

**УНИВЕРЗИТЕТ “ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ” - ШТИП,
ФАКУЛТЕТ ЗА ПРИРОДНИ И ТЕХНИЧКИ НАУКИ
НАСОКА: ИНЖЕНЕРСТВО ЗА ЗАШТИТА НА ЖИВОТНАТА СРЕДИНА**

м-р Бахри Синани

**ДИСТРИБУЦИЈА НА ПРИРОДЕН АЗБЕСТ ВО РЕГИОНОТ
БАЈГОРА И НЕГОВА ПРОЦЕНКА НА РИЗИКОТ ВО ЖИВОТНАТА
СРЕДИНА**

-ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА-

ШТИП, 2026 г

Интерен ментор: **проф. д-р Блажо Боев,**
редовен професор
Факултет за природни и технички науки
Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип

Екстерен ментор: **проф. д-р Арианит Река,**
вонреден професор
Департман за хемија
Факултет за природно-математички науки
Универзитет во Тетово

Членови на Комисијата за оценка и одбрана:

Претседател: **проф. д-р Горан Тасев**
Факултет за природни и технички науки
Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип

Член: **проф. д-р Тена Шијакова-Иванова**
Факултет за природни и технички науки
Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип

Член: **проф. д-р Соња Лепиткова**
Факултет за природни и технички науки
Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип

Научно поле: ИНЖЕНЕРСТВО ЗА ЗАШТИТА НА ЖИВОТНАТА СРЕДИНА
Научна област: ИНЖЕНЕРСТВО ЗА ЗАШТИТА НА ЖИВОТНАТА СРЕДИНА

Датум на одбрана: _____
Датум на промоција: _____

БЛАГОДАРНОСТ

Дозволете ми да ја изразам мојата искрена благодарност до неколку исклучителни личности без кои ова патување ќе беше значително потешко. Нивното водство, поддршка и охрабрување го направија завршувањето на оваа фаза од мојот академски и научен пат возможно и значајно.

Прво и основно, јас сум длабоко благодарен на мојот ментор, проф. д-р Блажо Боев, за неговото неуморно водство, постојана достапност и длабока стручност. Неговите внимателни сознанија, конструктивна критика и непоколеблива поддршка, во голема мера ја обликуваа и оваа дисертација и мојот развој како истражувач. Неговото менторство и совети беа и ќе останат траен извор на инспирација и модел за мојата идна академска и професионална кариера.

Исто така, би сакал да ја изразам мојата најдлабока благодарност до мојот надворешен ментор, проф. д-р Арианит А. Река, за неговата посветена поддршка, научна строгост и дарежлива подготвеност да го сподели своето знаење во секое време. Неговите придонеси, насоки и критичка перспектива беа од суштинско значење во рафинирањето на концептуалната и методолошката рамка на ова истражување. Искрено сум им благодарен на моите колеги и придружници на ова академско патување: Елида, Аделина и мојот брат Берат, чија поддршка, соработка и охрабрување ми значеа повеќе отколку што можат целосно да се изразат со зборови.

Мојата најдлабока благодарност е до моите родители, татко ми Латифи и мајка ми Санија, кои беа моите чувари секој ден од ова мое четиригодишно патување, како и до моето пошироко семејство за нивната безусловна љубов, трпение и континуирана поддршка. Нивната верба во мене беше постојан извор на сила и мотивација.

Конечно, најголемата благодарност им ја должам на мојата сакана сопруга Ниртени и на нашите два сина, Реиси и Ригони, кои со извонредно трпение и разбирање го поднесоа моето отсуство, долгите работни часови и притисоците на ова патување. Вашата љубов, жртви и непоколеблива вера во мене беа

темелот на кој стои ова достигнување. Ова дело стана возможно преку вашата поддршка и љубов.

АПСТРАКТ

Бахри Синани, Универзитет „Гоце Делчев“– Штип, Факултет за природни и технички науки, Катедра за инженерство за заштита на животната средина

Оваа студија ја истражува појавата, минералошките карактеристики и просторната дистрибуција на природен азбест (NOA) во регионот Бајгора, Митровица, Република Косово. Природниот азбест најчесто се поврзува со ултрамафичните карпи и претставува значителна еколошка опасност во областите погодени од процесите на серпентинизација. Регионот Бајгора во северно Косово се карактеризира со екстензивни офиолитски формации кои припаѓаат на Вардарската зона, каде што серпентинизираниите ултрамафични карпи се домаќини на влакнести серпентински минерали од еколошка загриженост.

Овие геолошки услови ја прават областа особено важна за идентификување и оценување на потенцијалот на опасност поврзан со NOA. Оваа студија се фокусира на минералошката карактеризација и просторната дистрибуција на литологиите со NOA во областа Бајгора, со примарна цел да се идентификуваат зоните со зголемен потенцијал на опасност. Вкупно дваесет репрезентативни примероци од карпи беа систематски собрани низ различни литолошки единици и структурни поставки. Примероците беа анализирани со помош на дифракција на прав со рендген (XRPD) за идентификација на минералната фаза, скенирачка електронска микроскопија заедно со енергетско-дисперзивна спектроскопија (SEM-EDS) за микроструктурна и хемиска карактеризација и петрографска анализа преку тенки делови за да се идентификуваат текстуралните карактеристики и минералните односи поврзани со процесите на серпентинизација. Податоците од теренот беа интегрирани со геореференцирани информации, а моделите за просторна дистрибуција беа развиени во рамките на Географскиот информациски систем (ArcMap 10.7 и софтверот Surfer) користејќи техники на геостатистичка интерполација. Резултатите покажуваат дека проучуваната литологија е претежно составена од минерали од серпентинска група, вклучително лизардит и антигорит, додека хризотилот, главниот азбестиформен минерал од еколошки интерес, се јавува

во просторно ограничени зони. Појавата и дистрибуцијата на хризотил се силно контролирани од литолошки контакти, деформациони зони и тектонски структури. Просторното моделирање ги нагласува локализираните зони со зголемен потенцијал за опасност, како одраз на хетерогената и структурно контролирана природа на дистрибуцијата на NOA во ултрамафични терени. Интегрираната минералозна и просторна база на податоци презентирани во оваа студија обезбедува стабилна основа за проценка на опасностите по животната средина, поддржувајќи ја идентификацијата на приоритетните области за понатамошни детални испитувања и управување со животната средина.

Клучни зборови: природен азбест (NOA), хризотил, серпентинизација, Бајгора, просторна дистрибуција, еколошка опасност.

ABSTRACT

Bahri Sinani, University “Goce Delcev” - Shtip, Faculty of Natural and Technical Sciences, Department of Environmental Engineering

This study investigates the occurrence, mineralogical characteristics, and spatial distribution of naturally occurring asbestos (NOA) in the Bajgora region, Mitrovica, Republic of Kosovo. Naturally occurring asbestos is commonly associated with ultramafic rocks and represents a significant environmental hazard in areas affected by serpentinization processes. The Bajgora region in northern Kosovo is characterized by extensive ophiolitic formations belonging to the Vardar Zone, where serpentinized ultramafic rocks host fibrous serpentine minerals of environmental concern. These geological conditions make the area particularly important for identifying and evaluating NOA-related hazard potential. This study focuses on the mineralogical characterization and spatial distribution of NOA-bearing lithologies in the Bajgora area, with the primary objective of identifying zones with elevated hazard potential. A total of twenty representative rock samples were systematically collected across different lithological units and structural settings. The samples were analyzed using X-ray powder diffraction (XRPD) for mineral phase identification, scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive spectroscopy (SEM–EDS) for microstructural and chemical characterization, and petrographic analysis through thin sections to identify textural features and mineral relationships associated with serpentinization processes. Field data were integrated with georeferenced information, and spatial distribution models were developed within a Geographic Information System (ArcMap 10.7 and Surfer software) using geostatistical interpolation techniques. The results indicate that the studied lithology is predominantly composed of serpentine-group minerals, including lizardite and antigorite, while chrysotile, the principal asbestiform mineral of environmental concern, occurs in spatially restricted zones. Petrographic observations reveal characteristic serpentinization textures, including mesh textures and bastite pseudomorphs, as well as the development of chrysotile in cross-fiber veins along fractures and shear zones. The occurrence and distribution of chrysotile are strongly controlled by lithological contacts, deformation zones, and tectonic structures. Spatial modeling highlights localized zones with increased hazard potential, reflecting the heterogeneous and structurally controlled nature of NOA distribution in ultramafic terrains. The integrated mineralogical and spatial database presented in this study provides a robust foundation for environmental risk assessment, supporting the identification of priority areas for further detailed investigations and environmental management.

Keywords: naturally occurring asbestos (NOA), chrysotile, serpentinization, Bajgora, spatial distribution, environmental risk.

СОДРЖИНА	
АПСТРАКТ	5
ABSTRACT	7
СОДРЖИНА	8
СПИСОК НА СЛИКИ	10
СПИСОК НА ТАБЕЛИ	26
КРАТЕНКИ	27
1. ВОВЕД	28
1.1. Цел на студијата.....	29
1.2. Цели.....	29
2. ТЕОРЕТСКИ ДЕЛ	31
2.1. Азбест во Бајгора	31
2.2. Геолошко и структурно земање примероци.....	33
2.3. Геоморфолошки карактеристики на подрачјето на проучување.....	36
2.3.1. Релјеф, хидрографија и клима на студиското подрачје	40
2.4. Историја на азбестните истражувања во Косово.....	46
2.5. Историја на азбестните истражувања во Бајгора	50
2.5.1. Минерализација на азбест и неговите главни карактеристики	52
2.6. Геолошки и геодинамички карактеристики на истражуваното подрачје ..	56
2.6.1. Вардарска зона	57
2.6.2. Позицијата на Косово во оваа рамка	58
2.7. Геолошки контекст на подрачјето на проучување	60
2.8. Стратиграфска архитектура на областа Бајгора.....	62
2.9. Геогена контаминација во ултрамафичните масиви контролирани од серпентинизација и тектоника	64
3. ЦЕЛ НА ДИСЕРТАЦИЈАТА	71
3.1. Предмет на истражувањето.....	71
3.2. Основна цел на истражувањето.....	71

3.3. Истражувачки задачи.....	71
3.4. Истражувачки прашања и работна хипотеза.....	72
3.5. Научен придонес на дисертацијата	72
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДЕЛ	73
4.1. Лабораториски методи	73
4.1.1. Подготовка на примероци за XRPD и SEM	76
4.1.2. Подготовка на примерок за тенок пресек	77
4.1.3. Аналитички методи: дифракција на прав со рендгенски зраци (XRPD)	79
4.1.4. Скенирачка електронска микроскопија со енергетско-дисперзивна спектроскопија (SEM–EDS).....	80
4.1.5. Геостатистичко моделирање и просторна визуелизација на дистрибуцијата на минералошките фази врз основа на XRPD податоци ...	81
5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА	83
5.1. Графичка распределба на минералошките фази	83
5.2. Описна статистика на минералошка анализа	87
5.3. Анализа на асиметрија и куртоза.....	94
5.4. Корелациона матрица на минералошка анализа	95
5.5. Анализа на главни компоненти на минералошки фази.....	98
5.6. Петрографска анализа на истражуваното подрачје	101
5.7. XRPD анализа на истражуваното подрачје	133
5.7. Просторна дистрибуција на минералошките фази во регионот Бајгора	196
5.8. Дискусија за резултатите	203
6. ЗАКЛУЧОЦИ И ПРЕПОРАКИ	205
6.1. Заклучоци.....	205
6.2. Препораки	206
7. ЛИТЕРАТУРА.....	209

СПИСОК НА СЛИКИ

Слика 1. (а) Депозити на азбест во регионот Бајгора, документиран од 1940-тите, и придружните појави; (б) појава на природен хризотил азбест	32
Figure 1. (a) The asbestos deposit in the Bajgora region, documented since the 1940s, and associated occurrences; (b) occurrences of naturally occurring chrysotile asbestos.....	32
Слика 2. Теренски експозиции на серпентинизирани ултрамафични карпи откриени со активности за изградба на патишта, кои покажуваат добро развиени минерални вени и фрактури исполнети со минерализација на влакнести серпентински групи.....	34
Figure 2. Field exposures of serpentinized ultramafic rocks revealed by road construction activities, showing well-developed mineral veins and fractures filled with fibrous serpentine group mineralization.....	34
Слика 3. Локација на примероци користени за минералошки и геостатистички анализи.	35
Figure 3. Location of samples used for mineralogical and geostatistical analyses...	35
Слика 4. Социо-економска и туристичка инфраструктура во регионот Бајгора: (а) панорамски поглед на планинскиот терен што го прикажува националниот патен коридор што ја поврзува Митровица со Подуево, илустрирајќи ја регионалната пристапност; (б) модерни приватни туристички вили кои го претставуваат развојот на инфраструктурата за планински туризам; (в) ресторански капацитети на отворено кои го одразуваат локалниот гастрономски туризам интегриран во природниот пејзаж.	39
Figure 4. Socio-economic and tourism infrastructure in the Bajgora region: (a) panoramic view of the mountainous terrain showing the national road corridor connecting Mitrovica with Podujevo, illustrating regional accessibility; (b) modern private tourist villas representing the development of mountain tourism infrastructure; (c) outdoor restaurant facilities reflecting local gastronomic tourism integrated within the natural landscape.	39
Слика 5. Просторна прегледна карта што ја прикажува географската положба на Митровица и областа Бајгора во Косово, вклучувајќи ги и локациите за земање примероци користени во оваа студија.	39

Figure 5. Spatial overview map showing the geographic position of Mitrovica and the Bajgora area within Kosovo, including the sampling locations used in this study.....	39
Слика 6. Геоморфолошки карактеристики на истражуваното подрачје Бајгора: (а) северниот сектор кој ја покажува зоната со највисока височина, карактеризиран со мазен ридско планински релјеф, заоблени гребени и релативно густа тревна покривка; (б) јужниот сектор кој илустрира пониски височини, поотворени падини и пошироки долиински форми, нагласувајќи ја топографската транзиција и геоморфолошката варијабилност во областа на проучување.....	41
Figure 6. Geomorphological characteristics of the Bajgora study area: (a) northern sector showing the highest elevation zone, characterized by smooth hilly mountain relief, rounded ridgelines, and relatively dense grassland cover; (b) southern sector illustrating lower elevations, more open slopes, and broader valley forms, highlighting the topographic transition and geomorphological variability within the study area ...	41
Слика 7. Хидрографска карта на студиското подрачје Бајгора која ја прикажува просторната дистрибуција на потоци и помали речни канали во рамките на истражната граница.....	42
Figure 7. Hydrographic map of the Bajgora study area showing the spatial distribution of streams and minor river channels within the investigation boundary.	42
Слика 8. Климатска карта на студиската област Бајгора која го илустрира просторниот опсег на истражуваната зона во однос на регионалните климатски граници.....	43
Figure 8. Climatic map of the Bajgora study area illustrating the spatial extent of the investigated zone in relation to regional climatic boundaries.....	43
Слика 9. Сателитска карта на студиската област Бајгора што ги прикажува границите на истражуваната зона и обемот на земање примероци, со вметнување што ја покажува нејзината локација во рамките на Косово.....	45
Figure 9. Satellite map of the Bajgora study area showing the boundaries of the investigated zone and sampling extent, with an inset indicating its location within Kosovo.	45
Слика 10. Топографски профил на подрачјето за истражување на азбест што ја прикажува просторната дистрибуција на минерализираните појави во солиден планински релјеф.	54
Figure 10. Topographic profile of the asbestos exploration area showing the spatial distribution of mineralized occurrences within a rugged hilly mountainous relief.....	54

Слика 11. Геолошки пресеци на азбестниот профил што ја илустрира внатрешната структура на минерализираните тела на серпентинит и геометријата на зоните со хризотил.....	55
Figure 11. Geological cross sections of the asbestos profile illustrating the internal structure of serpentinite mineralized bodies and the geometry of chrysotile bearing zones.....	55
Слика 12. Тектонските единици на алпската зона на судир помеѓу Источните Алпи и западна Турција, во чии рамки се наоѓа областа на проучување.	57
Figure 12. The tectonic units of the Alpine collision zone between the Eastern Alps and western Turkey, within which the study area is located.....	57
Слика 13. Геотектонска карта на Косово која ја прикажува неговата позиција во регионалната структурна рамка на централната Вардарска зона.	59
Figure 13. Geotectonic map of Kosovo showing its position within the regional structural framework of the central Vardar Zone.....	59
Слика 14. Геолошка карта на областа Бајгора и распоредот на литолошките единици и 20-те точки за земање примероци во рамките на ултрамафичниот масив поврзан со Вардарската зона. Серпентинитот доминира во областа и главно е ограничен со тектонски контакти, што укажува на структурна контрола над минерализацијата.....	61
Figure 14. Geological map of the Bajgora area and the distribution of lithological units and the 20 sampling points within the ultramafic massif associated with the Vardar Zone. Serpentinite dominates the area and is mainly bounded by tectonic contacts, indicating structural control over mineralization.	61
Слика 15. Стратиграфска колона на областа Бајгора која го прикажува континуитетот на геолошкото време што го опфаќа офиолитското подрум на Вардарската зона во истражуваното подрачје.	63
Figure 15. Stratigraphic column of the Bajgora area showing the continuity of geological time that covers the ophiolitic basement of the Vardar Zone in the research area.....	63
Слика 16. Мелница со пин Јан што се користи за мелење примероци; (б) примероци од прав по хомогенизација со тежина од 10 g, подготвени за испорака во лабораторија	77
Figure 16. (a) Pin Yan mill used for grinding rock samples to fine granulometry prior to mineralogical and geochemical analyses; (b) representative powdered samples	

(Samples 1-20) after homogenization and weighing to 10 g, prepared for submission to laboratory analysis.	77
Слика 17. (а) Подготовка на примероци од карпи и тенки пресеци за петрографска анализа; (б) репрезентативни теренски примероци; сечење и епоксидна монтажа; (в) свежо исечени површини; (г) исчистени и исушени блокови; (д) прогресивно полирање до ~ 30 μm ; (е) завршени тенки делови подготвени за анализа.	79
Figure 17. (a) Preparation of rock samples and thin sections for petrographic analysis; (b) representative field samples; cutting and epoxy mounting; (c) fresh cut surfaces; (d) cleaned and dried blocks; (e) progressive polishing to ~30 μm ; (f) completed thin sections ready for analysis.	79
Слика 18. XRPD дифрактограм кој ја илустрира интерпретацијата на врвовите на дифракција и идентификацијата на фази во анализата на дифракционата прашок со рендгенски зраци.	80
Figure 18. XRPD diffractogram illustrating the interpretation of diffraction peaks and phase identification in X-ray powder diffraction analysis.	80
Слика 19. SEM–EDS анализа на минералните фази: (а) SEM микрографија која ја илустрира минералната морфологија и микроструктурните карактеристики при големо зголемување, истакнувајќи ја текстурата, обликот и фиброзните карактеристики на зрната; (б) Спектарот на EDS кој го покажува елементарниот состав на анализираната област за полуквантитативна хемиска карактеризација на минералната фаза.	81
Figure 19. SEM–EDS analysis of mineral phases: (a) SEM micrograph illustrating mineral morphology and microstructural features at high magnification, highlighting grain texture, shape, and fibrous characteristics; (b) EDS spectrum showing elemental composition of the analyzed area for semi-quantitative chemical characterization of the mineral phase.	81
Слика 20. Просторна дистрибуција на минералошкиот состав на примероците претставени со кружни дијаграми.	83
Figure 20. Spatial distribution of mineralogical composition of samples presented using pie charts.	83
Слика 21. Радарските дијаграми 21а–21i ја илустрираат распределбата на минералните фази, истакнувајќи го локализираното збогатување на лизардит, хризотил и антигорит-Т.	87

