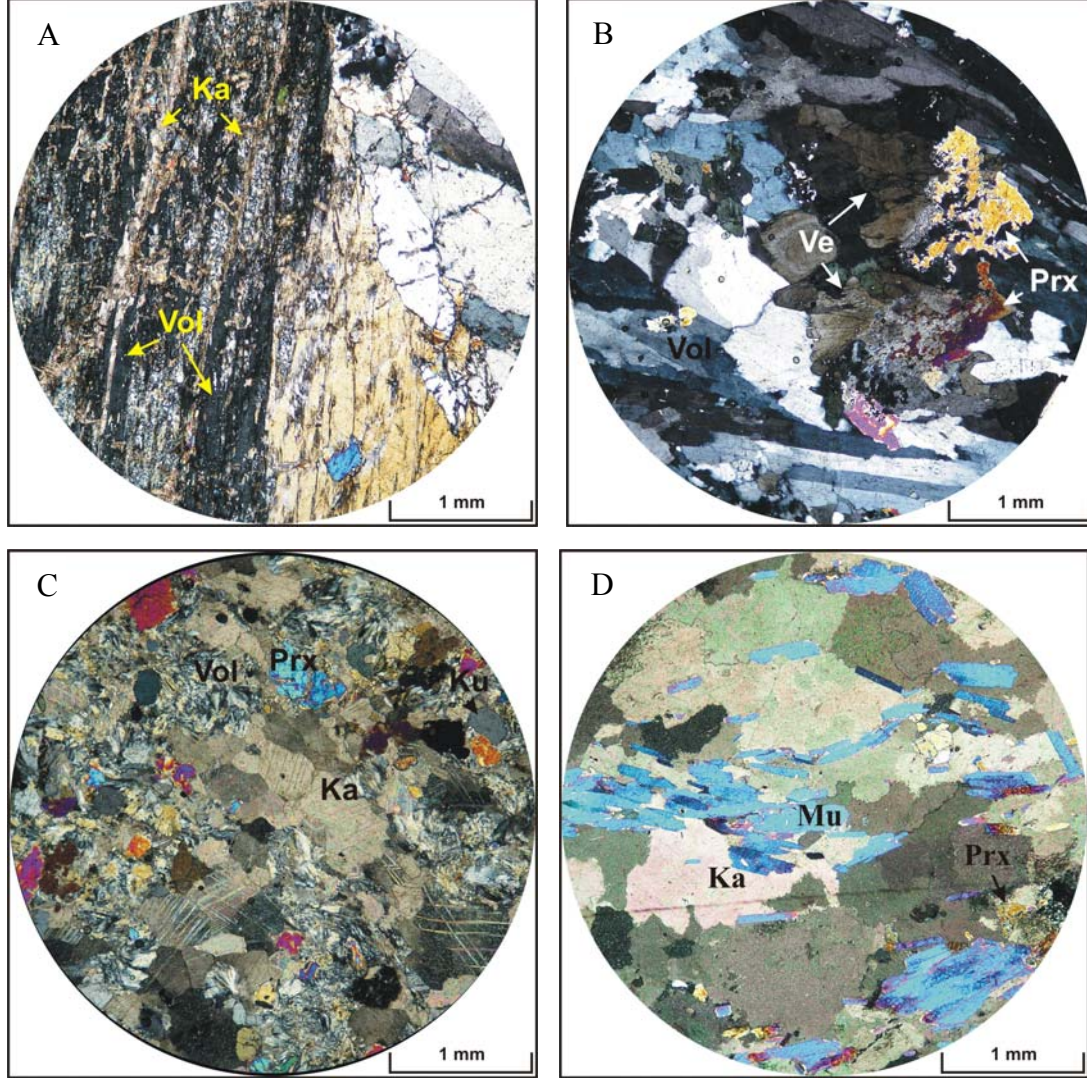
(A) piroksen-granat skarna ait granatlar, (B) wollastonit-piroksen-granat skarn, (C) granat skarna ait zonlu granat, (D) piroksen-granat skarn, (E) vezüvyanit-granat skarn, (F) granat-piroksen-wollastonit skarna ait piroksenler (Grs; grossular, And; andradit, Prs; pirlalpit; Diy; diyopsit, Hed; hedenberjit, Joh; johansenit, Vol; wollastonit, Prx; piroksen; Ve; vezüvyanit, Ka; kalsit, Zr; zirkon).

işletildiği Kocaçakıl Tepe civarında ise, zonlu granatların bantlarında kalkopirit belirlenmiştir. Zonlu granatlardan itibaren granat tanelerinin küçüldüğü ve piroksenlerin eşlik ettiği *granat-piroksen zonuna* geçilir. Granatlar özşekilli-yarı özşekilli, zonlu ve/veya zonsuz özelliktedir. Endoskarn dokanağındaki piroksen-granat skarndan petrografik olarak farklılık sunan bu zonda, piroksenler granatları çekirdekten bantlara doğru ornatın mineral olarak gözlenir. Ayrıca bu zondaki granatlarda az miktarda vezüvyanite de rastlanmıştır. Ornatım alanlarında kloritleşme ve karbonatlaşma gibi alterasyon ürünleri gelişmiştir. Granatların arasındaki boşluklar ise kuvars tarafından doldurulmuştur. Mikroprob çalışmalarında bu mineral zonundaki granatların baskın olarak andradit, piroksenlerin ise diyopsit bileşiminde olduğu belirlenmiştir (Şekil 4D).

*Piroksen-granat-piroksen zonundan* itibaren granatların renk tonu hafifçe açılmaktadır. *Vezüvyanit-granat zonu* olarak adlandırılan bu zonda granatlar kahve-sütlü kahve renk tonlarındadır. Petrografik çalışmalarda granatlara vezüvyanit ve az miktarda piroksenin eşlik ettiği belirlenmiştir. Granatlar yarı özşekilli taneler halindedir. Granat çatlakları silika ile doldurulmuş olup alterasyon ürünü olarak kloritleşme ve karbonatlaşma gelişmiştir. Vezüvyanitler granat içerisinde kapanım şeklinde görülür. Genellikle yelpaze biçiminde ve özşekilsiz taneler halindedir. Özşekilsiz taneler zeytin yeşili girişim renklerinde gözlenirken yelpaze biçiminde olanlar ise bol çatlaklı olup piroksen kalıntıları barındırırlar. Vezüvyanit muhtemelen piroksenlerin bozunması ile oluşmuş ve bu sırada kloritleşme gelişmiştir. Özellikle Kocaçakıltepe civarında bu zon üzerinde mercekler şeklinde oluşmuş bakır mineralleşmeleri (kalkopirit, bornit, kalkozin) gözlenir. Mikroprob çalışmalarına göre *vezüvyanit-granat zonunda* granatlar baskın olarak andradit bileşimindedir (Şekil 4E).

Granatların giderek azalması ile vollastonit bolluğu artmıştır. Genellikle damar oluşumları şeklinde gözlenen vollastonitin baskın olduğu bu zonlar *granat-piroksen-vollastonit* ve *piroksen-vollastonit zonları* olarak adlandırılmıştır. Bu zondaki granatlar yarı özşekilli – özşekilsiz taneler halinde olup az miktarda yelpaze biçimli vezüvyanit ile skapolit kapanımları da gözlenir. Genellikle iri yelpazeler şeklinde gözlenen vollastonite piroksen eşlik etmektedir. Bu zonlarda farklı renk tonlarında dalgalı şekillerde gözlenen piroksenler diyopsit bileşimine sahiptir (Şekil 4F). Bileşimsel olarak da farklılık sunan piroksenlerin açık ve koyu renk tonlarında hedenberjit ile diyopsit bileşimlerinin değiştiği fark edilir. Bu zonlara ait örnekler nadir olarak kalsit ve az miktarda kuvars içermektedir. Oyuk Tepe ve Naldöken Sırtı

civarlarında, mermer içerisinde damarlar boyunca ve dokanağına yakın zonlarda gelişen vollastonitçe zengin skarnlar bol miktarda kalsit barındırmaktadır (Şekil 5A). Bu alanlardaki zonlarda kalsit vollastonitin yaprak ve çatlakları arasında özümleyici mineral görünümündedir. Ayrıca,



**Şekil 5.** Mermer içerisinde ve kontağında gelişmiş ekzoskarn zonlarında

(A) Piroksen-vollastonit skarna ait vollastonit ve kalsitin, (B) granat-vezüvyanit-piroksen-vollastonit skarna ait vezüvyanit, (C), (D) mermer skarnın mikroskobik görüntüleri.

bu zonlardaki diğer skarn minerallerinde de dokusal özellikler ve bolluk derecelerinde belirgin değişiklikler gözlenir. Özellikle Oyuktepe civarında mermer içerisinde gelişmiş damar

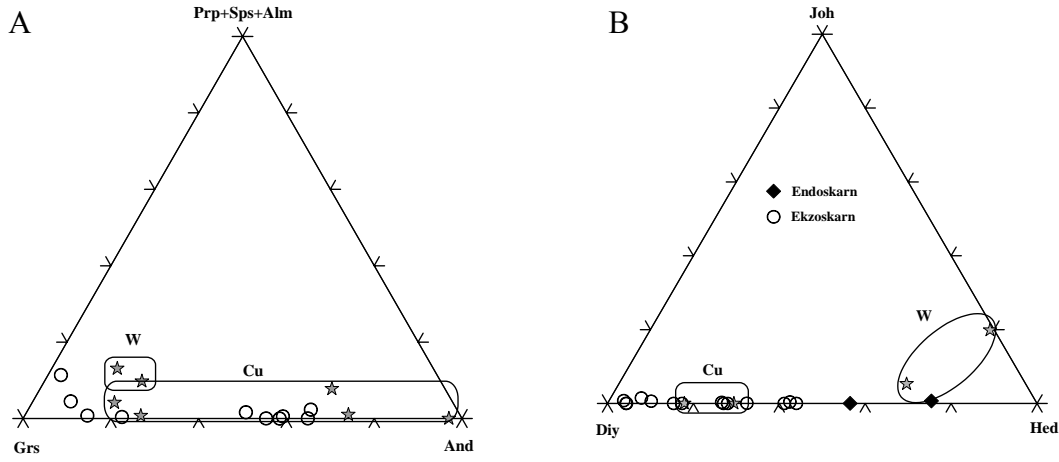
oluşumlarında vollastonit ve piroksenlerin uzun prizmatik kristaller halinde oluştuğu, granat renginin ise oldukça soluklaştığı fark edilmiştir. Bu zonlarda vezüvyanit de belirlenmiştir. *Granat-vezüvyanit-piroksen-vollastonit zonu* olarak adlandırılan bu zonda vezüvyanitler, zeytin yeşili girişim renklerinde, yelpazeler şeklinde ve piroksenleri ornatarak büyümüş taneler halindedir (Şekil 5B). Benzer özelliklerin belirlendiği Naldöken Sırtı civarında mermer dokanağına doğru kalsit bolluğu giderek artmaktadır. Mermer dokanağında ise mermer skarn minerallerini bünyesine alarak tabakalı ve tabaka içi bantlı yapılar sunmaktadır. Skarn mineralleri mermere doğru sırası ile yok olmakta ve kalsit bolluğu giderek artmaktadır. İlk olarak, kalsitler içinde oldukça küçük taneler halinde granat, vezüvyanit, vollastonit ve piroksenler gözlenir (Şekil 5C). Granat, vezüvyanit ve vollastonitin ortadan kalkması ile piroksen-ortoklaz-biyotit birlikteliği gelişmiştir. Bu zonda ayrıca kuvars, skapolit (menionit) ve opak mineralleri de (pirit, manyetit) belirlenmiştir. Piroksenlerin azalması ile kalsit ve muskovit bollukları artmıştır (Şekil 5D). Mermer dokanağında mineral zonlanması şeklinde gelişmiş bu bantlı yapıların tamamı *piroksen mermer* olarak adlandırılmıştır.