Figure 21. Radar diagrams (21a–21i) illustrate the distribution of mineral phases, highlighting localized enrichment of lizardite, chrysotile, and antigorite-T.....	87
Слика 22. Искривување и куртоза на првата и втората фаза на минералите од серпентинската група идентификувани во анализираниите примероци: (а) искривување и (б) куртоза.	95
Figure 22. Skewness and kurtosis of the first and second phases of serpentine group minerals identified in the analyzed samples: (a) skewness and (b) kurtosis.....	95
Слика 23. Парцела на тридимензионална анализа на главна компонента (PCA) на првите три компоненти (Дим.1-Дим.3).	100
Figure 23. Three-dimensional principal component analysis (PCA) score plot of the first three components (Dim.1-Dim.3).....	100
Слика 24. Петрографски карактеристики на Примерокот 1: изменета ултрамафична карпа со реликтен клинопироксен, псевдоморфна замена на оливин и доказ за харцбургитски до лерзолитски протолит (а-һ).....	101
Figure 24. Petrographic features of Sample 1: altered ultramafic rock with relict clinopyroxene, pseudomorphic olivine replacement, and evidence of a harzburgitic to lherzolitic protolith (a-h).....	101
Слика 25. Петрографски карактеристики на примерокот 2: оливин, ортопироксен и клинопироксен со псевдоморфна серпентинска замена, што укажува на серпентинизација на лерзолитски протолит (а-д).	103
Figure 25. Petrographic features of Sample 2: olivine, orthopyroxene, and clinopyroxene with pseudomorphic serpentine replacement, indicating serpentinization of a lherzolitic protolith (a-d).....	103
Слика 26. Петрографски карактеристики на Примерокот 3: целосно серпентинизирана ултрамафична карпа со продорна мрежна текстура, криптокристална серпентинска матрица и отсуство на примарни минерали, што укажува на промена во напредната фаза (а-д).....	105
Figure 26. Petrographic features of Sample 3: fully serpentinized ultramafic rock with pervasive mesh texture, cryptocrystalline serpentine matrix, and absence of primary minerals, indicating advanced-stage alteration (a-d).	105
Слика 27. Петрографски тенок пресек на примерокот 4 кој покажува серпентинизација и деформација контролирана од вените (а-ф).....	106
Figure 27. Petrographic thin-section of Sample 4 showing serpentinization and vein-controlled deformation (a-f).....	107

Слика 28. Микроструктурни карактеристики на примерокот 5: замена на бастит по ортопироксен, мрежеста текстура серпентинизирана матрица и домени со магнетит (a-d).....	109
Figure 28. Microstructural characteristics of Sample 5: bastite replacement after orthopyroxene, mesh-textured serpentinized matrix, and magnetite-bearing domains (a-d).....	109
Слика 29. Микроструктурни карактеристики на примерокот 6 кои ги истакнуваат делумно зачуваните примарни минерали, серпентинизираната матрица и лизардитни вени контролирани со фрактура (a-f).	110
Figure 29. Microstructural characteristics of Sample 6 highlighting partially preserved primary minerals, serpentinized matrix, and fracture-controlled lizardite veins (a-f).	110
Слика 30. Текстурална еволуција на Примерокот 7 што укажува на серпентинизација во средна фаза, со промена на оливин и релативна стабилност на фазите на пироксен во порфирокластична рамка (a-ф).	112
Figure 30. Textural evolution of Sample 7 indicating intermediate-stage serpentinization, with alteration of olivine and relative stability of pyroxene phases within a porphyroclastic framework (a-f).	112
Слика 31. Микроструктурни карактеристики на примерокот 8 што прикажува добро развиена мрежа и бастит текстури со граници збогатени со магнетит и формирање на вени во доцна фаза (a-ф).	114
Figure 31. Microstructural characteristics of Sample 8 showing well-developed mesh and bastite textures with magnetite-enriched boundaries and late-stage vein formation (a-f).....	114
Слика 32. Репрезентативни текстури од Примерокот 9 кои покажуваат напредна серпентинизација со мрежи на фрактури исполнети со магнетит и селективно зачувување на клинопироксен (a-ф).	115
Figure 32. Representative textures of Sample 9 showing advanced serpentinization with magnetite-filled fracture networks and selective preservation of clinopyroxene (a-f).	115
Слика 33. Микроструктурни карактеристики на Примерокот 10 што прикажува фолиирана серпентинска матрица, текстури на панделки и магнетитни ленти порамнети со деформација (a- г).....	117

Figure 33. Microstructural characteristics of Sample 10 showing foliated serpentine matrix, ribbon textures, and deformation-aligned magnetite bands (a-d).....	117
Слика 34. Текстурална еволуција на Примерокот 11 што укажува на прогресивна серпентинизација со мобилизација на железо, сегрегација на магнетит и формирање на хидротермална вена долж тектонските патишта (а-ф).....	118
Figure 34. Textural evolution of Sample 11 indicating progressive serpentinization with iron mobilization, magnetite segregation, and hydrothermal vein formation along tectonic pathways (a-f).	118
Слика 35. Петрографски карактеристики на примерокот 12: баститизација со ортопироксен и серпентински минерали (лизардит, хризотил) кои формираат псевдоморфни текстури (а-д).....	120
Figure 35. Petrographic features of Sample 12: orthopyroxene bastitization and serpentine minerals (lizardite, chrysotile) forming pseudomorphic textures (a-d)...	120
Слика 36. Петрографски тенок пресек на примерокот 13 кој покажува интензивна деформација и фолијација во услови на високо напрегање (а-ф).....	121
Figure 36. Petrographic thin-section of Sample 13 showing intense deformation and foliation under high-strain conditions (a-f).	121
Слика 37. Петрографски тенок пресек од Примерокот 14 кој покажува напредна серпентинизација, баститска текстура и псевдоморфни домени богати со магнетит (а-д).....	123
Figure 37. Petrographic thin-section of Sample 14 showing advanced serpentinization, bastite texture, and magnetite-rich pseudomorphic domains (a-d).	123
Слика 38. Петрографски карактеристики на примерокот 15: добро развиена мрежна текстура по оливин, баститни псевдоморфи по ортопироксен и серпентински минерали (хризотил, лизардит) што укажува на статичка серпентинизација во стабилни услови (а-д).....	124
Figure 38. Petrographic features of Sample 15: well-developed mesh texture after olivine, bastite pseudomorphs after orthopyroxene, and serpentine minerals (chrysotile, lizardite) indicating static serpentinization under stable conditions (a-d).	124
Слика 39. Петрографски тенок пресек на примерокот 16 што ги прикажува карактеристиките на серпентинизација и тектонска деформација (а-ф).....	126
Слика 40. Петрографски карактеристики на примерокот 17: ултрафино-зрнести серпентинска матрица, катакластични текстури, дисперзиран магнетит и	

локализирани структури на смолкнување формирани при динамична деформација (а-д).	127
Figure 40. Petrographic features of Sample 17: ultrafine-grained serpentine matrix, cataclastic textures, dispersed magnetite, and localized shear structures formed under dynamic deformation (a-d).	127
Сл. 41. Петрографски карактеристики на Примерок 18: хомогенизирана серпентинска матрица, кршливо испукување и стокворк жилен систем што укажува на доцнофазна деформација (а-д).	129
Figure 41. Petrographic features of Sample 18: homogenized serpentine matrix, brittle fracturing, and stockwork vein system indicating late-stage deformation (a-d).....	129
Слика 42. Петрографски тенок пресек од Примерокот 19 кој покажува интензивна кршлива деформација и катакластична текстура (а-д).....	130
Figure 42. Petrographic thin-section of Sample 19 showing intense brittle deformation and cataclastic texture (a-d).....	130
Слика 43. Петрографски карактеристики на Примерокот 20: ортопироксенски порфиорокласти во серпентинизирана матрица, милонитична фолијација и дуктилно-кршлива деформација на зоната на смолкнување (а-ф).....	132
Figure 43. Petrographic features of Sample 20: orthopyroxene porphyroclasts within a serpentinized matrix, mylonitic foliation, and ductile-brittle shear zone deformation (a-f).....	132
Слика 44. XRD спектар на примерок 1 со идентификувани минерални фази и полуквантитативни пропорции.	134
Figure 44. XRD spectrum of Sample 1 with identified mineral phases and semi-quantitative proportions.	134
Слика 45. XRD спектар на примерок 2 со идентификувани серпентин фази и полуквантитативни минерални пропорции.	135
Figure 45. XRD spectrum of Sample 2 with identified serpentine phases and semi-quantitative mineral proportions.	135
Слика 46. XRD спектар на примерок 3 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.	136
Figure 46. XRD spectrum of Sample 3 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.	136
Слика 47. XRD спектар на примерок 4 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.	137

Figure 47. XRD spectrum of Sample 4 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.....	137
Слика 48. XRD спектар на примерок 5 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.....	138
Figure 48. XRD spectrum of Sample 5 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.....	138
Слика 49. XRD спектар на примерок 6 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.....	139
Figure 49. XRD spectrum of Sample 6 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.....	139
Слика 50. XRD спектар на примерок 7 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.....	140
Figure 50. XRD spectrum of Sample 7 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.....	140
Слика 51. XRD спектар на примерок 8 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.....	141
Figure 51. XRD spectrum of Sample 8 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.....	141
Слика 52. XRD спектар на примерок 9 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.....	143
Figure 52. XRD spectrum of Sample 9 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.....	143
Слика 53. XRD спектар на примерок 10 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.....	144
Figure 53. XRD spectrum of Sample 10 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.....	144
Слика 54. XRD спектар на примерок 11 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.....	145
Figure 54. XRD spectrum of Sample 11 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.....	145
Слика 55. XRD спектар на примерок 12 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.....	146
Figure 55. XRD spectrum of Sample 12 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.....	146

Слика 56. XRD спектар на примерок 13 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.....	147
Figure 56. XRD spectrum of Sample 13 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.....	147
Слика 57. XRD спектар на примерок 14 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.....	148
Figure 57. XRD spectrum of Sample 14 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.....	148
Слика 58. XRD спектар на примерок 15 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.....	149
Figure 58. XRD spectrum of Sample 15 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.....	149
Слика 59. XRD шема од примерокот 16 што ги прикажува идентификуваните минерални фази и нивното релативно изобилство.....	150
Figure 59. XRD pattern of Sample 16 showing identified mineral phases and their relative abundances.	150
Слика 60. XRD дифрактограм на примерокот 17 кој ги илустрира идентификуваните минерални фази и нивните релативни пропорции.	152
Figure 60. XRD diffractogram of Sample 17 illustrating the identified mineral phases and their relative proportions.....	152
Слика 61. Шема на дифракција на X-зраци од Примерокот 18 што го истакнува идентификуваниот минерален состав и релативните фазни изобилства.....	153
Figure 61. X-ray diffraction pattern of Sample 18 highlighting the identified mineral assemblage and relative phase abundances.	153
Слика 62. XRPD шема од примерокот 19 што го прикажува фазниот состав и полуквантитативната дистрибуција на идентификуваните минерали.	154
Figure 62. XRPD pattern of Sample 19 showing phase composition and semi-quantitative distribution of identified minerals.....	154
Слика 63. Резултати од XRD за примерокот 20 кои ги илустрираат идентификуваните минерални фази и нивното релативно изобилство.	155
Figure 63. XRD results for Sample 20 illustrating the identified mineral phases and their relative abundances.	155
Слика 64. SEM–EDX слики од примерокот 1 при различни зголемувања кои покажуваат микроструктурни карактеристики и минерална морфологија.....	156

Figure 64. SEM–EDX images of Sample 1 at different magnifications showing microstructural features and mineral morphology.	156
Слика 65. Спектарот SEM–EDS од примерокот 1 покажува елементарен состав и карактеристични врвови.	157
Figure 65. SEM–EDS spectrum of Sample 1 showing elemental composition and characteristic peaks.....	157
Слика 66. SEM–EDX микрографи од примерокот 2 кои ја илустрираат текстуралната варијабилност и микроструктурните карактеристики при различни зголемувања.....	158
Figure 66. SEM–EDX micrographs of Sample 2 illustrating textural variability and microstructural features at different magnifications.....	158
Слика 67. Спектарот на EDS од примерокот 2 кој ја истакнува елементарната дистрибуција и карактеристичните врвови.....	159
Figure 67. EDS spectrum of Sample 2 highlighting elemental distribution and characteristic peaks.....	159
Слика 68. SEM–EDX микрографи од Примерокот 3 кои прикажуваат хетерогени текстури и микроструктурни карактеристики на различни зголемувања.....	160
Figure 68. SEM–EDX micrographs of Sample 3 showing heterogeneous textures and microstructural features across different magnifications.....	160
Слика 69. Спектарот на EDS од примерокот 3 кој го прикажува елементарниот состав и дистрибуцијата на интензитетот на откриените елементи.	161
Figure 69. EDS spectrum of Sample 3 showing elemental composition and intensity distribution of detected elements.	161
Слика 70. SEM–EDX микрографи од Примерокот 4 кои ги истакнуваат текстуралните карактеристики и микроструктурните варијации при различни зголемувања.....	162
Figure 70. SEM–EDX micrographs of Sample 4 highlighting textural features and microstructural variations at different magnifications.	162
Слика 71. SEM–EDS елементарен состав на примерокот 4	163
Figure 71. SEM–EDS elemental composition of Sample 4.....	163
Слика 72. SEM–EDX микрографи од Примерокот 5 кои прикажуваат повеќефазни текстури и фино зрнести микроструктурни карактеристики со различни зголемувања.....	164

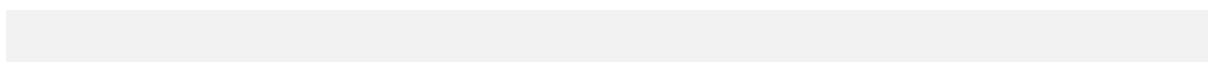
Figure 72. SEM–EDX micrographs of Sample 5 depicting multiphase textures and fine-grained microstructural features at varying magnifications.....	164
Слика 73. SEM-EDS спектар на примерок 5 кој го илустрира елементарниот состав и дистрибуцијата на откриените елементи.	165
Figure 73. SEM-EDS spectrum of Sample 5 illustrating elemental composition and distribution of detected elements.	165
Слика 74. SEM–EDX микрографи од Примерокот 6 кои илустрираат грануларни текстури и микроструктурна хетерогеност при повеќекратни зголемувања. ...	166
Figure 74. SEM–EDX micrographs of Sample 6 illustrating granular textures and microstructural heterogeneity at multiple magnifications.	166
Слика 75. Спектарот на EDS од примерокот 6 кој го истакнува елементарниот состав и интензитетот на карактеристичните врвови.	167
Figure 75. EDS spectrum of Sample 6 highlighting elemental composition and intensity of characteristic peaks.....	167
Слика 76. SEM–EDX микрографи од Примерокот 7 кои прикажуваат влакнести и ламеларни микроструктури на различни зголемувања.	168
Figure 76. SEM–EDX micrographs of Sample 7 showing fibrous and lamellar microstructures across different magnifications.	168
Слика 77. Спектарот на EDS од примерокот 7 кој го прикажува елементарниот состав и дистрибуцијата на откриените елементи.	169
Figure 77. EDS spectrum of Sample 7 showing elemental composition and distribution of detected elements.	169
Слика 78. SEM–EDX микрографи од примерокот 8 кои илустрираат сложени повеќефазни текстури и влакнести микроструктури при зголемени зголемувања.	170
Figure 78. SEM–EDX micrographs of Sample 8 illustrating complex multiphase textures and fibrous microstructures at increasing magnifications.	170
Слика 79. ЕДС анализа на Примерокот 8 покажува елементарен состав и карактеристични енергетски врвови.....	171
Figure 79. EDS analysis of Sample 8 showing elemental composition and characteristic energy peaks.	171
Слика 80. SEM–EDX микрографи од Примерокот 9 кои прикажуваат зрнести текстури и микрокристални агрегати со различни зголемувања.	172

Figure 80. SEM–EDX micrographs of Sample 9 showing granular textures and microcrystalline aggregates at different magnifications.	172
Слика 81. Спектарот на EDS од примерокот 9 кој го илустрира елементарниот состав и дистрибуцијата на откриените елементи.	173
Figure 81. EDS spectrum of Sample 9 illustrating elemental composition and the distribution of detected elements.	173
Слика 82. SEM–EDX микрографи од примерокот 10 кои илустрираат хетерогени површински текстури и ситнозрнести микроструктури при повеќекратни зголемувања.....	174
Figure 82. SEM–EDX micrographs of Sample 10 illustrating heterogeneous surface textures and fine-grained microstructures at multiple magnifications.....	174
Слика 83. Спектарот на EDS од примерокот 10 кој го покажува елементарниот состав и карактеристичната врвна дистрибуција.	175
Figure 83. EDS spectrum of Sample 10 showing elemental composition and characteristic peak distribution.....	175
Слика 84. SEM слики од Примерокот 11 кои покажуваат микроструктура и текстурални карактеристики при различни зголемувања.....	176
Figure 84. SEM images of Sample 11 showing microstructure and textural features at different magnifications.	176
Слика 85. Спектарот на EDS од Примерокот 11 кој го илустрира елементарниот состав и врвната дистрибуција.....	177
Figure 85. EDS spectrum of Sample 11 illustrating elemental composition and peak distribution.....	177
Слика 86. SEM слики од примерокот 12 кои покажуваат микроструктура и ламеларно-vlakнести текстури со различно зголемување.....	178
Figure 86. SEM images of Sample 12 showing microstructure and lamellar–fibrous textures at varying magnifications.....	178
Слика 87. Спектарот на EDS од примерокот 12 кој го покажува елементарниот состав и карактеристичните врвови.	179
Figure 87. EDS spectrum of Sample 12 showing elemental composition and characteristic peaks.....	179
Слика 88. SEM слики од примерокот 13 кои ја илустрираат микроструктурата и текстуралната варијабилност при различни зголемувања.....	180