## V. MİNERAL KİMYASI

### VI. Granat ve Piroksenlerin Kimyasal Kompozisyonları

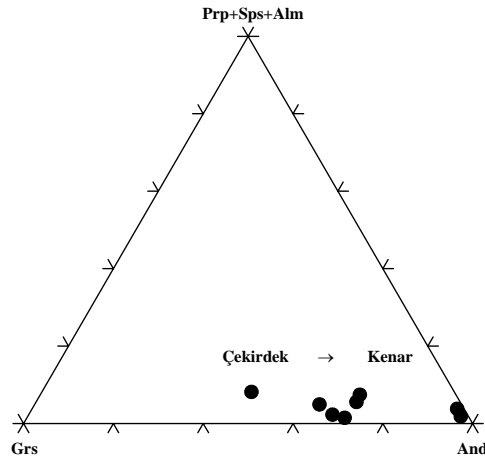
Skarn yataklarının tanımlanması ve sınıflaması skarn mineralojisine göre yapılır. Minerallerin bileşimsel değişimi skarn oluşumu ve ortamı hakkında önemli ipuçları verir. Skarn minerallerinin oluşumunu denetleyen faktörler ise magma jeokimyası, karbonatlı kayacın kompozisyonu, skarnın oluşum derinliği ve oksitlenme derecesidir [5]. Susurluk skarn yatağına mineral zonlarına ait granat ve piroksenleri temsil edici analiz sonuçları sırasıyla Tablo 1 ve 2’de verilmiştir. Uç bileşenlerin hesaplanmasında sırasıyla 24 ve 6 oksijen esas alınmıştır. Granatlara ait ferik demir Droop (1987) [23]’ye göre hesaplanmıştır. Mikroprob analizleri sonuçlarına göre skarn zonlarındaki granatlar baskın olarak grossular-andradit (Şekil 6A) ( $\text{Grs}_{23.38-91.16}\text{And}_{2.94-73.61}\text{Prs}_{0-11.9}$ ) ve piroksenler diyopsit-hedenberjit (Şekil 6B) ( $\text{Diy}_{19.82-96.19}\text{Hed}_{2.72-79.14}\text{Joh}_{0-6.52}$ ) bileşimine sahiptir. W içeren zonda granat ve piroksenler  $\text{Grs}_{68.06-72.01}\text{And}_{14.91-22.18}\text{Prs}_{9.76-13.08}$  ve  $\text{Diy}_{19.82-27.73}\text{Hed}_{67.93-79.14}\text{Joh}_{0.01-6.52}$ , Cu içeren zonlarda ise  $\text{Grs}_{2.99-}$

$77.10\text{And}_{15.68-97}\text{Prs}_{0.00-5.93}$  ve  $\text{Diy}_{83.4-89.6}\text{Hed}_{9.9-16.6}\text{Joh}_{0-1.5}$  bileşimindedir. W ve Cu içeren zonlarda piroksenlerin Mn/Fe oranları ise sırasıyla 0,12 ve 0,03'dür.



**Şekil 6.** Skarn zonlarında gelişmiş (A) granatların (Prp+Sps+Alm)-Grs-And (B) piroksenlerin Diy-Hed-Joh üçgen diyagramında dağılımları.

Granitoyid dokanağındaki ekzoskarn zonuna ait zonlu granatlarda çekirdekten dış bantlara doğru And/Grs oranı artmaktadır (Şekil 7). Çekirdekten dış bantlara doğru  $X_{\text{And}}=0,68-0,96$  ve  $\text{Fe}^{+3}/\text{Al}=1,03-54,98$  oranları saptanmıştır (Tablo 2).



**Şekil 7.** Zonlu granatlarda çekirdekten dış bantlara doğru bileşimsel değişimi.

**Tablo 1.** Skarn zonlarına ait granatların temsil edici mikroprob analizleri (%).

Min Zonu	Prx-Gr	Gr-Prx	Gr-Prx	Prx-Gr	Prx-Gr	Prx-Gr	Vol-Prx-Gr	Vol-Prx-Gr	Vol-Prx-Gr	Vol-Prx-Gr	Vol-Prx-Gr	Vol-Prx-Gr	Gr
Örn No	NB-2	OA-3-4	OA-3-4	KA-15	KA-15	KA-15	NC-4	NC-4	NA-11	NA-11	OA-3-8	OA-3-8	OA-3-3
SiO <sub>2</sub>	41,25	39,71	39,62	37,67	36,72	38,26	40,74	38,58	38,85	38,55	37,75	38,18	38,7
TiO <sub>2</sub>	1,07	0,00	0,00	0,62	0,36	1,62	0,00	0,37	0,00	0,11	0,22	0,09	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,75	17,75	16,56	5,19	0,58	4,93	19,22	16,59	6,98	7,32	8,20	8,62	10,6
FeO*	5,71	9,31	10,32	21,64	20,47	20,73	4,86	6,75	19,89	19,06	16,82	17,09	15,81
MnO	0,00	2,01	1,83	0,00	0,00	0,19	0,00	0,19	0,21	0,02	0,07	0,00	0,36
MgO	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00
CaO	34,76	31,93	33,02	35,15	34,56	33,82	36,04	36,76	35,07	36,65	35,34	36,02	35,39
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K <sub>2</sub> O	0,26	0,14	0,17	0,04	0,11	0,07	0,12	0,28	0,15	0,17	0,21	0,08	0,06
Top.	101,4	100,85	101,53	100,33	98,69	99,99	100,98	99,52	101,15	101,88	98,72	100,08	100,9
Si	6,24	6,08	6,04	6,02	6,06	6,14	6,14	5,94	6,11	6,01	6,04	6,03	6,03
Ti	0,12	0,00	0,00	0,08	0,04	0,20	0,00	0,04	0,00	0,01	0,03	0,01	0,00
Al	3,17	3,20	2,98	0,98	0,11	0,93	3,41	3,01	1,29	1,34	1,55	1,60	1,95
Fe <sup>+2</sup>	0,72	0,53	0,35	0,06	0,00	0,38	0,27	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,05
Fe <sup>+3</sup>	0,11	0,66	0,97	2,84	3,64	2,41	0,34	0,87	2,51	2,48	2,25	2,26	2,01
Mn	0,00	0,26	0,24	0,00	0,00	0,03	0,00	0,02	0,03	0,00	0,01	0,00	0,05
Mg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
Ca	5,64	5,24	5,39	6,02	6,12	5,82	5,82	6,06	5,91	6,12	6,06	6,09	5,91
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,05	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	0,05	0,03	0,03	0,04	0,02	0,01
Top.	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
Prp	0,03	0,00	0,00	0,07	0,00	1,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00
Sps	0,00	4,32	3,96	0,00	0,00	0,40	0,00	0,41	0,47	0,04	0,17	0,00	0,78
Alm	11,36	8,60	5,80	0,94	0,00	5,98	4,50	0,00	1,86	0,00	0,00	0,00	0,87
Grs	85,66	72,01	68,06	25,38	2,99	25,78	86,90	77,27	33,28	35,10	40,51	41,54	48,41
And	2,94	14,91	22,18	73,61	97,00	66,44	8,59	22,31	64,40	64,86	58,92	58,45	49,94



Tablo 1.(Devamı) Skarn zonlarına ait granatların temsil edici mikroprob analizleri (%).