Figure 88. SEM images of Sample 13 illustrating microstructure and textural variability at different magnifications.	180
Слика 89. Спектарот на EDS од примерокот 13 кој ја истакнува елементарната дистрибуција и релативните врвни интензитети.	181
Figure 89. EDS spectrum of Sample 13 highlighting elemental distribution and relative peak intensities.	181
Слика 90. SEM слики од примерокот 14 кои покажуваат микрокристална текстура и хетерогена морфологија низ зголемувањата.	182
Figure 90. SEM images of Sample 14 showing microcrystalline texture and heterogeneous morphology across magnifications.	182
Слика 91. Спектарот на EDS од примерокот 14 кој го илустрира елементарниот состав и шемата за дистрибуција на врвот.	183
Figure 91. EDS spectrum of Sample 14 illustrating elemental composition and peak distribution pattern.	183
Слика 92. SEM слики од примерокот 15 кои прикажуваат агрегати на честички и микроструктурни карактеристики при повеќекратни зголемувања.	184
Figure 92. SEM images of Sample 15 showing particle aggregates and microstructural features at multiple magnifications.	184
Слика 93. Спектарот на EDS од примерокот 15 кој го прикажува елементарниот состав и дистрибуцијата на елементите во трагови.	185
Figure 93. EDS spectrum of Sample 15 showing elemental composition and trace element distribution.	185
Слика 94. SEM слики од примерокот 16 кои илустрираат хетерогена микроструктура и агрегат текстури при различни зголемувања.	186
Figure 94. SEM images of Sample 16 illustrating heterogeneous microstructure and aggregate textures at different magnifications.	186
Слика 95. Спектарот на EDS од примерокот 16 што го истакнува елементарниот состав и дистрибуцијата на максималниот интензитет.	187
Figure 95. EDS spectrum of Sample 16 highlighting elemental composition and peak intensity distribution.	187
Слика 96. SEM слики од примерокот 17 кои прикажуваат микроструктурни карактеристики и текстурални варијации низ зголемувањата.	188
Figure 96. SEM images of Sample 17 showing microstructural features and textural variations across magnifications.	188

Слика 97. Спектарот на EDS од примерокот 17 кој го илустрира елементарниот состав и релативната врвна дистрибуција.	189
Figure 97. EDS spectrum of Sample 17 illustrating elemental composition and relative peak distribution.	189
Слика 98. Сликите на SEM од Примерокот 18 кои прикажуваат хетерогена текстура и агрегати слични на плочи при различни зголемувања.	190
Figure 98. SEM images of Sample 18 showing heterogeneous texture and plate-like aggregates at different magnifications.	190
Слика 99. Спектарот на EDS од примерокот 18 кој илустрира елементарен состав и сигнали за мали елементи во трагови.	191
Figure 99. EDS spectrum of Sample 18 illustrating elemental composition and minor trace element signals.	191
Слика 100. SEM слики од Примерокот 19 кои прикажуваат агрегати на честички и микроструктурни варијации при повеќекратни зголемувања.	192
Figure 100. SEM images of Sample 19 showing particle aggregates and microstructural variation at multiple magnifications.	192
Слика 101. Спектарот на EDS од примерокот 19 кој го прикажува елементарниот состав и дистрибуцијата на главните и елементите во трагови.	193
Figure 101. EDS spectrum of Sample 19 showing elemental composition and distribution of major and trace elements.	193
Слика 102. SEM слики од примерокот 20 кои илустрираат хетерогена повеќефазна текстура и ламеларно-грануларни микроструктури со различни зголемувања.	194
Figure 102. SEM images of Sample 20 illustrating heterogeneous multiphase texture and lamellar–granular microstructures at different magnifications.	194
Слика 103. Спектарот на EDS од примерокот 20 кој го покажува елементарниот состав и дистрибуцијата на главните и помалите елементи.	195
Figure 103. EDS spectrum of Sample 20 showing elemental composition and distribution of major and minor elements.	195
Слика 104. 3Д карта на просторна дистрибуција на Хризотил.	196
Figure 104. 3D spatial distribution map of Chrysotile.	196
Слика 105. 3Д карта на просторна дистрибуција на Лизардит.	197
Figure 105. 3D spatial distribution map of Lizardite.	197
Слика 106. 3Д карта на просторна дистрибуција на Антигорит.	198

Figure 106. 3D spatial distribution map of Antigorite	198
Слика 107. 3Д карта на просторна дистрибуција на Кварц	199
Figure 107. 3D spatial distribution map of Quartz	199
Слика 108. 3Д карта на просторна дистрибуција на Алумосиликати	200
Figure 108. 3D spatial distribution map of Aluminosilicate	200
Слика 109. 3Д карта на просторна дистрибуција на зеолити	201
Figure 109. 3D spatial distribution map of Zeolites	201
Слика 110. 3Д карта на просторна дистрибуција на Доломити	202
Figure 110. 3D spatial distribution map of Dolomites	202



СПИСОК НА ТАБЕЛИ

Табела 1. Минералошки состав на примероци од регионот Бајгора врз основа на анализа на рендгенска дифракција (XRPD)	88
Table 1. Mineralogical composition of samples from the Bajgora bedrock based on X-ray diffraction (XRPD) analysis	88
Табела 2. Описна статистика на минералните фази на серпентинска група идентификувани во анализираните примероци.....	91
Table 2. Descriptive statistics of serpentine group mineral phases identified in the analyzed samples.....	91
Табела 3. Статистички параметри (средни вредности, 95% интервали на доверба, резултати од t-тест и p-вредности) за проучуваните минералошки фази	92
Table 3. Statistical parameters (mean values, 95% confidence intervals, t-test results, and p-values) for the studied mineralogical phases	92
Табела 4. Пирсонова корелација матрица за минерални фази на серпентинска група и минерали од втора фаза идентификувани во анализираните примероци.	96
Table 4. Pearson correlation matrix for serpentine group mineral phases and second phase minerals identified in the analyzed samples.....	96
Табела 5. Карактеристичните вредности и процентот на варијанса објаснети со секоја главна компонента извлечена од PCA	99
Table 5. Characteristic values and percentage of variance explained by each principal component extracted from PCA.....	99

КРАТЕНКИ

SEM – Скенирачка електронска микроскопија

EDX - Енергетско-дисперзивна рендгенска спектроскопија

XRD - Дифракција на X-зраци

СЗО - Светска здравствена организација

EU-OSHA - Европска агенција за безбедност и здравје при работа

IARC - Меѓународна агенција за истражување на ракот

NOA - Природен азбест / naturally occurring asbestos

(СЗ-ЈИ) – северозапад - југоисток

ЗРМК - Индустриски центар во Љубљана

МОРЕБ - Базалт на среден океански гребен

1. ВОВЕД

Азбестот е група силикатни минерали со фиброзна структура, кои имаат мноштво карактеристики како што се отпорност на температура, добри физички и хемиски својства, поради што бил широко користен во 20 век.

Поради неговата лесна обработка, азбестот се користел и во градежништвото и електрониката, што му овозможило на овој минерален материјал широка примена.

Од минералошка гледна точка, тој е поделен на две главни групи: азбест од серпентинската група и азбест од групата на амфиболи. Азбестот од серпентинската група е претставен со хризотил; лизардит и антигорит се серпентински минерали, но не се стандардни азбестни видови. Областа што се проучува е област составена главно од серпентинити и област со високи очекувања за присуство на азбестни влакна.

Од еколошка гледна точка, проучувањето на присуството и дистрибуцијата на азбестот е од витално значење и е директно поврзано со животот и здравјето на граѓаните на областа Митровица, односно областа Шала на Бајгора (Shala e Bajgorës). Распространувањето на азбестните влакна е тесно поврзано со распространетоста на серпентинитните формации во оваа област, но антропогените активности придонесуваат за ширење на азбестот во почвата, водата и воздухот, поради што оваа област се претставува и како зона со потенцијален опасност од присуството на азбест.

Опасност од азбест за здравјето на луѓето е поврзан со вдишување на микроскопски азбестни влакна, кои, кога се во воздух, можат да навлезат во човечкиот респираторен систем, каде што можноста за нивно елиминирање и разградување е многу мала поради што тие можат да се задржат во белодробното ткиво и да предизвикаат сериозни здравствени последици. Затоа, врз основа на ова, потребно е да се проучи идентификацијата, видот на азбест и просторната распределба во ова подрачје.

Подрачјето Шала е Бајгора претставува геолошки и еколошки значајна област во северниот дел на Косово, изградена претежно од ултрамафични и серпентинизирани карпи што создаваат поволни услови за појава на азбестни минерали. Подрачјето има и историско значење, бидејќи во минатото тука

постоеле активности поврзани со појавите, преработката и експлоатацијата на азбест, што дополнително ја нагласува потребата од современа научна проценка на неговото присуство и еколошките импликации.

Во геолошка смисла, наоѓалиштето Бајгора е дел од централниот сегмент на Вардарската зона, која се одликува со сложена тектонска поставка, присуство на офиолитски единици и изразени деформациони структури. Серпентинизираниите карпи ја сочинуваат доминантната литолошка основа, а фрактурите, раседите и хидротермалните процеси имаат клучна улога во формирањето и локализацијата на хризотилната минерализација (Kosovo, 1982).

Областа околу појавите на минерализација е составена претежно од серпентинизирани перидотити кои се домаќини на минерализација на азбест. Овие перидотити претрпеа процеси на деформација што генерираа екстензивни фрактури, формирајќи мрежи од пукнатини со различни геометриски ориентации.

За да се идентификува процесот на формирање и присуството на овие азбестни минерали, беа користени инструментални техники како што е XRD за да се идентификуваат минералоски фази, да се испитаат нивните структури и облик преку SEM-EDX, а тенките пресеци беа користени за петрографска карактеризација на карпестите примероци.

1.1. Цел на студијата

Целта на оваа студија е да се утврдат појавата, минералоските карактеристики и просторната распределба на природниот азбест во регионот на Бајгора. Истражувањето има за цел да ги идентификува литолоските и структурните фактори што ја контролираат појавата на азбестните минерали и да обезбеди научна основа за согледување на нивните еколошки импликации. Посебен акцент е ставен на издвојување на зони со зголемен потенцијал на опасност и на потребата од понатамошен мониторинг.

1.2. Цели

1.2.1 Да се изврши теренско земање репрезентативни примероци од литолошки и структурно различни зони во регионот на Бајгора.

1.2.2 Да се идентификува минералошкиот состав на примероците со примена на XRPD анализа.

1.2.3 Да се опишат микроструктурните и петрографските карактеристики на примероците со SEM–EDS и анализа на тенки пресеци.

1.2.4 Да се утврди просторната распределба на азбестните минерали и нивната поврзаност со литолошките контакти, деформационите зони и тектонските структури.

1.2.5 Да се издвојат зони со зголемен потенцијал на опасност и да се предложат насоки за понатамошен мониторинг и управување.

Во продолжение, теоретскиот дел ги разработува минералошките, геолошките и еколошките аспекти на природниот азбест, како и регионалниот контекст на појавата на азбестните минерали во Бајгора. Врз таа основа, во наредните поглавја се дефинираат целите на истражувањето, применетата методологија и интерпретацијата на добиените резултати.

2. ТЕОРЕТСКИ ДЕЛ

Научно, азбестот спаѓа во групата природни силикатни минерали кои имаат фиброзна структура, кои имаат својства и висока отпорност на топлина, механичко абење и хемиско дејство.

Азбестот како минерал е поделен на две главни групи од минералошка перспектива: серпентинска група и амфиболска група. Во првата серпентинска група се наоѓа минералот хризотил, познат како бел азбест, кој е најчест минерал по форма. Во однос на формирањето, минералот хризотил главно се наоѓа во ултрамафични карпи како резултат на процесот на серпентинизација на оливинските и пироксенските минерали. Додека групата амфиболни минерали вклучува кроцидолит (син азбест), амозит (кафеав азбест), тремолит, актинолит и антофилит. Минералите од втората група обично се поврзуваат со изменети метаморфни и ултрамафични карпи, како и со области погодени од тектонска и хидротермална активност (Klein, 2007).

Во однос на хемискиот состав, азбестните минерали го имаат следниот состав: силициум (Si), магнезиум (Mg), железо (Fe), калциум (Ca), натриум (Na) и кислород (O), а во некои случаи може да биде присутен и алуминиум (Al). Минералот хризотил има општа хемиска формула $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ и се карактеризира со висока содржина на магнезиум и силициум диоксид. Додека минералите од амфиболната група содржат поголеми количини на железо, калциум и натриум, што влијае на нивните физички својства и минералошка стабилност (Klein, 2007).

2.1. Азбест во Бајгора

Студијата започна со почетната фаза, која вклучува собирање на теренски податоци, вклучувајќи геолошки информации за литолошки формации, присуство на минерали што содржат азбест и статистички податоци поврзани со испитуваните населби. Историските записи покажуваат дека областа на проучување служела како извор на екстракција на азбестни минерали пред Втората светска војна, а остатоците од депозитите на рударски отпад остануваат видливи на терен (види Слика 1).



Слика 1. (а) Депозити на азбест во регионот Бајгора, документирани од 1940-тите, и придружните појави; (б) појава на природен хризотил азбест
Figure 1. (a) The asbestos deposit in the Bajgora region, documented since the 1940s, and associated occurrences; (b) occurrences of naturally occurring chrysotile asbestos

2.2. Геолошко и структурно земање примероци

Примероците од карпите беа собрани во рамките на истражуваната област со користење на стратегија за таргетирано земање примероци дизајнирана да ја претстави литолошката варијабилност, структурните карактеристики и условите за пристапност на изложените карпи (Слика 2). Локациите за земање примероци беа намерно избрани за да се покријат главните ултрамафични литологии, серпентинизирани зони и литолошки контакти со околните карбонатни и седиментни единици. Посебен акцент беше ставен на областите погодени од тектонска активност, вклучувајќи ги раседите и смолкнувањето зони, за кои е познато дека го фаворизираат развојот на азбестиформните минерали (Слика 2) (Këpuska, 1984).

За секоја точка на земање примероци, географската положба беше снимена со помош на уред GPS 60CSx во рамките на координатниот систем KosRef, обезбедувајќи точна просторна локализација. Геолошките и морфолошките карактеристики беа документирани на терен, а на секој примерок му беше доделен единствен идентификациски код.

Собрани се вкупно 20 примероци, од кои осумнаесет одговараат на серпентински формации што содржат влакнести минерали, додека два примерока покажаа посебен минералоски состав и структурни карактеристики и беа класифицирани како дел од седиментни карпести формации.

По лабораториските анализи, беше извршена просторна анализа на дистрибуцијата на влакнести минерали и прелиминарна проценка на опасноста со користење на алатки за просторна анализа како ArcGIS 10.7 и Golden Surfer Software каде податоците од примерокот беа интегрирани со литолошки и структурни информации (Mellini, 2013).

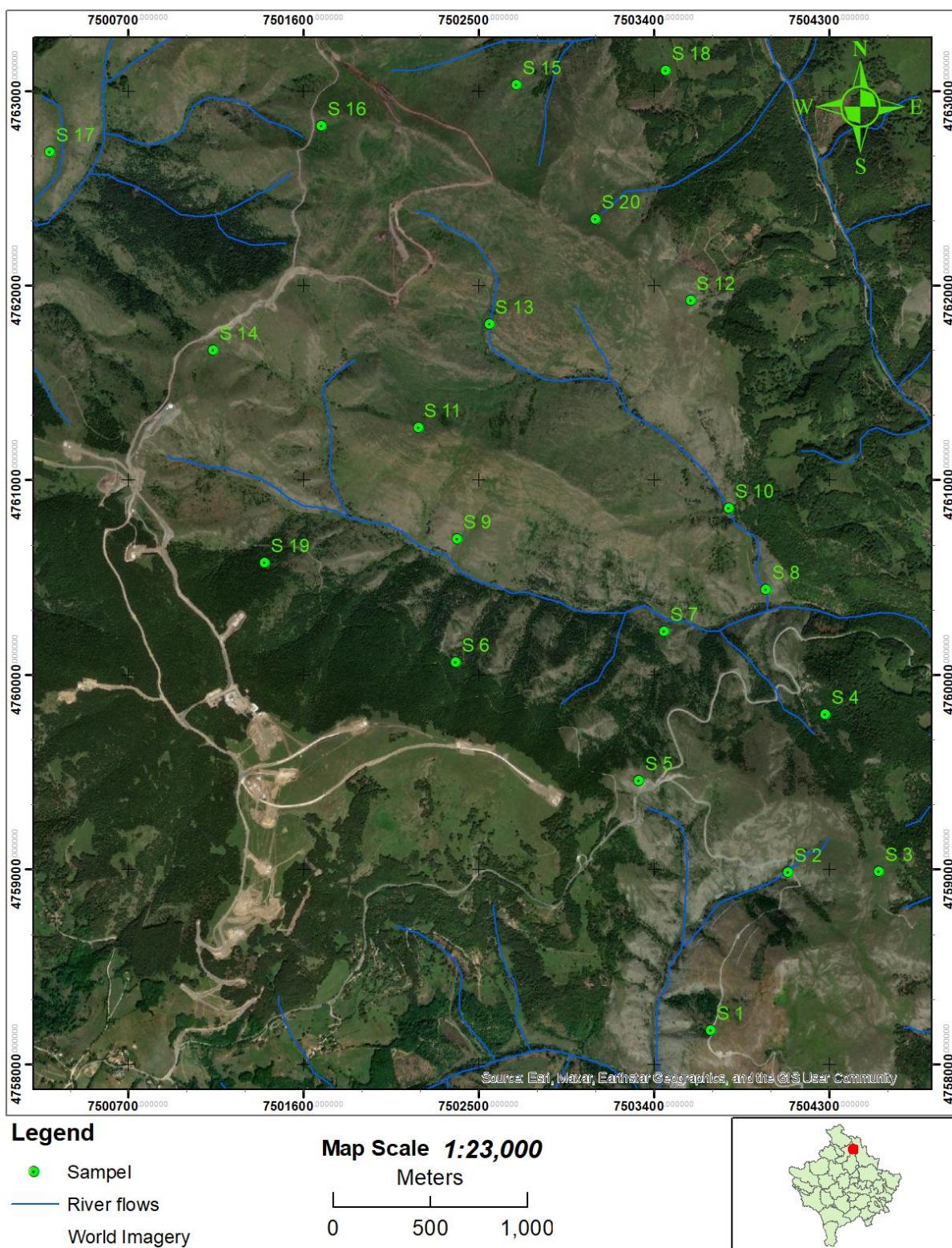
Локациите за земање примероци беа избрани врз основа на следните главни критериуми:

- Претставување на главните литолошки единици;
- Близина до литолошки контакти;
- Присуство на серпентинизација и фиброзни текстури;
- Сеопфатна просторна покриеност на студиската област.



Слика 2. Теренски експозиции на серпентинизирани ултрамафични карпи откриени со активности за изградба на патишта, кои покажуваат добро развиени минерални вени и фрактури исполнети со минерализација на влакнести серпентински групи.

Figure 2. Field exposures of serpentinitized ultramafic rocks revealed by road construction activities, showing well-developed mineral veins and fractures filled with fibrous serpentine group mineralization.



Слика 3. Локација на примероци користени за минералошки и геостатистички анализи.
Figure 3. Location of samples used for mineralogical and geostatistical analyses

2.3. Геоморфолошки карактеристики на подрачјето на проучување

Митровица е една од најкомплексните и најзначајните географски области во Република Косово, и од социо-економска и од културна перспектива. Сместено е во северниот дел на земјата, на сливот на реката Ибр и Ситница, и на пресекот на неколку главни геолошки единици на балканската тектонска рамка, вклучувајќи ги Вардарските офиолитски појаси, метаморфните комплекси на масивот Дарданија и седиментните единици на косовскиот басен (Caterina Rinaudo, 2003; Schmid, 2008). Заедно, овие елементи формираат многу разновиден пејзаж во кој релјефот постепено преминува од ниските рамнини на југоисток кон изразените ридови и планини на северозапад, вклучувајќи го масивот Шала од Бајгора и геоморфолошките структури кои припаѓаат на единицата Копаник, со нерамни терени на рударската област Трепчан (Alastair Robertson, 2002). Висините во областа Митровица се движат од приближно 500 m надморска височина во градската и урбаната зона до над 1700 m во околните рурални и планински области.

Овој висински градиент создава преодна средина помеѓу континенталните и планинските климатски услови, со силно влијание врз биолошката разновидност, дистрибуцијата на природните ресурси и агроекономскиот и планинскиот туристички потенцијал на регионот. Геостратешката положба на Митровица историски е дефинирана со нејзината улога како комуникациски јазол меѓу централно Косово и северните балкански региони, еволуирајќи во важен економски центар уште од предримско време, кога Илирите Дарданци ги експлоатирале локалните минерални ресурси и продолжувајќи во римскиот период, кога Трепча стана главен центар за ископ на сребро и олово. Во текот на средниот век, Митровица и нејзиното административно јадро Стари Трг се одликувале со производство на благородни метали и се појавиле како клучни регионални центри на трговија и металургија, додека под отоманска власт градот одржувал административни, трговски и занаетчиски функции (Alastair Robertson, 2002; Sinani, 2026). Во текот на дваесеттиот век, особено во текот на југословенскиот период на индустријализација, градот Митровица и комплексот Трепча се развија во еден од најголемите рударски и металуршки системи во Југоисточна Европа и пошироко (Sinani, 2026). Оваа трансформација длабоко влијаеше на економијата, демографијата и урбанизацијата на Митровица, поттикнувајќи социјална структура вкоренета во индустриската работничка класа

и придонесувајќи за формирање на силен урбан идентитет тесно поврзан со рударството, технологијата и индустриската култура (Sinani, 2026; Margono, 1999). Денес, Митровица останува еден од регионите со најбогати ресурси во Косово, каде што повеќе од четириесет наоѓалишта Трепча содржат значителни количини олово, цинк, сребро, кадмиум, бизмут, галиум, индиум и други стратешки минерали (World Bank, 2020). Дополнително, наоѓалиштата на никел и хром во западниот дел на регионот, како и резервите на јаглен во јужните области, претставуваат голем индустриски и енергетски потенцијал.

Покрај своето минерално богатство, регионот е опремен со значителни водни ресурси, вклучувајќи ги реките Ибр, Ситница, Лушта и Трепча, како и акумулацијата на езерото Газивода, која е дел од критична национална инфраструктура и претставува клучна артерија за снабдување со вода, земјоделство, индустрија и производство на енергија (2003/18/EC, 2023).

Според најновите податоци од пописот на населението од 2024 година, општина Митровица има приближно 65.000 жители, кои се карактеризираат со релативно млада старосна структура и претежно албански етнички состав заедно со бошњачките, турските, српските, ромските, ашкалите и египетските заедници. Овој демографски состав одразува богата социјална и културна разновидност, обликувајќи ја Митровица како мултиетнички и мултикултурен урбан простор со испреплетени традиции и идентитети. Историски гледано, човечките ресурси се вкоренети во рударството, металургијата, индустриското инженерство, уметноста и музиката, додека образовните и културните институции како што се универзитетите, колежите, техничките училишта, младинските центри и Домот на културата играат значајна улога во развојот на професионалните капацитети на младите генерации. Културно, Митровица е нашироко позната како „градот на рокот“ во Косово, каде што продуцираат истакнати бендови и уметници кои придонеле за националните и регионалните музички сцени и го зајакнале карактеристичниот урбан идентитет заснован на креативноста, културната разновидност и уметничкиот израз. Материјалното и нематеријалното наследство на регионот ги рефлектира слоевите историски влијанија од илирски, римски, отомански и модерни елементи збогатени со традиционални носии, ритуали на областа Шала од Бајгора, препознатлива гастрономија и синтеза на традиција и модерност. Комбинацијата на геостратешка положба, разновиден релјеф, изобилство природни ресурси, човечки потенцијал и

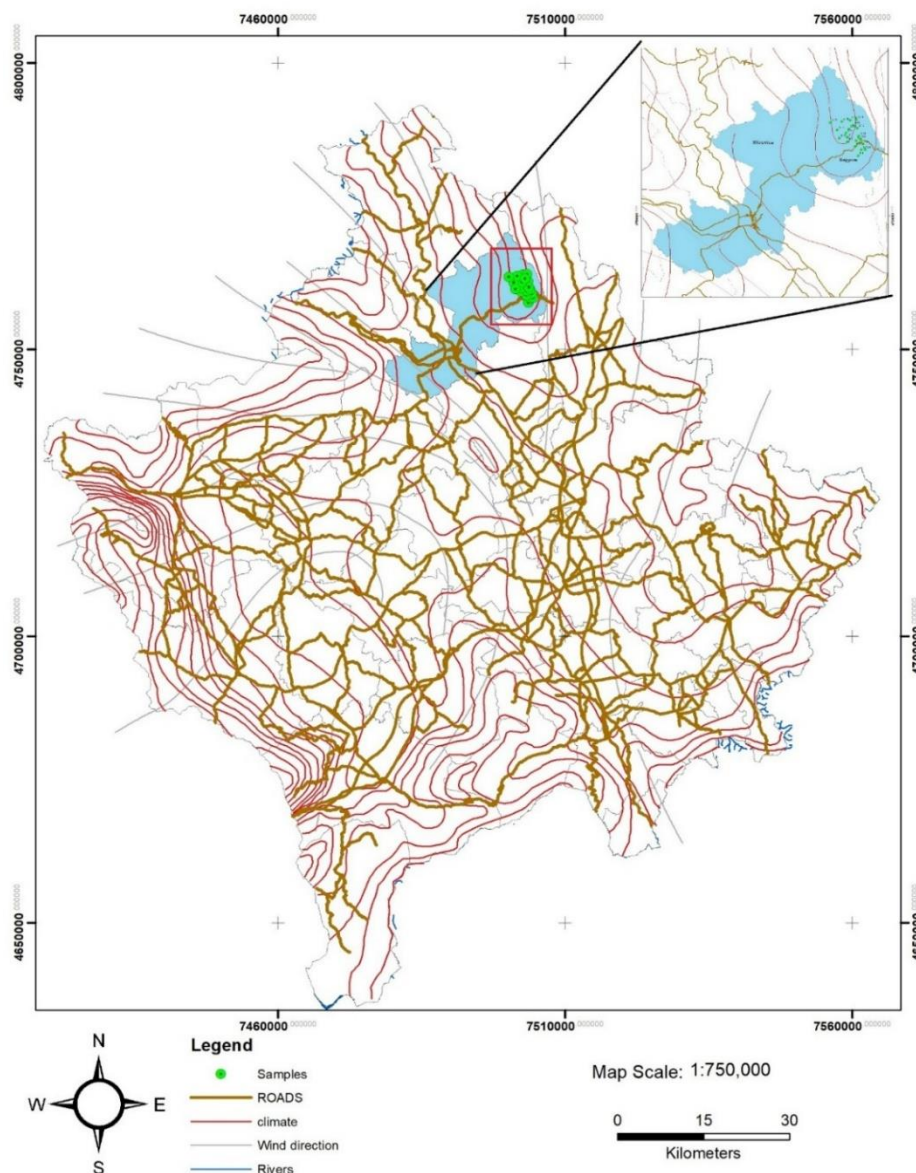
културни вредности ја прави Митровица атрактивна и важна област на проучување, што претставува јасен пример за интеракција помеѓу природните и социјалните фактори во обликувањето на територија со високо економско, историско и геополитичко значење на национално, регионално и меѓународно ниво (Team, 2023).

Регионот Бајгора се наоѓа во североисточниот дел на Косово. Се протега источно од Митровица, западно од Подуево и североисточно од Вучитри, припаѓајќи на јужниот сектор на масивот Копаник. Оваа област ги опфаќа селата и околните зони Бајгора, Качандол, Rrëzhanë, Баре, Селац, Ковачица, Добратин и Божан, меѓу другите. Бајгора се наоѓа во северниот дел на земјата, приближно 50 километри северно од Приштина, на надморска височина од 1203 до 1750 метри надморска височина, со население од околу 1.098 жители. Теренот околу Бајгора е претежно ридски. Највисоката точка во областа Бајгора се наоѓа на околу 1,7 km североисточно од селото и достигнува надморска височина од 1701 m надморска височина (Team, 2023) (MDP, 2020). Бајгора е релативно густо населена, со околу 222 жители на квадратен километар. Најблискиот урбан центар е Митровица, лоциран на 27 километри југозападно. Бајгора и неговата околина се карактеризираат со добро развиен мозаик од природна вегетација. Просечната годишна температура во селото е приближно 9 °C; Јули е најтопол месец, со просечна температура од околу 20 °C, додека декември е најстуден, во просек од -4 °C. Просечните годишни врнежи достигнуваат 931 mm, со мај како највлажен месец (околу 131 mm), а август најсув (околу 17 mm) (MDP, 2020). Населбата содржи основно училиште, локална медицинска клиника, ресторани, ски центар, десетици приватни туристички вили, релативно добро развиена патна инфраструктура и национален пат што ја поврзува Митровица со Подуево кој поминува низ Бајгора, зголемувајќи ја нејзината пристапност и регионално поврзување (Слика 4) (MDP, 2020).



Слика 4. Социо-економска и туристичка инфраструктура во регионот Бајгора: (а) панорамски поглед на планинскиот терен што го прикажува националниот патен коридор што ја поврзува Митровица со Подуево, илустрирајќи ја регионалната пристапност; (б) модерни приватни туристички вили кои го претставуваат развојот на инфраструктурата за планински туризам; (в) ресторански капацитети на отворено кои го одразуваат локалниот гастрономски туризам интегриран во природниот пејзаж.

Figure 4. Socio-economic and tourism infrastructure in the Bajgora region: (a) panoramic view of the mountainous terrain showing the national road corridor connecting Mitrovica with Podujevo, illustrating regional accessibility; (b) modern private tourist villas representing the development of mountain tourism infrastructure; (c) outdoor restaurant facilities reflecting local gastronomic tourism integrated within the natural landscape.



Слика 5. Просторна прегледна карта што ја прикажува географската положба на Митровица и областа Бајгора во Косово, вклучувајќи ги и локациите за земање примероци користени во оваа студија.

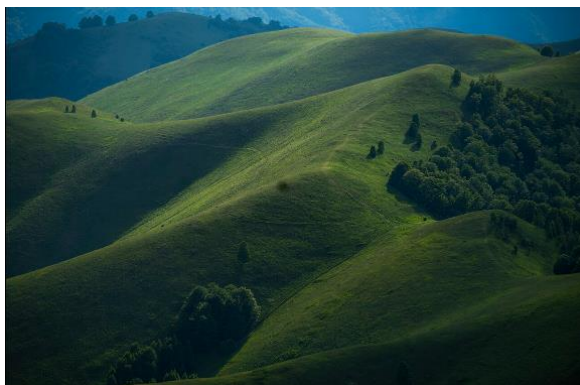
Figure 5. Spatial overview map showing the geographic position of Mitrovica and the Bajgora area within Kosovo, including the sampling locations used in this study.

Сликата ги интегрира топографските контури, патните мрежи, речните системи и климатските наклони за да обезбеди регионален контекст за рамката за земање примероци. Прилогот ја нагласува деталната позиција на секторот Бајгора во однос на околните хидрографски карактеристики, илустрирајќи ја прецизната просторна дистрибуција на собраните примероци и нивната врска со локалната морфологија и инфраструктура на теренот (Team, 2023).

2.3.1. Релјеф, хидрографија и клима на студиското подрачје

Областа на студијата се карактеризира со планински до ридски релјеф, директно под влијание на литолошкиот состав и тектонската структура на регионот. Доминацијата на филитските и ултрамафичните формации создава и позитивни и негативни мазни форми, генерирајќи брановиден пејзаж изразен преку благи падини, ливади и пошумени зони (Meholli, 2014).

Во секторите каде што се широко распространети серпентинитните масиви и харцбургитските формации добиени од мантија, теренот е генерално гол и карпест, со стрмни падини и ограничен развој на почвата, што ја одразува отпорноста на ултрамафичните литологии на атмосферски влијанија и педогенеза (MDP, 2020). Спротивно на тоа, областите под карбонат флиш и седиментни формации покажуваат пофрагментирана и неправилна морфологија на релјефот, во согласност со процесите на диференцијална ерозија типични за мешани литолошки терени (Burbank, 2013). Највисоки височини се забележуваат во северозападниот дел на истражуваната област, особено околу зоната Кодра е Барелит, додека најниските височини се забележани во југоисточниот сектор кај селото Добратин. Овие топографски контрасти вршат директна контрола врз дистрибуцијата на површинските води, обрасците на вегетација и човечките активности, илустрирајќи ја силната спој помеѓу геоморфолошката структура и еколошките процеси во планинските региони (Burbank, 2013; Meholli, 2014).



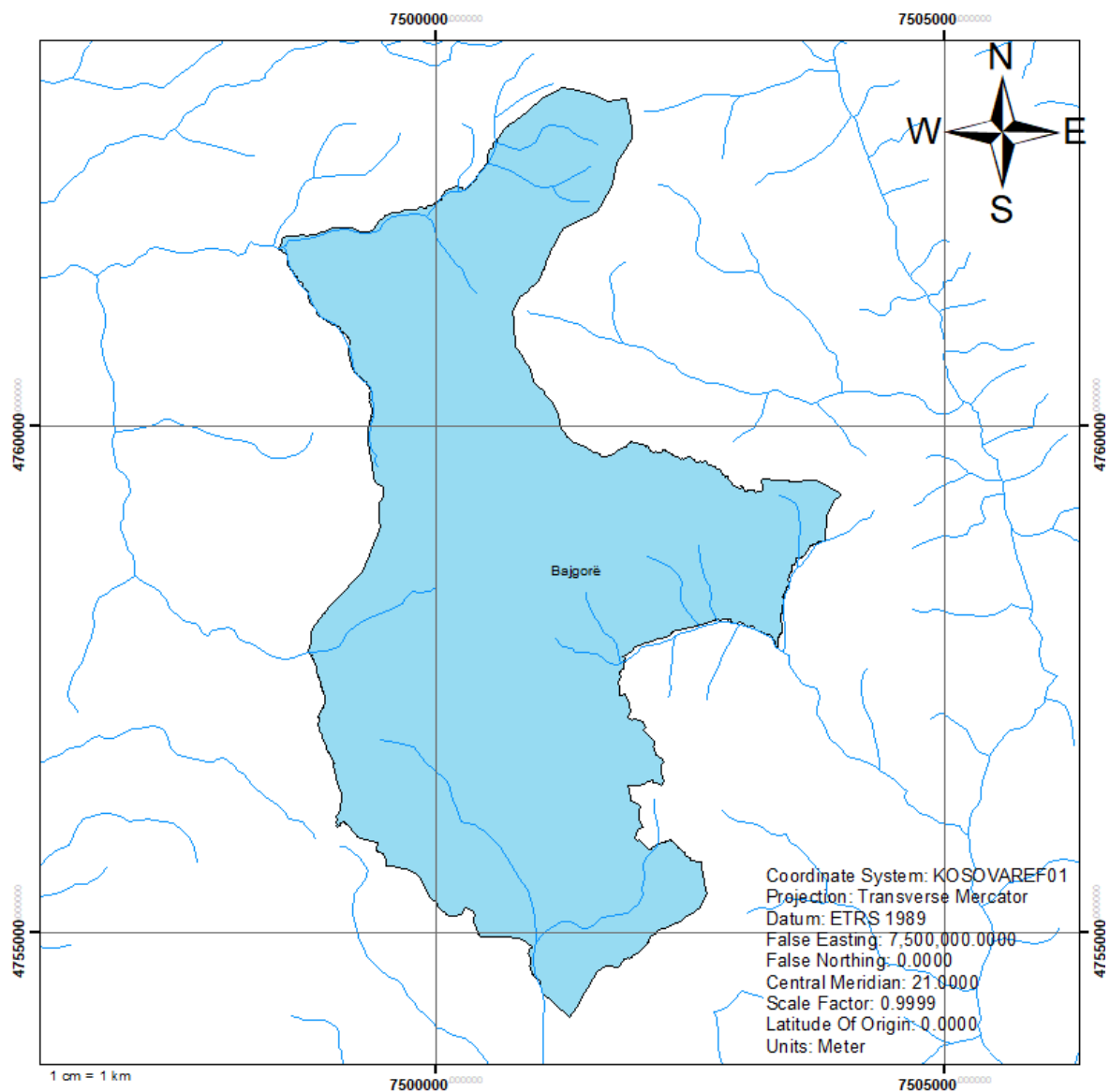
Слика 6. Геоморфолошки карактеристики на истражуваното подрачје Бајгора: (а) северниот сектор кој ја покажува зоната со највисока височина, карактеризиран со мазен ридско планински релјеф, заоблени гребени и релативно густа тревна покривка; (б) јужниот сектор кој илустрира пониски височини, поотворени падини и пошироки долиински форми, нагласувајќи ја топографската транзиција и геоморфолошката варијабилност во областа на проучување

Figure 6. Geomorphological characteristics of the Bajgora study area: (a) northern sector showing the highest elevation zone, characterized by smooth hilly mountain relief, rounded ridgelines, and relatively dense grassland cover; (b) southern sector illustrating lower elevations, more open slopes, and broader valley forms, highlighting the topographic transition and geomorphological variability within the study area

Хидрографија

Хидрографската мрежа на истражуваното подрачје е умерено развиена и е првенствено контролирана од релјефот и геолошката структура. Нерамниот терен и стрмните падини придонесуваат за формирање на мали потоци и привремени водотеци, кои достигнуваат максимален проток за време на периоди на интензивни врнежи од дожд и топење на снегот (Слика 6). Овие потоци придонесуваат за одводнување на областа кон поголеми регионални речни системи. Во серпентинитични и ултрамафични терени, променливата пропустливост на карпите влијае на инфилтрацијата на подземните води и развојот на локални извори, кои се важни за селското водоснабдување (Mathias & Montgomery, 2016; Islam, 2016). Хидрографскиот систем, исто така, игра значајна улога во геоморфолошките процеси, особено во површинската ерозија и транспортот на седиментот, како одраз на силната интеракција помеѓу хидролошката динамика и еволуцијата на пејзажот (Karamat, 2017; Karalis, 2014).