Min Zonu	Gr	Gr-Prx- Vol	Gr-Prx- Vol	Gr-Ve- Prx-Vol	Gr (Çekirdek)	Gr (Kenar)	Gr (Kenar)	Gr (Kenar)	Gr (Kenar)	Gr (Kenar)	Gr (Kenar)	Gr (Kenar)
Örn No	OA-3-3	KA-6	KA-6	OB-3b	OA-3-2a	OA-3-2a	OA-3-2a	OA-3-2a	OA-3-2a	OA-3-2a	OA-3-2a	OA-3-2a
SiO <sub>2</sub>	38,9	39,48	40,08	39,9	39,09	37,64	38,99	39,02	40,53	38,25	39,6	37,82
TiO <sub>2</sub>	0,59	0,43	0,40	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,03	0,07	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,99	16,47	17,31	18,85	6,14	5,65	6,97	4,65	9,27	0,32	4,64	0,36
FeO*	15,71	8,78	7,91	4,45	20,47	20,96	20,93	22,84	17,44	28,67	24,9	28,85
MnO	0,02	0,00	0,00	0,37	0,00	0,00	0,39	0,00	0,00	0,00	0,28	0,11
MgO	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
CaO	36,97	36,32	35,95	37,1	35,37	34,62	34,44	34,27	34,75	34,38	34,1	34,38
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K <sub>2</sub> O	0,18	0,23	0,07	0,07	0,12	0,01	0,08	0,05	0,00	0,00	0,05	0,12
Top.	101,36	101,72	101,73	100,74	101,21	98,95	101,82	100,84	102,02	101,69	103,58	101,65
Si	6,05	5,97	6,05	6,02	6,16	6,08	6,11	6,22	6,28	6,15	6,17	6,08
Ti	0,07	0,05	0,04	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Al	1,65	2,94	3,08	3,35	1,14	1,08	1,29	0,87	1,69	0,06	0,85	0,07
Fe <sup>+2</sup>	0,00	0,04	0,25	0,00	0,14	0,09	0,25	0,35	0,51	0,23	0,42	0,09
Fe <sup>+3</sup>	2,04	1,07	0,75	0,56	2,56	2,74	2,50	2,70	1,75	3,62	2,83	3,79
Mn	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,04	0,02
Mg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	6,16	5,89	5,81	6,00	5,97	5,99	5,78	5,85	5,77	5,92	5,69	5,93
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,04	0,05	0,01	0,01	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02
Top.	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
Prp	0,00	0,00	0,03	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00
Sps	0,04	0,00	0,00	0,78	0,00	0,00	0,85	0,00	0,00	0,00	0,60	0,26
Alm	0,00	0,73	4,12	0,00	2,21	1,48	4,03	5,57	8,16	3,80	6,78	1,57
Grs	44,61	72,82	77,10	84,97	30,08	27,77	32,33	23,10	45,18	1,58	21,42	1,75
And	55,35	26,45	18,75	14,25	67,62	70,74	62,78	71,32	46,65	94,61	71,13	96,41

**Tablo 2.** Skarn zonlarına ait piroksenlerin temsil edici mikroprob analizleri (%).

Min Zonu	Plj-Prx	Plj-Prx	Prx-Gr	Prx-Gr	Gr-Prx	Gr-Prx	Vol-Prx-Gr	Vol-Prx-Gr	Vol-Prx-Gr	Vol-Prx-Gr	Prx-Gr	Prx-Gr	Gr-Prx-Vol	Gr-Prx-Vol	Gr-Ve-Prx	Gr-Ve-Prx	Prx-Mermer	Prx-Mermer	Prx-Mermer	Prx-Mermer
Örn No	NA-2	NA-2	NB-2	NB-2	OA-3-4	OA-3-4	NA-11	NA-11	OA-3-8	OA-3-8	KA-15	KA-15	KA-6	KA-6	NB-4a	NB-4a	NB-8	NB-8	OB-7	OB-7
SiO <sub>2</sub>	53,51	49,83	53,57	53,30	50,36	50,45	55,03	56,66	56,73	56,46	55,87	56,13	54,08	54,35	54,13	54,22	53,31	52,96	54,13	55,85
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,37	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,11	0,11	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,28	0,43	0,47	0,11	0,30	2,11	0,07	0,49	0,49	0,24	0,08	0,59	0,56	0,27	0,36	0,33	0,09	0,13	0,57	0,68
FeO*	16,65	22,03	13,17	12,66	19,32	6,36	1,08	1,39	2,43	1,46	3,16	5,00	9,08	5,87	8,2	8,71	12,57	10,00	8,50	5,48
MnO	0,00	0,19	0,00	0,12	1,50	1,57	0,24	0,00	0,49	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
MgO	7,20	4,00	9,42	9,63	4,49	0,05	17,02	17,24	17,37	17,69	16,02	15,39	12,21	15,12	12,74	12,58	10,08	11,68	12,87	14,65
CaO	23,84	22,98	23,52	24,93	23,47	38,14	26,34	24,88	24,16	25,75	25,13	24,77	24,11	25,29	25,68	24,77	23,95	23,83	24,7	24,96
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K <sub>2</sub> O	0,09	0,01	0,00	0,13	0,11	0,08	0,1	0,11	0,04	0,14	0,06	0,04	0,09	0,13	0,11	0,04	0,15	0,00	0,10	0,02
Top.	101,6	99,47	100,2	101,3	99,72	98,76	99,87	100,79	101,71	101,8	100,49	101,93	100,14	101,15	101,42	100,64	100,16	98,62	100,91	101,65
Si <sup>+4</sup>	2,05	2,00	2,05	2,02	2,01	2,01	2,00	2,04	2,03	2,01	2,04	2,03	2,03	1,99	2,00	2,02	2,03	2,03	2,01	2,03
Al <sup>+4</sup>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ti	0,01	0,02	0,02	0,00	0,01	0,1	0,00	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01	0,02	0,03
Fe <sup>+2</sup>	0,53	0,74	0,42	0,4	0,64	0,21	0,03	0,04	0,07	0,04	0,10	0,15	0,29	0,18	0,25	0,27	0,40	0,32	0,26	0,17
Mn	0,00	0,01	0,00	0,00	0,05	0,05	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	0,41	0,24	0,54	0,54	0,27	0,00	0,92	0,93	0,93	0,94	0,87	0,83	0,68	0,82	0,70	0,70	0,57	0,67	0,71	0,8
Ca	0,98	0,99	0,97	1,01	1,00	1,62	1,03	0,96	0,93	0,98	0,98	0,96	0,97	0,99	1,02	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Top.	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Diy	43,53	28,44	56,03	57,34	27,73	19,82	95,82	95,66	91,36	95,56	89,6	84,6	84,6	82,1	73,26	72,02	58,85	67,53	72,96	82,65
Hed	56,47	70,56	43,97	42,27	66,99	79,14	3,42	4,33	7,17	4,43	9,90	15,4	15,4	17,9	26,45	27,98	41,15	32,43	27,03	17,35
Joh	0,00	1,00	0,01	0,40	5,28	1,04	0,76	0,00	1,47	0,01	0,6	0,00	0,00	0,00	0,29	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00