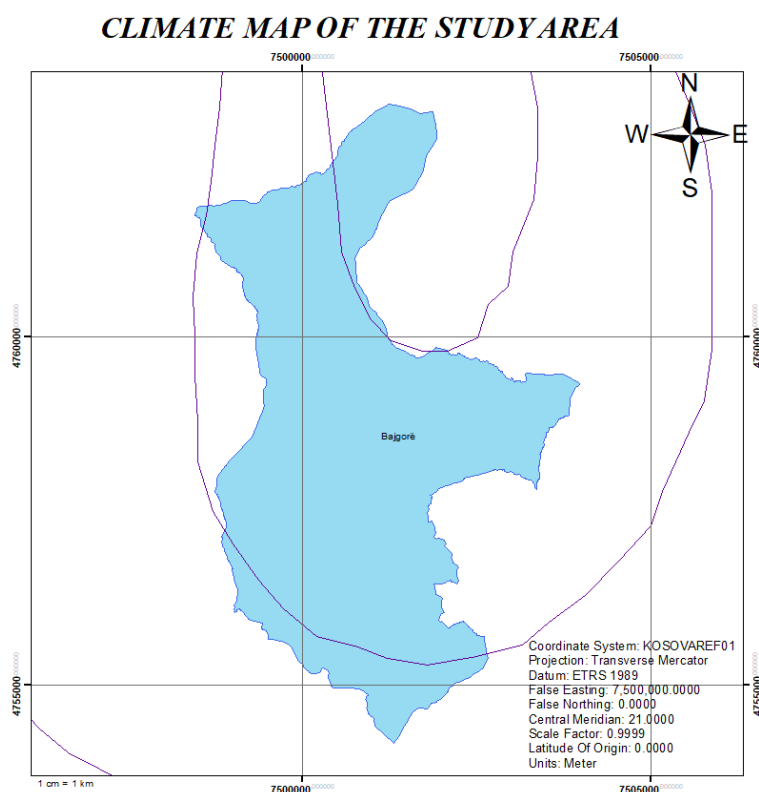
STREAMS AND RIVERS MAP OF THE STUDY AREA



Слика 7. Хидрографска карта на студиското подрачје Бајгора која ја прикажува просторната дистрибуција на потоци и помали речни канали во рамките на истражната граница.
 Figure 7. Hydrographic map of the Bajgorë study area showing the spatial distribution of streams and minor river channels within the investigation boundary.

Климата

Климата на областа што се проучува е типично континентална, под влијание на нејзината географска положба, како и на релјефот и надморската височина. Просечните годишни врнежи се движат приближно помеѓу 800 и 1000 mm, со изразена сезонска дистрибуција. Зимите се карактеризираат со ниски температури и обилни врнежи од снег, кои силно влијаат на хидролошкиот режим и стабилноста на падините, додека летата се релативно свежи на повисоките места и потопли во пониските зони (Welsh, 2021; Kaba, 2024). Овие климатски услови го фаворизираат развојот на природната вегетација и имаат директно влијание врз процесите на атмосферски влијанија на карпите и долгорочната еволуција на релјефот, како одраз на силната спојка помеѓу климата, геоморфологијата и динамиката на пејзажот (Barboza, 2014).



Слика 8. Климатска карта на студиската област Бајгора која го илустрира просторниот опсег на истражуваната зона во однос на регионалните климатски граници.

Figure 8. Climatic map of the Bajgora study area illustrating the spatial extent of the investigated zone in relation to regional climatic boundaries.

Конфигурацијата покажува дека областа на проучување се наоѓа во преодниот континентален климатски режим, каде што наклоните контролирани од релјефот

придонесуваат за локалните разлики во температурата, распределбата на врнежите и микроклиматските услови (Karamat, 2017).

Инфраструктура, економија и население

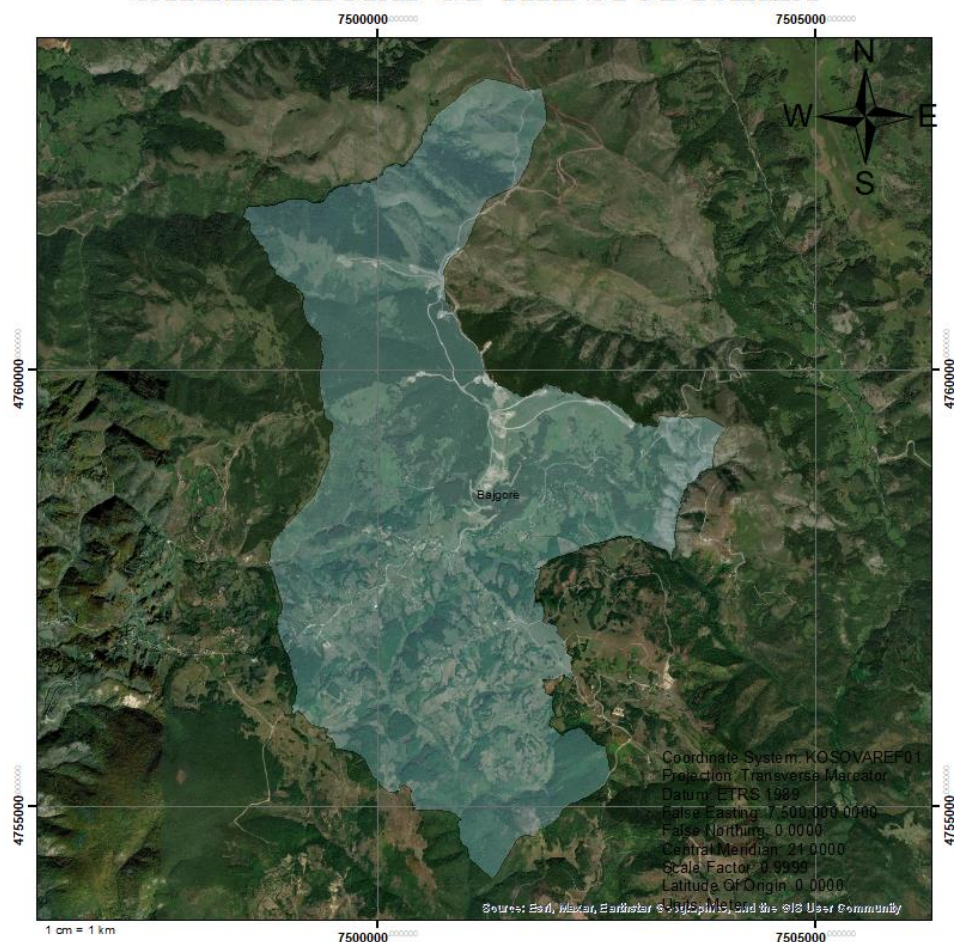
Регионот го минува магистралниот пат што ги поврзува Митровица-Бајгора-Качандол-Подуево, кој е асфалтиран и претставува клучен транспортен коридор, а истовремено служи и како важна пристапна рута за туризмот. Покрај тоа, мрежа од локални патишта ги поврзува различните села и населби (MDP, 2020). Повеќето од овие локални патишта се неасфалтирани, но остануваат во добра состојба и генерално се проодни и за лесни и за тешки возила. Исклучок е пристапниот пат до селото Rrëzhanë, по кој може да се помине само со возила со погон на четири тркала. Многу секундарни патишта во регионот првично беа изградени за шумски операции и се достапни првенствено со теренски возила или трактори. Колективно, оваа патна мрежа игра важна улога во подобрувањето на пристапноста и олеснувањето на теренските истраги, шумарските активности и локалниот економски развој (Bank, 2020; Margono, 1999).

Во последниве години, Бајгора доживеа постепена економска диверзификација, обележана со појавата на модерни ресторани и мали хотели, што укажува на развој на семеен туризам ориентиран кон природата. Поради своите живописни предели и поволните климатски и топографски услови, областа се повеќе се препознава како потенцијална регионална туристичка дестинација. Бајгора е посетена во сите четири годишни времиња; сепак, зимскиот туризам е особено значаен, особено за зимските спортови како што е скијањето. Планинскиот терен и погодните надморски височини овозможуваат одлични природни услови за понатамошен развој на скијањето и другите рекреативни активности на отворено, кои се очекува позитивно да придонесат за локалната економија (2003/18/EC, 2023).

Населението во областа првенствено се занимава со земјоделство и сточарство, кои остануваат главни традиционални економски активности. Во исто време, семејниот туризам покажа забележителен раст во последниве години, нудејќи дополнителни можности за приходи за локалните домаќинства. Неколку села во регионот се само делумно населени, бидејќи значителен дел од населението мигрирало кон урбаните центри како Митровица и Вуштрија во

потрага по вработување и подобри услови за живот (Sinani, 2025). Овој демографски тренд резултираше со намалена густина на рурално население, истовремено зголемувајќи ја важноста на иницијативите за одржлив рурален развој и диверзификацијата на локалните средства за живот (Margono, 1999; Barbaroza, 2014).

SATELLITE MAP OF THE STUDY AREA



DISTRIBUTION OF NATURAL ASBESTOS IN THE BAJGORA REGION AND ITS ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT

Student:
MSc. Bahri Sinani, Ph.D. Cand.

Professor:
Prof. Dr. Blažo Boev, Mentor

Legend
Bajgora



Слика 9. Сателитска карта на студиската област Бајгора што ги прикажува границите на истражуваната зона и обемот на земање примероци, со вметнување што ја покажува нејзината локација во рамките на Косово.

Figure 9. Satellite map of the Bajgora study area showing the boundaries of the investigated zone and sampling extent, with an inset indicating its location within Kosovo.

Појава на азбест во Косово во рамките на ултрамафично-серпентинитниот појас на Вардарската зона

Во Косово, појавите на азбест се доминантно поврзани со ултрамафичниот серпентинит појас кој се протега по сегменти од Вардарската зона и неговите тектонски контакти со соседните структурни единици во истражуваниот регион. Во оваа геолошка рамка, хризотилот (серпентински тип на азбест минерал) ја претставува главната сорта на азбест историски идентификувана и проучувана, со документираните локалитети на масивот Копаник и други серпентинизирани зони низ целата територија на Косово (Geological, 1984).

Систематските истражувања спроведени од Институтот за геолошки и геофизички истражувања помеѓу 1968 и 1980 година се фокусираа првенствено на хризотил азбест и ја воспоставија историската база на податоци и основните знаења за главните наоѓалишта и минерализираните појави во Косово, вклучувајќи ги областите како што се Бајгора, Пастасел, Обранке и Опоје.

2.4. Историја на азбестните истражувања во Косово

Претходните испитувања на азбестот во Косово претставуваа значаен геолошки проект чија цел е да го поддржи развојот на индустрискиот сектор во земјата, особено фабриката за цемент Шар во Елез Хан. Овие активности беа реализирани преку инвестиции и техничка поддршка од Институтот за геолошки и геофизички истражувања, кој беше главна институција одговорна за спроведување на студиите (Kosovo, 1982).

Примарната цел на истражувањето беше собирање и систематизација на податоци од официјални извори, подготовка на детални технички извештаи и спроведување на теренски испитувања преку кампањи за дупчење низ Косово, со цел да се проценат постоечките ресурси на азбест и минерализацијата и да се воспостави основа за понатамошно истражување (Kosovo, 1982). Главниот целен материјал беше хризотил, азбестиформен минерал и економски најзначајниот член на групата на серпентински азбест, кој се смета за стратешка сировина за индустриски апликации поради неговата термичка отпорност и технолошка корист (Geological, 1984).

Истражуваната област покриваше широка минерализирана зона што содржи азбест, која се протега низ северно Косово и вклучуваше неколку локалитети со

признат минералошки потенцијал. Истражувачките активности беа спроведени од мултидисциплинарни тимови одговорни за земање примероци, геолошка и структурна анализа на теренот и систематско документирање на резултатите (Kosovo, 1982; Sinani, 2026). Целокупната истражувачка програма беше поделена на две главни компоненти: површински геолошки, геофизички истраги и истражување на длабоки дупчење дизајнирани да ја потврдат длабочината, дебелината и квалитетот на вените што содржат азбест. Овој интегриран пристап обезбеди сеопфатно разбирање на минералниот потенцијал, просторната дистрибуција на минерализацијата, литолошките карактеристики на серпентинизираниите ултрамафни масиви и изводливоста за индустриска експлоатација (Elezaj, 2008).

Овие студии претставуваат документи од значителна историска и научна важност за неметалните минерални ресурси на Косово, бидејќи обезбедуваат вредни информации за геолошките карактеристики на наоѓалиштата, прелиминарни економски проценки и насоки за идно истражување. Сите примероци собрани за анализа во Косово беа спакувани, подготвени за транспорт и испратен во Институтот за геолошки и геофизички истражувања во Белград за лабораториска истрага (Geological, 1984).

Целото ова научно истражување беше преземено како одговор на зголемената побарувачка за азбест како сировина и ограничените производствени капацитети што постоеја во овој сектор во тоа време. Поради индустриските барања за искористување на овој минерал, се сметаше дека е неопходна детална евалуација на ресурсите на азбест во регионот Бајгора на Косово со цел да се воспостави научно заснован суров материјал и сеопфатен депозитен модел кој го одразува минералниот потенцијал на овие неметални ресурси (Geological, 1984).

Овој истражувачки пристап овозможи идентификација на развојните трендови во рударскиот сектор преку проценка на постоечките капацитети во геолошка смисла, квалитетот на минерализацијата, физичко-хемиските својства, условите за експлоатација и изгледите за одржлив индустриски развој во Косово (Geological, 1982).

Покрај анализите на примарните наоѓалишта, геолошките студии спроведени во тој период, исто така, обезбедија попис на појавите на азбест на целата територија на Косово. Сите потенцијално потенцијални појави беа поврзани со

серпентинизирани контексти на минерализација, кои претставуваат локалитети од посебен интерес за понатамошно истражување, како и области со потенцијален опасност за животната средина и јавното здравје. Според тоа, документираните локации сочинуваат важни елементи за севкупната проценка на потенцијалот на опасност, со оглед на нивниот капацитет да се сместат депозити на азбест и нивната можна улога како долгорочни извори на опасност доколку се нарушат или повторно се експлоатираат.

Во рамките на овие истражувања, беа спроведени детални анализи за да се оцени квалитетот и природната варијабилност на минерализацијата, како и нејзината економска вредност во времето на проучувањето. Подрачјата со препознатлив потенцијал, како што се зоната Бајгора во северна Митровица и регионот Пусто Село кај Раховец, беа систематски испитувани. Овие наоѓалишта беа оценети во однос на потенцијалот на геолошките ресурси, квалитетот на минерализацијата, преовладувачките услови за истражување и изгледите за можна експлоатација во поширокиот контекст на индустрискиот развој на Косово (Geological, 1982).

Надвор од наоѓалиштата вклучени во главните истражувања, студиите исто така презентираа попис на дополнителни појави на азбест низ Косово кои не биле вклучени во претходните програми за геолошки истражувања. Имајќи го предвид временскиот контекст на овие историски истражувања и геолошката еволуција на средини со серпентинизирана минерализација, ваквите појави беа идентификувани како особено важни за понатамошно проучување и во тоа време беа сметани како потенцијално вредни минерални ресурси за идна експлоатација.

Во периодот кога беа спроведени овие истражувања, здравствените ризици поврзани со влакната што содржат азбест сè уште не беа широко препознаени. Следствено, сите истражувани локалитети се сметаа за значајни елементи за проценка на природните капацитети и ресурсите на азбест, бидејќи тие се сметаа за економски ветувачки извори и како дел од долгорочна развојна стратегија заснована на истражување и искористување на овој минерал, кој во тоа време се сметаше за суровина со значителна економска вредност.

Депозитот на азбест од типот на хризотил во Бајгора, врз основа на испитувања спроведени помеѓу 1900 и 1980 година, претставува еден од најкарактеристичните примери на минерализација поврзана со

серпентинизираниите ултрамафни масиви на југоисточниот сегмент на структурната единица Копаоник во рамките на Вардарската зона (Evans, 2010; Goldstein, 2003).

Од геоморфолошка перспектива, наоѓалиштето се наоѓа во горниот дел на долината лоцирана северно од главниот пат Митровица - Подуево.

Според историските геолошки истражувања спроведени од Институтот за геолошки и геофизички истражувања помеѓу 1950 и 1980 година, хризотилот претставува најзначајниот тип азбест во однос на изобилството и распространетоста во серпентинскиот појас на Косово. Хризотилот е хидриран магнезиум силикат ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$) кој се карактеризира со исклучително фина влакнеста структура, висока термичка отпорност, хемиска стабилност и одлични изолациски својства, што историски доведе до значителен индустриски интерес.

На терен, хризотилот во Косово обично се јавува како влакнести вени со дебелина од милиметри до сантиметри, пополнување на фрактури, канали и системи на пукнатини како снопови од влакна дисперзирани во серпентинизирана матрица. Минеролошки, хризотилот се развива во напредни средини за серпентинизација и најчесто се поврзува со магнетит и секундарни карбонати формирани за време на реакциите на алтерација. Амфиболскиот азбест може да се појави локално во одредени ултрамафични серпентинитни масиви во зависност од метаморфните хидротермални услови и составот на карпите домаќини; сепак, во областа Бајгора, особено во зоните на примерокот, амфиболниот азбест не е идентификуван (Geological, 1984).

Иако историските истражувања во Косово првенствено се фокусираа на минерализацијата на хризотил, ултрамафичните серпентинизирани масиви може локално да содржат азбестиформни амфиболни фази. Дури и кога минерализацијата на амфиболите не претставува економско наоѓалиште и се јавува само во ниски концентрации, нејзиното еколошка важност останува значително поради разликите во однесувањето и упорноста на влакната во споредба со хризотилот (Kosovo, 1982).

Во проучуваната област Бајгора, присуството на хризотилни вени во минерализираните зони подразбира дека еколошките проценки мора да ги опфатат сите минерали што содржат азбест, без разлика дали тие припаѓаат на серпентински или можни амфиболски групи, особено во близина на фрактури, контакти и зони на засилена промена (Sinani, 2026).

Истрагите спроведени од Институтот за геолошки и геофизички истражувања идентификуваа неколку главни појави на хризотил во Косово (Sinani, 2026). Бајгора - Се наоѓа северозападно од Митровица и поврзана со фрактурирани серпентинити и харцбургитски тела. Фиброзните вени се генерално тенки и дисконтинуирани, што укажува на бројни мали, просторно дисперзирани извори со минералозна дистрибуција како мозаик.

Пастазел - Се карактеризира со тенки вени со ограничен континуитет и променлив квалитет на влакна. Променетите и брекцираните материјали се поподложни на механичко распаѓање и транспорт на седимент (Sinani, 2026).

2.5. Историја на азбестните истражувања во Бајгора

Азбестното наоѓалиште на хризотил во областа Бајгора претставува карактеристичен пример на минерализација поврзана со ултрамафни карпи и серпентинизирани ултрамафни масиви кои припаѓаат на југоисточниот сегмент на структурната целина Копаник во рамките на Вардарската зона (Schmid, 2020; Rinaudo, 2003). Географски, наоѓалиштето се наоѓа на приближно 3 km источно од селото Бајгоре, покрај каналот на потокот „Уџи и Кеќ“, чие име произлегува од контаминација на водата предизвикана од присуството на азбестни влакна на надморска височина помеѓу 1000 и 1250 m. Геоморфолошки, локалитетот лежи во горниот дел на долината што обезбедува поволни услови за површинска изложеност на бројни тела на серпентинити, овозможувајќи ефикасно да функционираат тектонските, метаморфните и хидротермалните процеси во оваа област. Иако регионалниот пат што ги поврзува Подујево и Митровица нуди ограничена изложеност, алтернативните рути преку Стари Трг, Баре и Бајгоре обезбедуваат постабилен пристап на терен, што е од суштинско значење за геолошките операции и транспортот на примероците (Geological, 1984).

Фрактурите обично се случуваат под агли од 70° /30-50°, а овие зони најчесто содржат пломби од хризотил азбестни влакна. Минерализацијата се случува целосно во фиброзна форма поврзана со напредни процеси на серпентинизација, во кои интензивната активност на хидротермалната течност одигра одлучувачка улога во формирањето на влакнести мрежи кои вообичаено се појавуваат паралелни со деформационите структури на карпата домаќин. Честото присуство на силно хидротермално изменети зони покажува дека

циркулацијата на топли минерализирани течности збогатени со магнезиум и силициум диоксид е главниот контролен фактор во формирањето на азбестните влакна (Macher, 2025).