## VI. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bölgede skarn oluşumları magma sokulumu ve kristallenme süreçleri ile ilişkili olarak endo ve ekzoskarn zonları şeklinde gelişmiştir. Çataldağ Granitoidinin içerisinde ve kantağında gelişmiş merccekler ve ince zonlar endoskarn olarak, endoskarnı takip eden zonlar ile granitoid ve mermer içerisinde gelişmiş damarlar ise ekzoskarn zonu olarak tanımlanmıştır. Susurluk skarn yatağında görülen mineral birliktelikleri ve bileşimleri, magma ve yan kayacın kompozisyonunu yansıtmaktadır. Granat, piroksen, vezüvyanit ve vollastonit şeklinde genel bir zonlanmanın gözlemlendiği ekzoskarn kalsik karakterli olup ekzoskarn zonları mineral bollukları, dokusal özellikleri, mineral bileşimleri ve alterasyon özellikleri ile farklılıklar sunar (Şekil 8). Bölgede skarn zonunda yapılmış önceki araştırmalar ile [13, 16] forsterit-diyopsit mineral birliktelikleri belirlenmiş ve yan kayacın “muhtemel silisli dolomitik kireçtaşlarından ve/veya Al içeren silisli kireçtaşları üzerine etkisi ile” oluştuğu öngörülmüştür [16]. Ancak skarn zonunda ve mermerde petrografik olarak belirlenmiş mineral birliktelikleri ve saf kalsit kristalleri bölgedeki skarn oluşumunun kalsik özellikte olduğunu göstermektedir. Ayrıca [22] tarafından skarn zonu ile mermerde yapılmış jeokimyasal analizler bu kanıyı desteklemekte mermerin Si, Al ve Mg bakımından fakir olduğunu göstermektedir. Çataldağ Granitoidi'nin karbonatlı birimlere sokulumu ve karbonatlı kayaçlarla kirletilmesi sonucu gelişen, Burnham (1959) [24] tarafından plajiyoklaz-piroksen mineralleri ile tanımlanan endoskarn zonu, bölgede granitoidin içinde ve kenar zonlarında dar alanlarda gelişmiştir. Plütunun derinde sokulum yaptığı skarnlarda, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarından dolayı kırılanmaların ve akışkan dolaşımının kısıtlı olduğu ve endoskarn zonunun oldukça dar alanlarda geliştiği vurgulanmıştır [1, 2]. Çalışma alanında dar alanlarda gelişmiş endoskarn zonu Çataldağ Granitoidi'nin derinlerde sokulum yaptığını göstermektedir.

Ekzoskarn zonu ise sığ derinlere doğru yükselen plütunun devam eden kristalizasyonu ve karbonatlı kayaçlarla artan metasomatik reaksiyonları neticesinde daha geniş alanlarda gelişmiştir. Bölgede düzensiz olarak gelişmiş ekzoskarn zonlarında genel olarak proksimal zonda granatlar distal zonda ise piroksenler oluşmuştur. Granitoidin dokanağında piroksenlerin mono mineralik granatları ornatarak gelişmesi ve sırasıyla vezüvyanit ve vollastonitin gözlenmesi sisteme hidrotermal akışkanların eklendiğini ve metasomatik reaksiyonların

SKARN ZONLARI	ENDO	EKZOSKARN											
MİNERAL ZONU	Plj-prx skarn	Prx-gr skarn	Gr-prx skarn	Vol-prx-gr skarn	Gr skarn (zonlu gr)	Gr-prx skarn	Ve-gr skarn	Gr-prx-vol skarn	Prx-vol skarn	Gr skarn (masif gr)	Ve-prx-gr; Ve-gr skarn	Gr-ve-prx-vol skarn	Piroksen mermer
Plajiyoklaz				-----									-----
Piroksen													---
Granat													-
Vezüvyanit		---		-----				-----					---
Vollastonit			-----										---
Kuvars			-----										-----
Kalsit	-----	-----			-----			-----					
Ortoklaz	-----			-----									--
Skapolit	-----	-----											-----
Biyotit													-----
Muskovit													-----
Sfen		-----		-----									-----
Klorit		-----		-----				-----					
Şeelit	-----	-----			-----								
Kalkopirit					-----								
Kalkozin													
Bornit													
Opak													-----
PIROKSENİN BİLEŞİMİ	HEDENBERJİT			DİYOPSİT									
GRANATIN BİLEŞİMİ	GROSSULAR			GROSSULAR ve ANDRADİT				GROSSULAR					
Metasomatizma	<p style="text-align: center;">----- Fe Metasomatizması -----</p> <p style="text-align: center;">----- Si Metasomatizması -----</p>												
İKİNCİL ÜRÜNÜ	ÇATLAKLARIN KUVARSA İLE DOLDURULMASI, KARBONATLAŞMA, KLORİTLEŞME							ÇATLAKLARIN KALSİT İLE DOLDURULMASI, KALSİT ÖZÜMLEMELERİ					

**Şekil 8.** Susurluk skarn yatağındaki skarn zonlarının ve evrelerinin genel özellikleri.

tekrarlandığını göstermektedir. Skarn oluşturan çoğu hidrotermal sistemde, akışkan infiltrasyonunun evrimi mineral alterasyonları ve kimyasal bileşimlerle ifade edilmektedir [5]. Özellikle granatları oluşturan bileşenlerin kimyasal içerikleri ve oksijen fugasitesindeki

periyodik değişimler granatların zonlanmasında etkisi yüksektir [25, 26]. Susurluk skarn yatağında granatlar baskın olarak grossular-andradit ( $Grs_{23.38-91.16}And_{2.94-73.61}Prs_{0-11.9}$ ), zonlu granatlar ise çekirdekte  $Grs_{30.08}And_{67.62}Prs_{2.29}$  en dış bantta  $Grs_{1.75}And_{96.41}Prs_{1.83}$  bileşimlerine sahiptir. Zonlu granatlarda çekirdekten dış bantlara doğru  $X_{And}=0,68-0,95$  ve  $Fe^{+3}/Al$  oranı 1,03-54,98'dir. Buna göre, distal zonda, damarlarda ve zonlu granatların çekirdeğinde grossular zenginleşmesi Al'ca zengin bir granitoyid tarafından kontrol edilen ilksel metasomatizma ile açıklanabilir. Zonlu granatların dış bantlarında ve proksimal zondaki granatlarda andradit artışı hidrotermal sistemde akışkan bileşimindeki değişimi ve oksijen fugasitesindeki artışı (plütonun oksitlenme koşullarının arttığını yani kristallenme derinliğinin sığ olduğunu) göstermektedir. Bileşimsel farklılıklar daha derin zonlarda gelişen piroksenlerde de gözlenir. Grossular ( $Grs_{68.06-85.66}And_{2.94-22.18}Prs_{9.76-13.08}$ ) bileşimli zonlarda piroksenlerin hedenberjit ( $Diy_{19.82-43.97}Hed_{42.27-79.14}Joh_{0.01-6.52}$ ) bileşimleri artmıştır.

Mineral bileşimindeki değişimle birlikte dokusal ve alterasyon çeşitliliğinde de farklılıklar izlenir. Zonlu granatlarda ornatım ürünü olarak piroksenlerin ortaya çıkması, vezüvyanit granat içerisinde kapanımlar halinde gelişmesi, granat boşluk ve çatlaklarının kuvars tarafından doldurulması ve bunlarla ilişkili olarak kloritleşme, karbonatlaşma gibi alterasyon ürünlerinin gelişmesi örnek olarak verilebilir. Ayrıca, proksimal zondaki ince lifsi şekilli vollastonitler *granat-piroksen zonunda* ince çatlaklarda ve *vollastonit-piroksen-granat zonunda* daha az bolluklarda oluşmuşlardır. Distal zonlarda ve mermer içerisindeki damar oluşumlarında ise karbonatça zengin mineraller olan vollastonit ve vezüvyanit minerallerinin bollukları artmaktadır. Vollastonitler daha iri yapraksı şekillerde gözlenirken vezüvyanit mineralleri piroksenin ornatım ürünü olarak ve zonlu şekillerde karşımıza çıkar. Mermer dokanağına doğru minerallerin çatlak ve boşluklarındaki kalsitlerin özümlemelere neden olduğu gözlenir. Sıcaklığın giderek azaldığı mermer dokanağında ise, mermerler ile bantlar oluşturan kısımlarda piroksen, vezüvyanit, vollastonit, biyotit ve muskovit gelişmiştir.

Susurluk skarn oluşumunda Çataldağ Granitoyidi'nin sokulumu ve kristalizasyonu ile ilişkili prograd evre ürünlerinin geliştiği ancak soğuma ile ilişkili retrograd evre ürünlerinin (epidot, amfibol, biyotit) gelişmediği gözlenir. Bölgede dar alanlarda gelişmiş endoskarn zonu Çataldağ Granitoyidi'nin derinlerde sokulum yaptığını gösterir. Yüksek sıcaklıklarda sokulum yapan

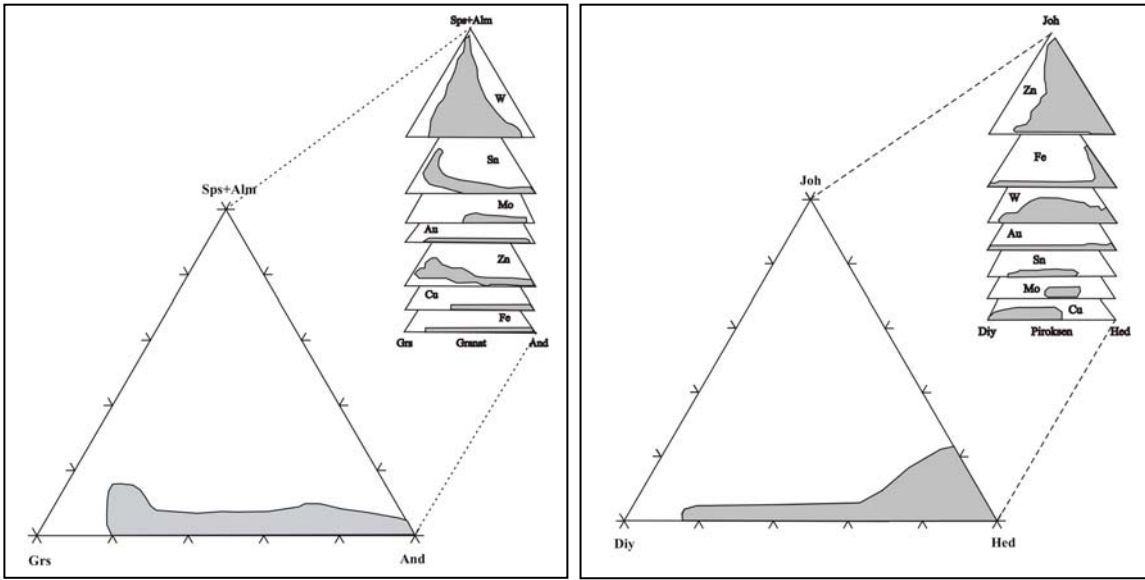
granitoyid, kristalleşme tarihçesini de etkilemiştir [5]. Sığ derinlere yükselen plütunun devam eden kristalizasyonu retrograd alterasyon ürünlerinin gelişmesini engellemiştir.