Од петрографска и минералозна перспектива, хризотилот се јавува како минерализација на фиброзен агрегат поставен по тектонските фрактури, често достигнувајќи значителни дебелини. Овие азбестни фибрили претставуваат трансформиран материјал добиен од метасоматски оливин и пироксени кои биле конвертирани во серпентин под услови на низок до умерен притисок и температури карактеристични за метаморфизмот на зелените шкрилци. Достапните податоци сугерираат дека минерализацијата на можната плиоценска старост може да биде поврзана со процесите на тектонска деформација кои ги реактивирале фрактурите и создале поволни патишта за инфилтрација на течност, овозможувајќи формирање на нови генерации на хризотилски вени (Macher, 2025; Malgorzata, 2025; Krówczyńska, 2019).

Поради своите геолошки карактеристики, овој локалитет привлече значителен интерес за понатамошни петрографски, структурни и металогенски истражувања, бидејќи се сметаше за погодна област за економски развој во клучен сегмент од Вардарската зона, која е нашироко препознатлива по изобилната ултрамафична и офиолитска минерализација. Затоа, сеопфатното разбирање на процесите на серпентинизација, генезата на азбестот и тектонските контроли на минерализацијата е од суштинско значење за изградба на металогенски модели на регионот и за проценка на геолошкото значење и опасностите од појавата на хризотил во другите сегменти на ултрамафичниот појас на Косово (Sinani, 2026).

2.5.1. Минерализација на азбест и неговите главни карактеристики

Минерализацијата на азбестот, особено на хризотилот, во областа Бајгора се јавува како влакнест систем развиен во серпентинизиран ултрамафичен карпест масив во долината на потокот „Уџи и Кеќ“. Оваа минерализација е структурно контролирана од системи на фрактура и силно изменети зони формирани за време на раните и доцните тектонски фази на деформација, кои служеле како канали за инфилтрација на хидротермални течности збогатени со силициум диоксид и магнезиум неопходни за формирање на хризотил влакна (Goovaerts, 1997; Kosovo, 1982).

Минералните тела во истражуваната област се јавуваат како морфолошки неправилни, но меѓусебно поврзани единици, кои покажуваат изразено зонирање во рамките на карпите домаќини и достигнуваат дебелини до 20 m. Нивната доминантна ориентација го следи структурниот тренд северозапад-југоисток (СЗ-ЈИ), рефлектирајќи го регионалниот систем на фрактури што управува со тектонската рамка на серпентинитниот блок. Латералното поместување на овие тела достигнува 200-250 m, додека длабочината на минерализацијата обично се движи од 50 до 100 m, што укажува на претежно вертикален минерализациски систем со релативно стабилен вертикален континуитет (Geological, 1984).

Структурно, не се забележани пост-тектонски поместувања кои би можеле да ја модифицираат првобитната положба на минералните тела, што укажува дека минерализацијата го зачувала својот примарен формациски интегритет и не била значително засегната од подоцнежните тектонски настани. Историските истражувања спроведени во претходниот век, вклучително и отворените геолошки ровови, идентификуваа неколку изолирани зони на хризотил влакна кои се јавуваат покрај фрактури и синклинални структури во изданијата на серпентинити (Kosovo, 1982). Овие влакна формираат сложени мрежи што претставуваат типична мрежна шема на кристална минерализација поврзана со интензивни процеси на хидротермална промена.

Ориентацијата и групирањето на фиброзните минерали се јавуваат во повеќе насоки со различни агли на натопување, што ја одразува структурната активност поврзана со деформација.

Главниот систем на фрактура, ориентиран приближно $70^{\circ}/30-50^{\circ}$, претставува најповолна зона на минерализација бидејќи таквите структури покажуваат помал

ефективен притисок и поголема тенденција за отворање, а со тоа го олеснува формирањето и растот на подебели и релативно подолги хризотилни влакна (Goldstein, 2003).

Минералните тела се состојат од мрежи со влакна со различни дебелини, кои обично се движат од 1-10 mm. Гранулометриската распределба покажува дека преовладуваат кратките влакна (1-2mm), иако се присутни и појави на подолги влакна. Лабораториските податоци покажуваат дека просечната должина на хризотилното влакно во Бајгора е приближно 1,5 mm, што одговара на минерализацијата формирана во раните фази на серпентинизација под умерен притисок и ниски до умерени температурни услови (Kosovo, 1982).

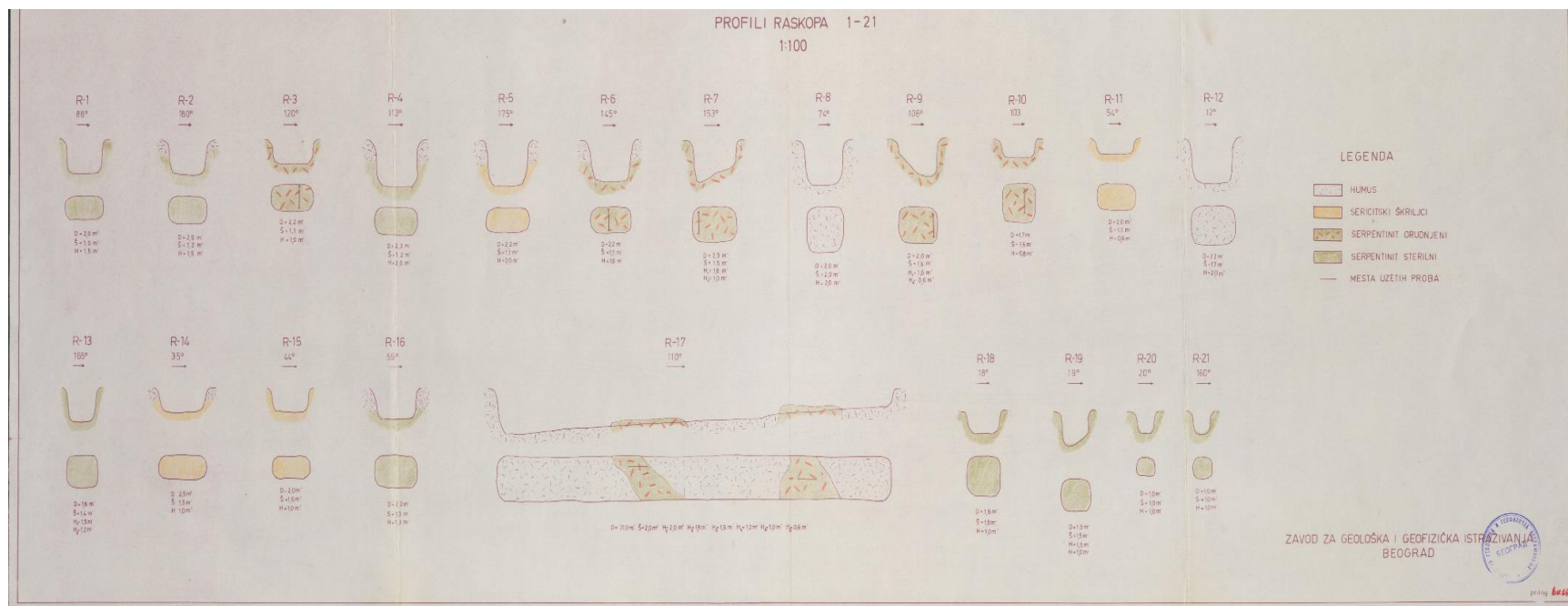
Важен геолошки фактор е ерозијата, која предизвика абразија и отстранување на горните делови на минералните тела. Главното минерализирано тело е делумно изложено и редистрибуирано од природни процеси и тектоника, со фрагменти транспортирани по коритото на потокот „Уџи и Кеќ“, што укажува на долготрајна историја на денудација и механички транспорт поттикнат од климатски фактори. Овој процес е особено значаен за проценка на еколошкиот опасност, бидејќи дел од оригиналната минерализација веќе е дисперзирана во подалечни области, потенцијално зголемувајќи го влијанието врз животната средина (Sinani, 2025).

Од металогенска перспектива, минерализацијата на Бајгора покажува типични карактеристики на појавите на хризотил поврзани со ултрамафичните серпентинити, каде што структурната контрола, степенот на промена и присуството на фрактури што ја олеснуваат циркулацијата на хидротермалните течности богати со Mg-Si играат клучна улога. Овие параметри обезбедуваат појасна основа за геолошко моделирање и евалуација на потенцијалот за ресурси на наоѓалиштето (Goovaerts, 1997).



Слика 10. Топографски профил на подручјето за истражување на азбест што ја прикажува просторната дистрибуција на минерализираните појави во солиден планински релјеф.
Figure 10. Topographic profile of the asbestos exploration area showing the spatial distribution of mineralized occurrences within a rugged hilly mountainous relief.

Контурните линии ја илустрираат морфологијата на теренот и топографската контрола на локализацијата на телата на серпентинити и точките на минерализација на хризотилот, што укажува на нивната концентрација главно долж структурните зони и линиите на фрактури (Kosovo, 1982).



Слика 11. Геолошки пресеци на азбестниот профил што ја илустрира внатрешната структура на минерализираните тела на серпентинит и геометријата на зоните со хризотил.

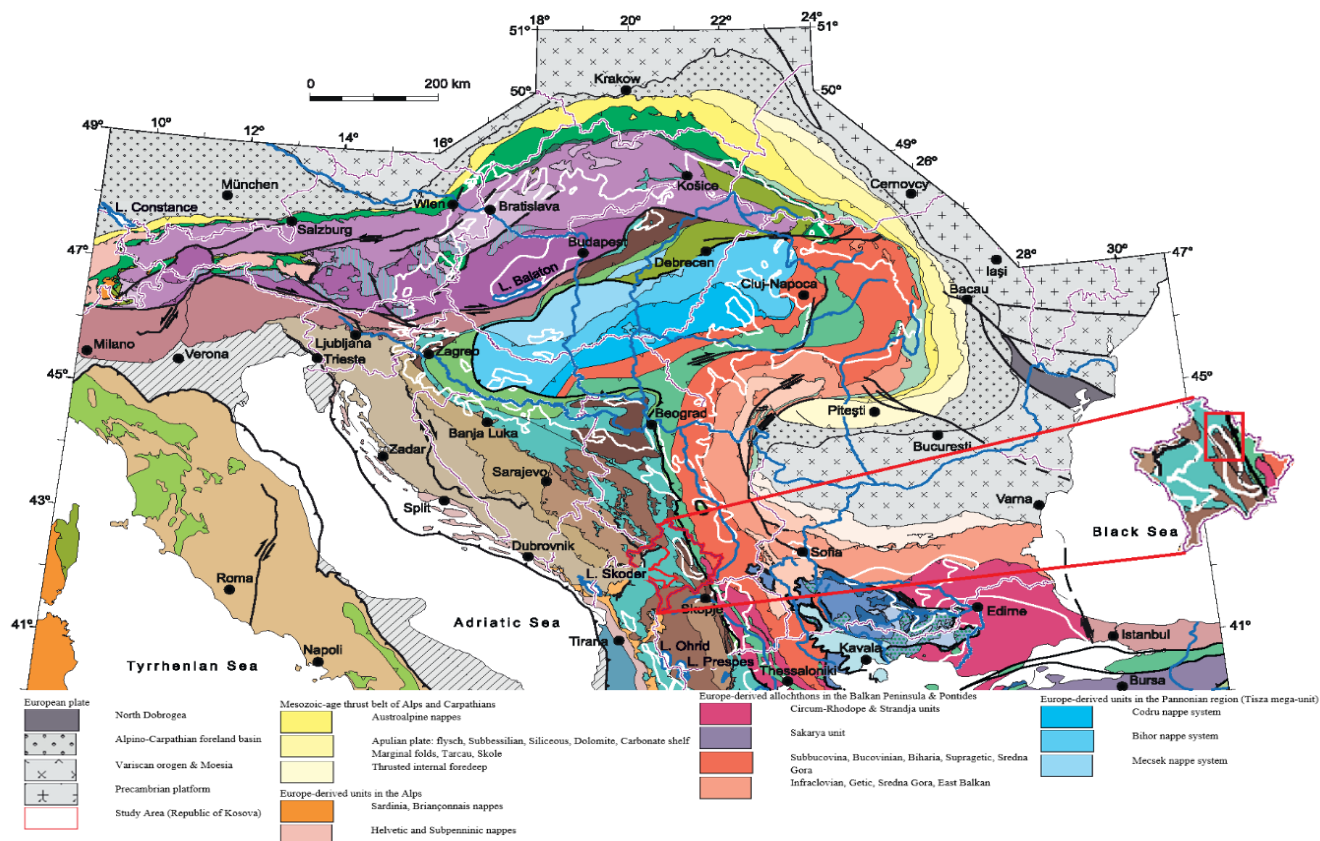
Figure 11. Geological cross sections of the asbestos profile illustrating the internal structure of serpentinite mineralized bodies and the geometry of chrysotile bearing zones.

Серијата шематски делови покажува варијации во морфологијата на вената, дебелината и дистрибуцијата во системите на фрактура, нагласувајќи ја структурната контрола на минерализацијата на влакната и просторниот континуитет на хоризонтите што носат азбест долж профилот (Kosovo, 1982).

2.6. Геолошки и геодинамички карактеристики на истражуваното подрачје

Презентираната карта ја илустрира тектонската и палеогеографската рамка на Југоисточна Европа, прикажувајќи ги просторните односи помеѓу Европската плоча и алпскиот ороген систем (Динарид-Хеленид-Карпати-Балканид), како и главните потисни зони кои бележат последователни епизоди на отворање и затворање на океанот (Virta, 2002). Помеѓу овие зони, Вардарската зона претставува значајна геодинамичка граница, означувајќи го отпечатокот на Неотетинскиот океан и последователната историја на процесите на субдукција и обдукција поврзани со неговата еволуција. Оваа зона се карактеризира со екстензивни површински експозиции и сложено офиолитско здружение составено од остатоци од океанска литосфера заедно со придружните седиментни и метаморфни секвенци тектонски спротивставени, што одразува многу сложена еволуција на полифаза од мезозојско океанско ширење до тенозоична конозоична активност (Schmid, 2020).

важна позиција помеѓу Вардарската зона и сродните тектонски единици и структури. Регионот Бајгора е сместен во структурно сложен сектор каде што ултрамафичните и мафичните офиолитски единици се сопоставени со метаморфни комплекси од низок до среден степен долж потисните, наборите и контактите на смолкнување. Овие литолошки и тектонски конфигурации создаваат поволни услови за минерализација, вклучувајќи хром и основни метали, како и за различни процеси на хидротермална алтерација (Caterina Rinaudo, 2003). Од гео-инженеринг и еколошка перспектива, овој тектонски мозаик ги контролира својствата на карпестата маса, мрежите на фрактури и патеките на пропустливост за миграција на течности. Присуството на серпентинизирани ултрамафични карпи, тектонски мешани формации и интензивно деформирани единици ја зголемуваат литолошката хетерогеност и анизотропија, кои се критични фактори кои влијаат на стабилноста на наклонот, циркулацијата на подземните води и просторната дистрибуција на потенцијално опасните минерални фази. Благодарение на овие карактеристики, регионот Бајгора претставува многу значајна природна лабораторија за истражување на односите помеѓу регионалната тектонска еволуција, локалната геолошка архитектура, процесите на минерализација и еколошките опасности, со што се обезбедува суштинска рамка за интегрирани геолошки, инженерски и геоеколошки проценки (MDP, 2020).



Слика 12. Тектонските единици на алпската зона на судир помеѓу Источните Алпи и западна Турција, во чии рамки се наоѓа областа на проучување.

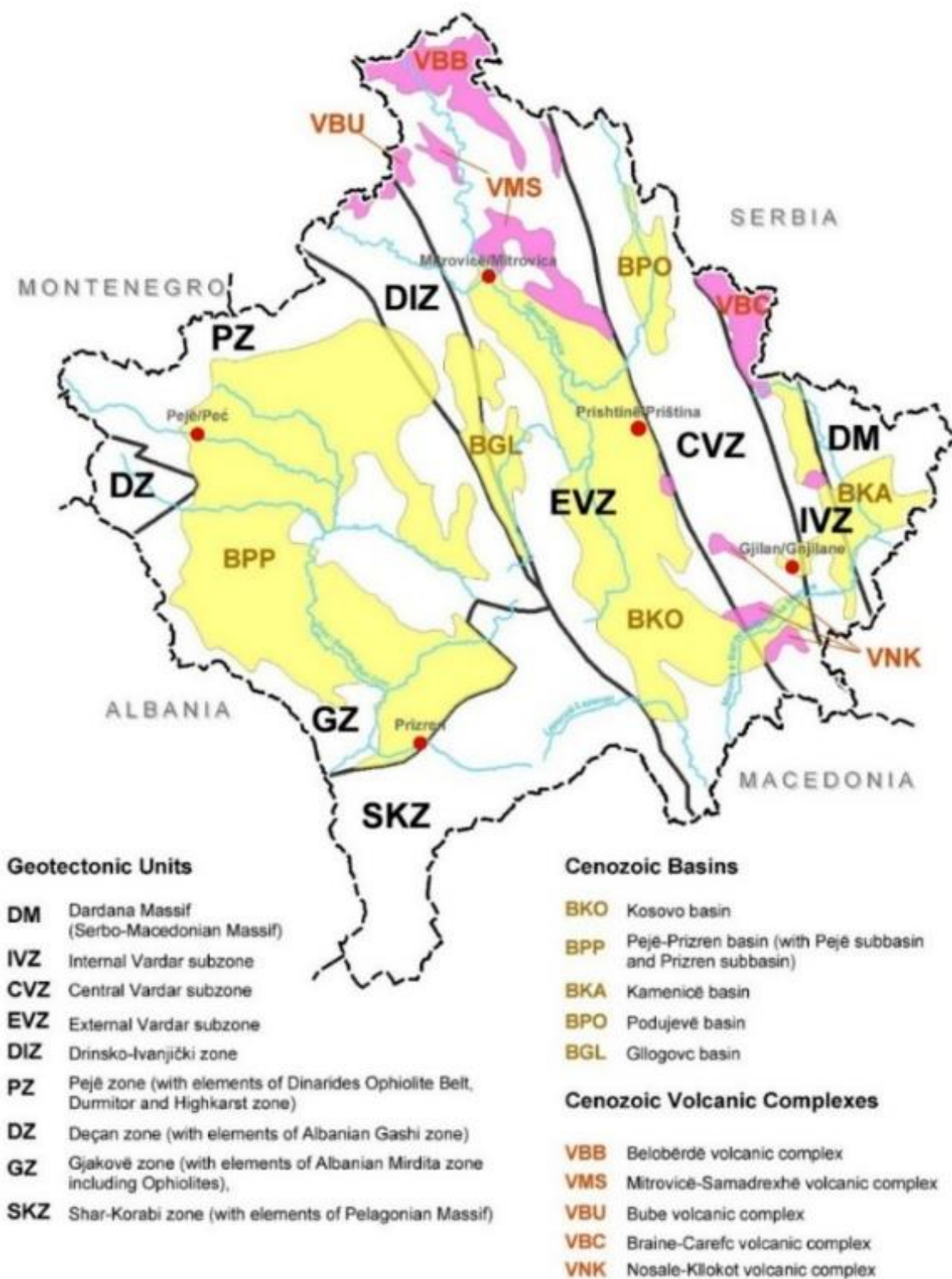
Figure 12. The tectonic units of the Alpine collision zone between the Eastern Alps and western Turkey, within which the study area is located.