Skarn zonundaki cevherleşmelerin (W ve Cu) skarn mineralleriyle birlikte bulunmaları veya merceksi boşluk dolgusu şeklinde gelişmeleri sistem içerisinde farklı evrelerin ortaya çıktığına işaret etmektedir. W genellikle yüksek sıcaklığın hakim olduğu *piroksen-granat zonunda* görülürken, Cu ise *vezüvyanit-granat zonu* üzerinde mercekler şeklinde gelişmiştir. Kocaçakıl Tepe civarında damar oluşumları halinde izlenen konsantrik zonlu granatların kenar bantlarında kalkopirit gelişimi saptanmıştır. Granatlardaki zonlanma sistemde dolaşan hidrotermal çözeltilerin kimyasal bileşimindeki değişimler sonucu ortaya çıkmıştır [26]. Elementel analizler granatların çekirdek ve kenar bantlarının farklı bileşimlerde olduğunu ve farklı cevher elementlerince zenginleştiğini göstermiştir. Granatlar çekirdekleri yüksek oranda Ca, Al, Ti ve Mn düşük oranda Fe ve HNTE içerirken, bantlara doğru Ca, Al, Ti, Zr, Y ve Mn fakirleşmekte buna karşın W, Mo, As, Cu ve Zn gibi cevher elementleri zenginleşmektedir [27-29]. Boşluk doldurucu mercekler şeklinde gelişen Cu cevherleşmeleri (özellikle granatların kenar bantlarında saptanan kalkopirit) cevher-taşıyıcı akışkanların granitoyid kristalizasyonunun sonraki evrelerinde ortaya çıktığını göstermektedir. Kocaçakıl Tepe civarında skarn zonunu kesen damarlarda belirlenen iri apatit kristallerinin ise granitoyidin kristalizasyonu esnasında iç gaz basıncının düşmesi ile geliştikleri ve cevher taşınmasında önemli rol oynadıkları düşünülmüştür.

Mermerlerdeki skarn oluşumları genellikle çatlak dolgusu veya damar şeklinde gelişmiştir. Grossularca zengin bu zonlarda piroksenlerin ornatılarak vezüvyanitin olduğu ve skarn minerallerini kesen ikincil kuvars ve kalsit damarlarının geliştiği görülmektedir. Böyle bir ortamda silika, karbonat ve CO<sub>2</sub>'nin yeterli doygunluğa ulaştığı söylenebilir. Ayrıca bölgedeki piroksenler vollastonitlerle birlikte oldukça iri kristaller halinde gelişmiştir. Skarn zonundaki pegmatit granitte ise iri apatit kristalleri ve monazit mineralleri belirlenmiştir. Mermer içerisindeki bu oluşumlar ve pegmatit granitteki mineralojik bulgular, skarnlaşmanın granitoyidin kristalizasyonunun son evrelerinde ve soğuması ile ilişkili olarak geliştiğini göstermektedir.

Susurluk skarn yatağındaki granat ve piroksenlerin kompozisyonları dünyadaki diğer skarn yatakları ile karşılaştırıldığında, W ve Cu'nun yanı sıra Fe, Zn, Au dağılımlarının oldukça benzer

olduğu görülmüştür (Şekil 9). W ve Cu içeren zonlarda piroksenlerin Mn/Fe oranları ise sırasıyla 0,12 ve 0,03'dür. Farklı skarn tipleri için tanımlanan bu oranlar Cu-Fe tipi için <0,1; W tipi için 0,1-0,2 ve Pb-Zn tipi için ise >0,2'dir [30]. Bölgedeki W ve Cu'nun Mn/Fe oranlarının tanımlanan bu değerler ile uyumlu olduğu söylenebilir. Granatlardaki yüksek andradit ( $Fe^{+3}$ ) ve düşük almandin ( $Fe^{+2}$ ) + spessartin ( $Mn^{+2}$ ) içerikleri oksitlenmiş W skarna işaret etmektedir [1]. Ayrıca proksimal granat=piroksen zonundaki granatların çekirdekten kenar bantlara doğru andradit bakımından zenginleşmesi oksitlenmiş W skarnı göstermektedir [31]. Susurluk skarn yatağı dünyadaki diğer oksitlenmiş W skarnlar gibi, vollastonitçe zengin ve genellikle Cu cevherinin (kalkopirit) gözlendiği metalce zengin olmayan skarn zonları ile karakteristiktir.



**Şekil 9.** Çalışma alanında yer alan (A) granatların (B) piroksenlerin dünyadaki değişik tipteki granat ve piroksen bileşimleri ile karşılaştırılması [1-3].

## VII. KATKI BELİRTME

Bu çalışma Ayşe Orhan'ın Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri enstitüsünde yapmış olduğu doktora çalışmasının bir bölümünü oluşturmaktadır. Yazarlar çalışma için destek sağlayan Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Komisyonuna (Proje no: 2006-15010) ve TÜBİTAK Hızlı Destek Programına (Proje no: 106Y187) teşekkürlerini sunarlar. Ayrıca, Doç.Dr. İlkay Kuşcu makalenin gelişmesine önemli ölçüde katkıda bulunmuştur.

## VIII. KAYNAKLAR

- [1] M.T. Einaudi, L.D. Meinert and R.J. Newberry, "Skarn Deposits", *Economic Geology*, 75, pp. 317-391, 1981.
- [2] M.T. Einaudi and D.M. Burt, , A "Special Issue Devoted to Skarn Deposits, Introduction-Terminology, Classification and Composition of Skarn Deposits", *Economic Geology*, 77, 4, pp. 745-754, 1982.
- [3] L.D. Meinert, "Skarn and skarn deposits", *Geoscience Canada*, 19, pp. 145-162, 1992.
- [4] L.D. Meinert, "Application of Skarn Deposit Zonation Models to Mineral Exploration", *Exploration Mining Geol*, 6, pp. 185-208, 1997.
- [5] L.D. Meinert, G.M. Diple and S. Nicolescu, "World Skarn Deposits", *Society of Economic Geologist, Inc. Economic Geology 100th Anniversary Volume*, pp. 299-336. 2005.
- [6] C.L. Ciobanu and N.J. Cook, "Skarn texture and a case study: the Ocna de Fier-Dognecea orefield, Banat, Romania", *Ore Geology Reviews*, 24, pp. 315-370, 2004.
- [7] A. Sağıroğlu, "Akdağmadeni (Yozgat) cevherleşmelerinde görülen değişik skarn oluşuklarının özellikleri ve irdelenmesi", *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 27(1), ss. 69-81, 1984.
- [8] S. Öngen, "Metasomatik gelişmede yeni bir problem: endoskarn çeşitliliği", *İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, 13, 12, ss. 63-75, 2000.
- [9] A. Çalık ve S. Öngen, "Keban Skarn Oluşumu, KD Elazığ Bölgesi" *İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, 13, 12, ss. 1-14, 2000.
- [10] İ. Kuşcu, G. Gençalioglu Kuşcu ve M.C. Göncüoğlu, "Karamadazı Demir Yatağının Skarn Zonlanması ve Mineralojisi", *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 44, 3, ss. 1-14, 2001.



- [11] İ. Kuşcu, E. Yılmaz ve E. Demirela, “Sivas-Divriği Bölgesi Skarn Tipi Demir Oksit Yataklarına Fe-oksit-Cu-Au (Olympic Dam tipi) Perspektifinden Yeni Bir Bakış”, *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 45, 2, ss. 33-47, 2002.
- [12] S. Saraç ve A. Van, “Çarşamba (Ordu) ve Dereli (Giresun) Yörelerindeki Skarn Yataklarının Karşılaştırmalı Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri: Doğu Pontit Kuzey Zonu (KD Türkiye)”, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 29 (2), ss. 27-44, 2005.
- [13] A. Erdağ, “Balıkesir-Çataldağ Granodiyoritinin (Güney Alanı) Jeoloji ve Petrolojisi”, *Doktora Tezi, İÜ, (yayımlanmamış)*, ss. 94, 1976.
- [14] F. Arık, “Serçeören-Örenli-Kansız (Kepsut-Balıkesir) yöresi vollastonit ve talk yatakları”, *Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (yayımlanmamış)*, ss. 107, 1995.
- [15] H. Erdinç, “Kepsut-Serçeören Köyü (Balıkesir) Çevresinde Yer Alan Vollastonit Zuhurlarının Ön Etüdü”, *MTA Rap. No: 6458*, ss. 11, 1978.
- [16] A. Çakır ve H. Genç, “Balıkesir-Susurluk-Yaylaçayır Köyü, Bursa-Mustafakemalpaşa İlçesi Paşalar Köyü-Bıçkıdere-Farafat Alanındaki Vollastonit Maden Etüd Raporu”, *MTA Rap. No: 7299*, ss. 11, 1983.
- [17] E. Ergül, Z. Öztürk, F. Akçaören ve M.Z. Gözler, “Balıkesir İli Marmara Denizi Arasının Jeolojisi” *MTA Raporu Derleme No: 6760*, ss. 57, 1980.
- [18] E. Ergül, Z. Gözler ve F. Akçaören, “1:100 000 Ölçekli Açınsama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Balıkesir-F6 Paftası”, *MTA Genel Müdürlüğü*, ss. 11, 1986.
- [19] S. Akyüz, “Manyas-Susurluk-Kepsut (Balıkesir) Civarının jeolojisi”, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, (yayımlanmamış)*, ss. 239, 1995.
- [20] T. Ercan, E. Ergül, F. Akçaören, A. Çetin, S. Granit ve J. Asutay, “Balıkesir-Bandırma Arasının Jeolojisi, Tersiyer Volkanizmasının Petrolojisi ve Bölgesel Yayılımı”, *MTA Dergisi*, 110, ss. 113-130, 1990.
- [21] D. Boztuğ, Y. Harlavan, İ. Jonckheere Can, R. Sarı, “Geochemistry and K-Ar cooling ages of the Ilıca, Çataldağ (Balıkesir) and Kozak (Izmir) granitoids, west Anatolia, Turkey”, *Geological Journal*, 44, 1, ss. 79-103, 2009.

- [22] A. Orhan, "Susurluk Skarn Yataklarının Mineralojik ve Jeokimyasal Özellikleri (Balıkesir-Batı Anadolu)", *ESOGU Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi*, (yayımlanmamış), ss. 258, 2008.
- [23] G.T.R. Droop, "A general equation for estimating  $Fe^{+3}$  concentrations in ferromagnesian silicates and oksides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria", *Mineralogical Magazines*, 51, pp. 431-435, 1987.
- [24] C.W. Burnham, "Contact metamorphism of magnesian limestones at Crestmore, California", *Geol. Soc. Am. Bull.*, 70, pp. 879-920. 1959.
- [25] B. Jamtveit, "Oscillatory zonation patterns in hydrothermal grossular-andradite garnet: Nonlinear dynamics in regions of immiscibility", *American Mineralogist*, 76, pp. 1319-1327, 1991.
- [26] B.W.D. Yardley, C.A. Rochelle, A.C. Barnicoat, G.E. Lloyd, "Oscillatory zoning in metamorphic minerals: in indicator of infiltration metasomatism", *Mineralogical Magazine*, 55, pp. 357-365, 1991.
- [27] K.Ochiai, M. Tagiri and H. Tanaka, "Behavior of the rare earth elements during the skarn formation at the Kamaishi mine, Japan", *Resource Geology*, 43, pp. 291-30, 1993.
- [28] B. Jamtveit and R.L. Hervig, "Constraints on transport and kinetics in hydrothermal systems from zoned garnet", *Science*, 263, pp. 505-508, 1994.
- [29] S. Nicollescu, D.H. Cornell, U. Sodervall, and H. Odelius, "Secondary in mass spectrometry analysis of rare earth elements in grandite garnet and other skarn related silicates", *European Journal of Mineralogy*, 10, pp. 251-259, 1998.
- [30] T. Nakona, T. Yoshino, H. Shimazaki and M. Shimizu, "Pyroxene Composition as an Indicator in the Classification of Skarn Deposits", *Economic Geology*, 89, pp. 1567-1580, 1994.
- [31] R.J. Newberry, "The formation of subcalcic garnet in scheelite-bearing skarns", *Canadian Mineralogist*, 21, pp. 529-544, 1983.