2.6.1. Вардарска зона

Вардарската зона претставува главен структурен појас со општ тренд север-југ, што вообичаено се толкува како трага на затворање на гранка на океанот Нео-Тетис за време на мезозоикот. Во геотектонските карти, оваа зона се појавува како комплексен појас кој содржи офиолити и ултрамафични мафични комплекси, вклучувајќи перидотити, серпентинити, габроси и базалти (Bahri Sinani B. B., 2025). Структурната конфигурација на оваа зона го одразува режимот на компресија поврзан со судирот помеѓу јадранските и европските микроплочи. Овој појас претставува еден од главните патишта за миграција на металогените течности на Балканот и е тесно поврзан со формирањето на наоѓалишта Pb-Zn, Cu, Ni и Cr, како и со појавата на хидротермална и магматска минерализација (Robertson, 2002).

2.6.2. Позицијата на Косово во оваа рамка

Косово, вклучително и областа Бајгора каде што беше спроведена истрагата, се наоѓа во централниот сектор на Вардарската зона (Sinani, 2026). Оваа средна позиција ја рефлектира изразената литолошка и структурна хетерогеност карактеристична за овој сегмент од зоната, која е дефинирана со екстензивни појаси на серпентинити и перидотити кои формираат ултрамафични масиви во северно Косово, сложени седиментни секвенци од тријаско-креда, вулканско-креда, составени од вулканско-структурни теседименти и многубројни технолошки седименти. зони на смолкнување кои ја контролирале и геодинамичката еволуција и локализацијата на минерализацијата (Goovaerts, 1997). Во овој геолошки контекст, Косово претставува типичен сегмент од Вардарскиот офиолитски појас и е од особена важност за геолошки, минералошки и еколошки истражувања (Robertson, 2002).



Слика 13. Геотектонска карта на Косово која ја прикажува неговата позиција во регионалната структурна рамка на централната Вардарска зона.
Figure 13. Geotectonic map of Kosovo showing its position within the regional structural framework of the central Vardar Zone.

2.7. Геолошки контекст на подрачјето на проучување

Областа за проучување Бајгора се наоѓа во северно Косово, во рамките на ултрамафичниот појас генетски поврзан со Вардарската зона, една од најважните тектоно-стратиграфски зони на Балканскиот Полуостров (Elezaj, 2008; Ilic, 2005). Вардарската зона претставува голема мезозојска шиенење формирана за време на прогресивното затворање на гранките на океанот Нео-Тетис и последователните алпски орогени процеси (Kosovo, 1982; Robertson, 2009).

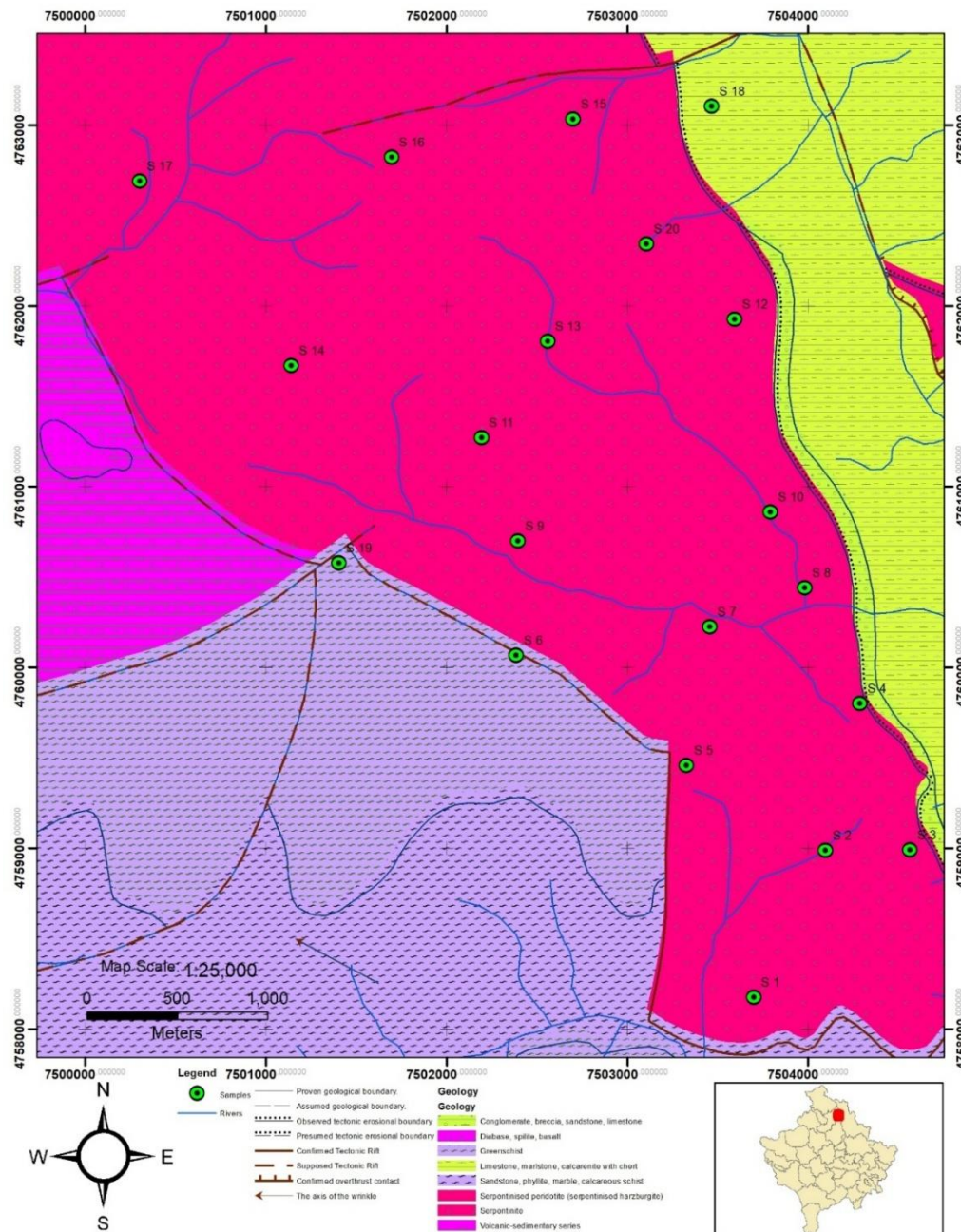
Во оваа регионална рамка, областа на проучување зазема клучна позиција каде што и западната и источната подзона на Вардарската зона се изложени и тектонски сопоставени (Karamata, 2006; Stampfill, 2002). Геолошки, овие подзони бележат сложена еволутивна историја која вклучува генерирање на океанска кора, интра-океанска субдукција, обдукција на офиолити и последователен развој на сливот за време на мезозоикот и кенозоикот (Rinaudo, 2003).

Источна Вардарска подзона во регионот Бајгора се карактеризира со карпи добиени од ултрамафична обвивка заедно со секвенци од флиш тип од доцнојура рана креда и доба до горно креда (Elezaj, 2008). Во претходните тектонски поделби, оваа подзона најчесто била вклучена во подзоната Централно Вардар (Karamata, 2006). Западната вардарска подзона, пак, се карактеризира со тријаски вулкано-седиментни структури прекриени со офиолитски и седиментни единици (Humans, 2012).

Структурните односи меѓу овие две подзони се претежно тектонски, дефинирани со потисни или пренафрлувачки контакти кои одиграле главна улога во спротивставувањето на литологиите на контрастна композиција (Virta, 2002; Rinaudo, 2003). Серпентинитни формации и серпентински минерали најчесто се појавуваат долж овие тектонски контакти, делувајќи како механички слаби хоризонти за време на деформација на компресија (Evans, 2010; Karamata, 2006).

Деформацијата во областа Бајгора-Качандол е полифазна и вклучува фази на превиткување, превиткување и фази на фрактура и расед (Elezaj, 2008). Повеќето набори укажуваат на конвергенција насочена кон запад, со оски кои генерално се спуштаат кон северозапад, во согласност со целокупниот режим на компресија на системот Динарид-Хеленид (Rinaudo, 2003; Ross, 2001).

Препознатливи се два главни групи на фрактури: WNW-ESE и NE-SW. Движењата на потисните трендови во СИ ЈЗ влијаат на помладите миоценски дацитни андезитни формации, кои се локално поместени, што укажува на продолжена тектонска активност за време на пост-обдукцијата еволуција.



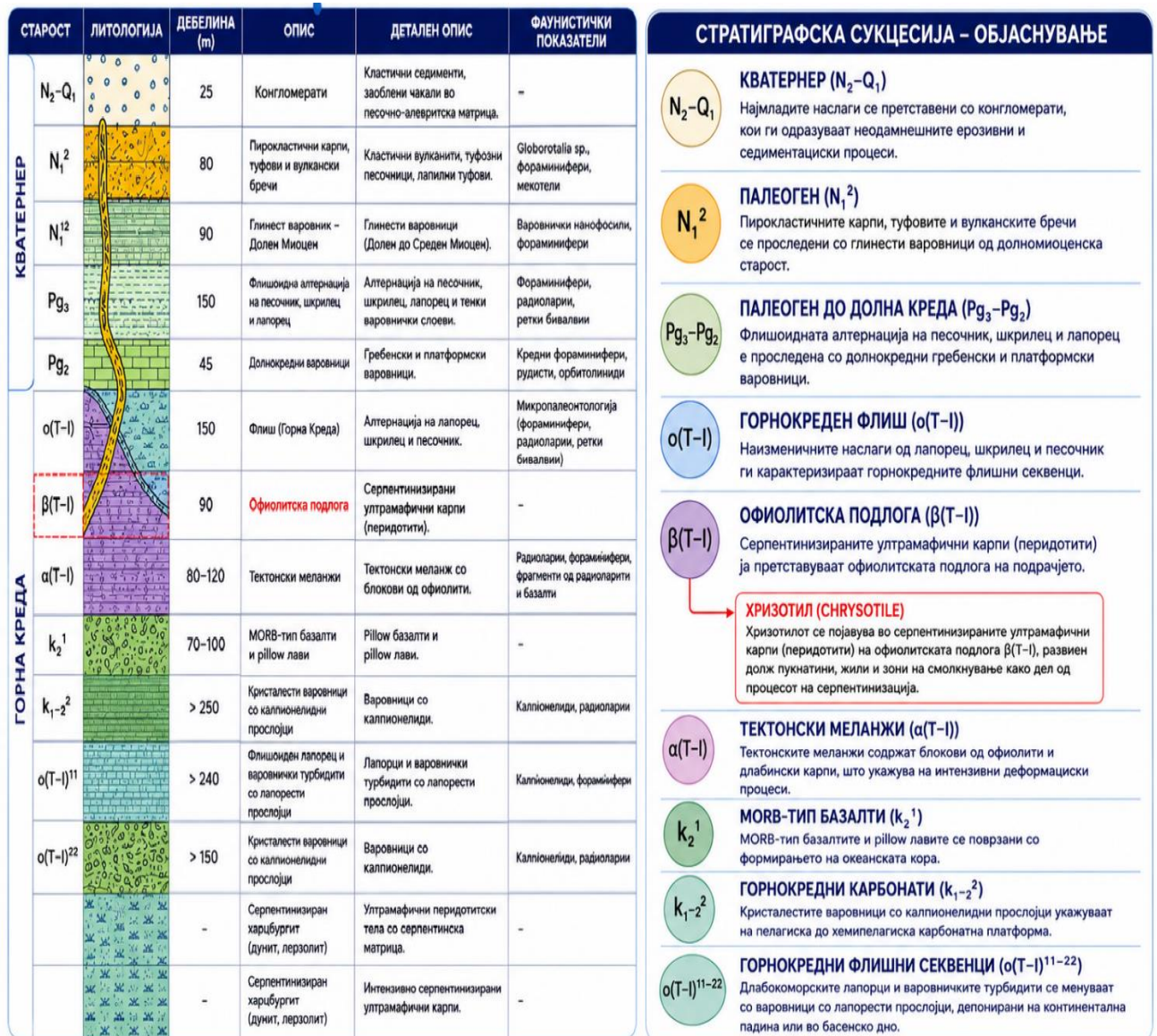
Слика 14. Геолошка карта на областа Бајгора и распоредот на литолошките единици и 20-те точки за земање примероци во рамките на ултрамафичниот масив поврзан со Вардарската зона. Серпентинитот доминира во областа и главно е ограничен со тектонски контакти, што укажува на структурна контрола над минерализацијата.

Figure 14. Geological map of the Bajgora area and the distribution of lithological units and the 20 sampling points within the ultramafic massif associated with the Vardar Zone. Serpentinite dominates the area and is mainly bounded by tectonic contacts, indicating structural control over mineralization.

2.8. Стратиграфска архитектура на областа Бајгора

Главните стратиграфски карактеристики на истражуваната област се претставени на синтетизиран начин преку репрезентативни литостратиграфски столбови на западните и источните подзони на областа Бајгора, кои прикажуваат споредлива стратиграфска еволуција во која доминира мезозојско-кенозојска седиментна сукцесија која се потпира на базата на офиолитарниот комплекс (Rinaudo, 2003; Robertson, 2000). Според овие колони, подрумот е составен првенствено од интензивно серпентинизирани харцбургити поврзани со табеларни метагбро, базалти од типот MORB и лави од перница од тријаско-јура доба, што го одразува океанското потекло и времето на формирање на овој геолошки стратиграфски комплекс (Topuz, 2013; Chinner, Chinner, 1996). Процесите на серпентинизација кои влијаат на карпите на ултрамафичната обвивка се во согласност со типичната промена на океанската литосфера документирана во офиолитни секвенци (Evans, 2004; Karamata, 2006).

Над овој подрум се наоѓа карбонатно пакување од долниот креда претставено со варовници и кристални варовници кои содржат меѓуслојни калпионелиди, кои укажуваат на релативно мирни и плитки средини на таложење типични за пост-офиолитска пасивна маргина или поставки на преден план (Dilek, 2011). Оваа единица е наследена од горнокредните флишни формации составени од наизменични лапори, песочни камења и глини, документирајќи транзиција кон подлабоки и подинамични сливови средини поврзани со прогресивна конвергенција и затворање на басенот во доменот Вардар (Dilek, 2011; Robertson, 2002). Најгорните делови од стратиграфските столбови се состојат од неогени формации вклучувајќи лапорови варовници, кластични седименти и пирокластични производи, додека сукцесијата е покриена со квартерни конгломератски наслаги. Оваа стратиграфска архитектура на студиската област Бајгора ја рефлектира тектонската и палеогеографската еволуција на Вардарската зона, од океанска средина до базиална средина и на крајот до услови на континентално таложење (Robertson, 2002).



Слика 15. Стратиграфска колона на областа Бајгора која го прикажува континуитетот на геолошкото време што го опфаќа офиолитското подрум на Вардарската зона во истражуваното подрачје.

Figure 15. Stratigraphic column of the Bajgora area showing the continuity of geological time that covers the ophiolitic basement of the Vardar Zone in the research area.

Геолошката поставеност на областа на проучување ја одразува еволуцијата на доменот Неотетијан од Тријас до квартал. Најниското структурно ниво се состои од офиолитски подрум од тријаско-јура составен од серпентинизирани ултрамафични карпи (главно харцбургити со мали дунити), метагбро и базалти од типот MORB, што укажува на формирање во средина на среден океански гребен и последователна хидротерална средина (Evans, 2010; Topuz, 2013). Ова е обложено со вулкано-седиментна низа од среден-горен тријас од филити, шкрилци со хлорит-епидоти, базалтни интеркалации и радиоларични цреши, кои ги рефлектираат акреционерните сложени услови и метаморфизмот на нискостепениот зелен шкрилци (Dilek, 2011; Karamata, 2006). Карбонатната платформа на рана креда преминува во секвенци на флиши од горната креда формирани во длабоки басени за време на затворањето на океанот Неотетијан (Geological, 1984). Неогените кластични и пирокластични формации, прекриени со квартални неконсолидирани депозити, бележат пост-орогена еволуција. Ултрамафичните тела во северно Косово покриваат ~ 16-17 km² и доминираат харцбургити, со локализирана серпентинизација и појава на хризотил азбест кои формираат венски мрежи со дебелина до 2-3 mm (Elezaj, 2008; Goovaerts, 1997).

2.9. Геогена контаминација во ултрамафичните масиви контролирани од серпентинизација и тектоника

Присуството на ултрамафични карпи и минерали поврзани со серпентинити во областа Бајгора ја претставува основната литолошка и геохемиска рамка што ја контролира подвижноста на елементите во површинската средина и, следствено, укажува на потенцијален опасност од контаминација на почвата, воздухот и водата. Истражуваното подрачје се наоѓа по должината на југоисточните рабови на перидотитскиот масив Копаоник, каде што доминираат серпентинизирани перидотитни формации во геотектонскиот домен Вардар (Argani, 2018). Овие геолошки формации се карактеризираат со значителна густина на фрактури и тектонски контакти, кои одиграле многу поволна улога во развојот на серпентина минерални вени кои функционираат како преференцијални патишта за циркулација на хидротермална течност (Stojanov, 1997). Под такви геолошки услови, хризотилот и другите серпентински минерали се формирале како директни производи на серпентинизација, создавајќи

минерални зборови кои содржат азбестни влакна кои се развиле првенствено по фрактурите во формациите на серпентинит (Guillot, 2013).

Минеролошки, формациите на серпентинит сочинуваат структурни единици на геотектонската рамка на Копаник и се доминирани од серпентински групни фази, вклучително лизардит, антигорит и хризотил, обично придружени со помошни минерали како магнетит, локално појавување на хромитни фази, спинели, второстепени локализираны фази наследено од перидотични протолити, како што се изменетиот оливин и ортопироксен (Stojaov, 1997). Оваа минералозна поврзаност е особено значајна бидејќи ја регулира достапноста на елементите со ослободување на компоненти добиени од минерали кои можат да се мобилизираат во атмосферата преку антропогени активности и процеси на физички нарушувања, вклучувајќи фрагментација, ерозија, колувијален транспорт и хемиска промена (оксидација, карбонизација и хидратација) (Asvesta, 2025; Argani, 2018). Литолошки извори претставени со серпентинизирани ултрамафични формации додека тектонски рамки што ги канализираат течностите и го подобруваат атмосферскиот влијанија на карпите и климатските и геоморфолошките процеси кои ги дисперзираат фиброзните минерали во воздухот, водата и почвата.

Клучен аспект што овозможува разбирање на потенцијалот за контаминација на почвата во областите погодени од формациите на серпентинит е тоа што перидотитите и нивните серпентинизирани деривати прикажуваат специфичен геохемиски потпис збогатен со елементи добиени од мантија. Под специфични услови на животната средина, овие елементи може да достигнат покачени концентрации во почвите во споредба со оние развиени на карбонатни или силицикластични терени (Asvesta, 2025).

Дури и во случаи кога хромит-спинелот е пријавен како редок, а процесите на хромитизација се слаби, забележани во областа Бајгора, ултрамафичните карпести формации генерално придонесуваат никел (Ni), хром (Cr), кобалт (Co) и магнезиум (Mg) како главни елементи на ултрамафичната матрица. Во зоните каде што се јавува минерализација на хризотил, овие елементи се делумно инкорпорирани во кристалните структури на примарните минерали како што се оливин и пироксен и се прераспределуваат во секундарни минерални фази за време на серпентинизацијата, на пример преку инкорпорирање на Ni во

серпентински минерали (Ndzana, 2021). Процесите на климатските временски услови може постепено да ги ослободуваат овие елементи во површинските средини, каде што адсорпцијата на глинените минерали и врнежите како секундарни фази играат важна улога во контролирањето на нивната мобилност и транспорт во површинските и подземните системи (Adra, 2022).

Почвите развиени во присуство на серпентински минерали обично прикажуваат релативно плитки педолошки профили прекинати со изобилни фрагменти од карпи, регулирајќи го капацитетот на почвата да ги задржи хемиските елементи преку интеракции помеѓу фината глинена фракција и скелетната фракција на карпестата маса (Alloway, 2013). Во областа Бајгора, нерамниот релјеф и близината на пристапните патишта до минерализираните зони дополнително ги интензивираат овие процеси на контаминација. Односот помеѓу механичката фрагментација и инфраструктурните активности, како што се изградбата на патишта и сечењето на падините, претставува важен фактор што може да ја зголеми изложеноста на ултрамафичен материјал, а со тоа да ја забрза стапката на ерозија и да ги зголеми минералните оптоварувања во соседните области (Alloway, 2013).

Тектонските структури и хидротермалната активност беа одлучувачки фактори, бидејќи тие не само што го контролираа поставувањето на хризотилските вени и влакна, туку и создадоа поволни услови за локализирана концентрација на минерали и хемиски елементи во специфичните структурни домени на ултрамафичниот карпест масив. Структурните пресеци најчесто делуваат како проводници за циркулација на хидротермална течност, промовирајќи интензивна серпентинизација и развој на азбестиформни фази (Harrison, 2009). Од геолошка перспектива, структурно контролираните зони од овој тип генерираат изразена минералозна хетерогеност. Областите погодени од поинтензивна серпентинизација покажуваат зголемено изобилство на влакнести минерали и придружни секундарни фази, придружени со намалување на примарните ултрамафни минерали. Зголемената пропустливост на фрактури го олеснува вертикалниот транспорт и прераспределбата на избраните елементи во рамките на профилот на почвата (Harrison, 2009).

Дополнителен термички извор одговорен за промена и модификација на карпите домаќини е претставен со помлади кисели магматски упади. Хидротермалната промена поврзана со магматската активност може да резултира со

силицификација, карбонизација и формирање на секундарни минерални фази со различно геохемиско однесување, што влијае на дисперзијата на хемиските елементи во почвите (Adra, 2022).

Потенцијалната прераспределба на минерализираниот материјал од наоѓалиштето во околните почви е тесно поврзана со локалните геоморфолошки услови и хидролошката мрежа на областа. Оваа прераспределба е силно контролирана од наклоните на падините, интензитетот на истекувањето и динамиката на транспорт на седимент типична за планинските терени (Freyssinet, 2000). Областа на студијата е ограничена на исток со поток што тече од селото Рржан кон Качанол и на запад со границата помеѓу селата Селац и Бајгоре. Оваа поделба не е само географска, туку и функционална, бидејќи ги контролира патиштата низ кои се транспортираат и редистрибуираат еродираниот материјали.

На стрмни падини, брзото истекување за време на врнежите може да мобилизира фини честички и минерализирани фрагменти добиени од зони со серпентинит и хризотил, транспортирајќи ги во системот на потоци (Freyssinet, 2000). Во сегментите на високи енергетски текови, особено каде падините се изложени или нарушени од антропогени активности, транспортот на седимент се зголемува. Спротивно на тоа, во низводните сектори каде што наклоните се намалуваат, таложењето на финиот нанос и колувијалниот материјал станува доминантен. Овие депонирани средини претставуваат клучни локации каде што минералошкиот „сигнал“ може да се акумулира во почвите, што доведува до локално покачени концентрации на серпентински минерали и ултрамафични поврзани елементи, формирајќи локални геохемиски аномалии (Downs, 2011).

Алувијалните почви долж коридорот на потокот може да се збогатат со фини фракции добиени од изменети серпентинити, како што се серпентински глини и железни оксиди, со што се менува капацитетот на адсорпција и однесувањето на елементите во трагови во споредба со почвите развиени на неултрамафични литологии. Во областите каде што рудните тела се структурно фрагментирани со тектонски процеси, се очекуваат повеќе мали извори на минерализиран материјал, што ќе генерира мозаик на геохемиска варијабилност на кратки просторни растојанија (Gualtieri 2012). Од перспектива на геоеколошки мониторинг, овие процеси ја нагласуваат потребата од разлика помеѓу литолошката позадина и контаминацијата засилена со транспорт на седимент и

локализирана акумулација во средини на таложење. Потенцијалните влијанија поврзани со историските истражувачки активности како што се адити, руднички галерии и канали за ископување може да ја зголемат контаминацијата на почвата преку изложеност и прераспределба на материјал што содржи азбест (Dayanand, 2023). Иако обемот на историското ископување беше ограничен, отворите за ископување, фрлањето отпад и акумулацијата на материјал во близина на влезовите на галеријата може да дејствуваат како локализирани извори на контаминација кои опстојуваат со децении.

Фрагментираниот материјал се карактеризира со поголема специфична површина, побрзо реагира со вода и CO₂ и го олеснува ослободувањето и подвижноста на честичките кои содржат минерали, вклучувајќи ги и влакнестите фази во почвите (Ziegler, 2007; Gualtieri, 2012). Во планинските средини, циклусите на замрзнување на замрзнување дополнително го забрзуваат механичкото распаѓање на серпентинит и минерализираните карпи, подобрувајќи ги процесите на дисперзија (Freyssinet, 2000).

Онаму каде што се формирале депонии за отпад во близина на историските работи, тие може да претставуваат долгорочни извори на опасност за животната средина, особено на климатски активни терени (Dayanand, 2023). Понатаму, патната инфраструктура и проширувањето на туристичкиот развој претставуваат дополнителни механизми за прераспределба на влакнеститот материјал. Транспортните коридори кои минуваат низ телата на серпентинит може да ја подобрат механичката фрагментација и создавањето прашина, зголемувајќи ја азбестната дисперзија во воздухот и почвата (Gualtieri, 2012; Plumlee, 2007).

Бидејќи главниот пат што ги поврзува Митровица-Бајгора-Подуево поминува низ формации на серпентинити кои содржат хризотил, антигорит, лизардит и амфиболи, постои значителен потенцијал за дисперзија на минерализиран материјал како ситна прашина во воздухот, водата и почвите долж и надвор од патниот коридор (Wilk, 2019; Plumlee, 2007).

Имајќи предвид дека патната оска Митровица-Подуево претставува главна транспортна артерија, изградбата на секундарни и помалку функционални патишта што се разгрануваат од овој коридор дополнително го зголемува бројот на потенцијални извори на загадување. Промената на користењето на земјиштето и инфраструктурните нарушувања ја зголемуваат механичката

фрагментација, нестабилноста на падините и поврзаноста на седиментот во планинските терени (Nicholson, 2001). This рамката нагласува дека проценките за потенцијална контаминација на почвата мора да ги земат предвид не само литолошките извори, туку и користењето на земјиштето и динамиката на инфраструктурата, бидејќи овие фактори директно го контролираат интензитетот на изложеноста и степенот на фрагментација на карпите.

На ниво на геохемиски процеси, серпентинитите покажуваат неколку карактеристики кои директно влијаат на подвижноста на хемиските елементи со потенцијал за контаминација во почвите. Почвите добиени од серпентинит обично покажуваат висока содржина на магнезиум и низок сооднос Ca/Mg, што влијае на педогенезата, стабилноста на агрегатот и пуферскиот капацитет против флукуации на pH (Hooke, 2000). Во областите каде што се јавува секундарна карбонизација, како што се карбонатните пополнувања покрај фрактурите, пуферскиот капацитет може да се зголеми, а со тоа да се намали подвижноста на одредени метали преку процесите на адсорпција и таложење (Roux, 2019).

Втор важен феномен е присуството на магнетит и секундарни железни оксиди, кои обезбедуваат високо реактивни површини способни да адсорбираат елементи во трагови и да ја промовираат нивната акумулација во површинските хоризонти на почвата (Merrot, 2011). Трето, хидротермалните услови долж зоните на фрактура може да произведат области со поинтензивна промена, каде што новоформираните минерали како глина, карбонати и оксиди вршат силна контрола врз елементарната подвижност и задржување (Elezaj, 2008).

Овие фактори може да генерираат две контрастни сценарија:

- Локализирана акумулација во почвите, формирајќи силни, но просторно ограничени геохемиски аномалии; и
- Транспорт на долги растојанија долж дренажните мрежи, особено за време на интензивни врнежи, кога зголеменото истекување го зголемува флуксот на седиментот (Nicholson, 2001)

Во контекст на Бајгора, каде што потокот што истекува од планината Остро Копле кон Качанол ги одвојува рудните тела и каде мрежата на мали работи создава повеќе изложени зони, и двете сценарија се многу веродостојни во зависност од топографската положба и хидролошката поврзаност. Со оглед на

тоа што областа на студијата претставува структурно сложен систем вграден во тектонската рамка на доменот Динарид-Вардар каде хидротермалните процеси историски се поврзуваат со киселински упади и дацитски андезитски вулканизам, потенцијалот за контаминација на почвата не треба да се толкува едноставно како функција на самото присуство на ултрамафни карпи. Наместо тоа, треба да се сфати како резултат на хетероген геолошки и хидротермален систем во кој интензитетот на промената и структурната контрола ја регулираат дистрибуцијата на минералите и однесувањето на елементите во трагови (Elezaj, 2008). Ова е особено важно во јужниот сектор, каде што три рудни зони разделени со пусти појаси сугерираат сегментација на рудното тело поради тектонско поместување. Во такви услови, почвите развиени преку неплодни појаси може да покажат помала содржина на хризотил, но сепак го задржуваат потенцијалот за дисперзија на фиброзен материјал во почвата, водата и воздухот преку механички нарушувања и површински процеси (Hooke, 2000)

Врз основа на историските истражувања од минатиот век и геолошките карактеристики на ултрамафичните серпентинизирани формации на карпестиот масив Копаоник, како и документираната геолошка поставка на Бајгора, вклучувајќи ја идентификацијата на вените на хризотил, лизардит и антигорит, тектонски фрактури како главни места за реконструкција, хидротерични и хидротерични процеси на планината, хидротерите. историско истражување потенцијалот за контаминација на почвата е првенствено поврзан со следните фактори (Sinani, 2025)

3. ЦЕЛ НА ДИСЕРТАЦИЈАТА

Во ова поглавје се разработуваат предметот на истражувањето, научната оправданост, истражувачките задачи, истражувачките прашања и очекуваниот научен придонес на дисертацијата. Кратката цел на студијата и оперативните цели се веќе наведени во Воведот, додека тука тие се систематизираат и пошироко се образложуваат во рамките на истражувачката концепција на трудот.

3.1. Предмет на истражувањето

Предмет на оваа дисертација е појавата, минералошката карактеризација и просторната распределба на природниот азбест во регионот на Бајгора, со посебен осврт на геолошките и структурните фактори што ја контролираат неговата појава. Истражувањето ги разгледува и еколошките импликации од присуството на азбестни минерали во ултрамафични и серпентинизирани литологии (Macher, 2025, Bloise, 2016, (Orenstein, 2000).

3.2. Основна цел на истражувањето

Основната цел на дисертацијата е да се обезбеди минералозна, петрографска и просторна карактеризација на природниот азбест во регионот на Бајгора и да се издвојат зоните со зголемен потенцијал на опасност. Истражувањето има и практична цел да создаде научна основа за понатамошен мониторинг, управување со просторот и планирање на дополнителни еколошки испитувања (Harper, 2008; Long, 2010).

3.3. Истражувачки задачи

1. собирање и систематизација на теренски и геолошки податоци за истражуваното подрачје;
2. минералозна идентификација на примероците со XRPD;
3. микроструктурна и хемиска карактеризација со SEM–EDS;
4. петрографска анализа на тенки пресеци за определување на текстурните и минералните односи;
5. просторно моделирање на дистрибуцијата на минералозните фази и интерпретација на нивната геолошка условеност;

6. издвојување на зони со зголемен потенцијал на опасност и формулирање препораки за понатамошни истражувања.

3.4. Истражувачки прашања и работна хипотеза

Истражувањето поаѓа од претпоставката дека појавата и просторната распределба на природниот азбест во регионот на Бајгора се директно контролирани од литологијата, степенот на серпентинизација, фрактурните системи и деформационите зони. Во таа насока, се поставуваат следниве прашања: (1) кои минерални фази доминираат во истражуваните примероци; (2) во кои геолошки и структурни услови се јавува хризотилот; и (3) дали неговата дистрибуција покажува јасна просторна зависност од тектонските структури и литолошките контакти?

3.5. Научен придонес на дисертацијата

Научниот придонес на дисертацијата се состои во создавање интегрирана база на минералошки, петрографски и просторни податоци за природниот азбест во регионот на Бајгора. Со ова се обезбедува посистематско разбирање на геолошката контрола врз појавата на азбестните минерали и се поставува основа за понатамошни еколошки, инженерски и управувачки проценки.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДЕЛ

4.1. Лабораториски методи

Компонентата за лабораториско истражување на оваа студија го претставува аналитичкото и интерпретативното јадро на истражувањето, интегрирајќи ги податоците добиени од лабораториски анализи, петрографски набљудувања во тенки пресеци, минералошки анализи со помош на дифракција на рендгенски прашок (XRPD/XRD), микроморфолошки и хемиски анализи со помош на SEM-EDX и просторни интерпретации на серпентинската дистрибуција на минералната група Ваај област. Истражувачкиот пристап е втемелен во утврдената научна премиса дека ултрамафичните и офиолитските зони сочинуваат поволни геолошки средини со висок потенцијал за развој на влакнести азбестиформни минерали, особено хризотил, кој претставува најзначајна фаза од еколошка и опасна перспектива. Претходните студии во регионот потврдија дека ултрамафичниот масив на Копаник и структурните единици на Вардарската зона создале поволни тектонски и геолошки услови за процесите на серпентинизација и формирање на минерални фази поврзани со природниот азбест (NOA) (Sinani, 2025).

Во оваа рамка, истражувачката компонента има за цел да воспостави корелации меѓу литолошките карактеристики, минералошката еволуција и структурните контроли во проучуваната област, фокусирајќи се на механизмите што го регулираат формирањето, дистрибуцијата и варијабилноста на серпентинските фази. Овој пристап покажува дека самото присуство на азбестиформни минерали претставува потенцијална опасност, додека реалниот опасност зависи од условите на изложеност зависни од физичките и минералошките својства на материјалот, заедно со геолошките услови и антропогените фактори кои го поддржуваат ослободувањето на влакна. Поради оваа причина, интегрираната анализа која комбинира петрографија со тенок пресек и современи инструментални методи претставува клучна компонента на научната интерпретација (Sinani, 2026)

Анализите со тенок пресек послужија како фундаментална основа за идентификување на примарните и секундарните текстури во ултрамафичните карпи и за препознавање на минералошките трансформации поврзани со

серпентинизацијата. Ретикуларните и мрежести текстури се јасно забележани, што укажува на прогресивна замена на оливин и пироксени со серпентински минерали и рефлектирајќи сложена хидротермална еволуција. Во многу примероци, идентификувани се влакнести и ламеларни структури, претпочитани кристални ориентации и развој на зони на микроструктурна деформација, што сугерира дека серпентинизацијата била контролирана со мрежи на фрактура и зони на смолкнување. Овие петрографски набљудувања се во согласност со неодамнешните студии кои известуваат дека хризотилот најчесто се развива во зони со засилена тектонска деформација и интензивна циркулација на хидротермална течност.

Од минералошка перспектива, XRPD/XRD анализите го потврдија присуството на главните серпентински групни фази, вклучувајќи лизардит, антигорит и хризотил, со значителна просторна варијабилност. Релативната доминација на антигоритот во одредени примероци укажува на понапредни услови на серпентинизација и термодинамичка стабилност на релативно повисоки температури, додека лизардит претставува фази потипични за промена на ниска температура (Wilk, 2019). Хризотилот, како влакнеста фаза од особено еколошко значење, се јавува повеќе локално во рамките на истражуваната област, што укажува на силна структурна контрола и појасни минералошки ограничувања за неговото формирање. Оваа хетерогена дистрибуција е јасно докажана и во основните студии и во тековните анализи, што ја одразува неуниформната природа на метаморфните и хидротермалните процеси кои влијаат на регионот (Sinani, 2025).

SEM-EDX методологијата обезбеди детални информации за морфологијата и хемискиот состав на минералните влакна. Електронските микрографии открија влакнести структури со високи сооднос должина-ширина, карактеристична карактеристика на хризотилот, додека елементарните анализи ја потврдија доминацијата на Mg-Si-O во согласност со хемискиот состав на серпентинските минерали. Набљудувањата на микрометарската скала, исто така, покажаа диференцијација помеѓу ламеларните антигоритни структури и агрегатите на плочест лизардит, дополнувајќи ги толкувањата добиени од тенки пресеци и XRD дифракција. Интеграцијата на овие техники овозможи попрецизна идентификација на типологиите на минералите и текстуралните односи меѓу различните фази (Sinani, 2025; Kruasom, 2025).

Важен елемент на истражувачката компонента е анализата на односите помеѓу минералогијата и регионалниот геотектонски контекст. Областа на студијата се наоѓа во Вардарската зона, појас со сложена структурна архитектура и геодинамичка еволуција каде офиолитите и ултрамафичните единици се изложени преку тектонски процеси. Таквата тектонска активност го фаворизираше формирањето на фрактури и литолошките контакти, создавајќи зони на хидротермална алтерација што обезбедија оптимални средини за развој на азбестиформни фази.

Претходните студии и нашите анализи потврдуваат дека контактите помеѓу серпентинитите и карбонатните единици играат особено важна улога во локализирањето на фиброзните минерали преку создавање поволни физичко-хемиски услови за кристализација (Schmid, 2020)

Петрографското и минералошкото толкување во ова истражување се протега надвор од едноставната идентификација на минералите, со цел наместо тоа да се разберат процесите што довеле до нивното формирање. Анализите со тенок пресек покажуваат дека серпентинизацијата се случила низ неколку еволутивни фази, вклучувајќи прогресивни трансформации од примарни ултрамафични минерали до различни серпентински фази. Присуството на псевдоморфни текстури, зони на микрофрактура и префериран ориентации ја демонстрира важноста на тектонската контрола на протокот на течности и формирањето на влакнести фази. Ова ја поддржува хипотезата дека дистрибуцијата на хризотилот не е случајна, туку тесно поврзана со геолошките структури активни за време на промената (Wilk, 2019).

Статистичката варијабилност на минералните фази откриена со XRD анализи укажува на висока минералошка хетерогеност. Зголемените вредности на стандардното отстапување и коефициентот на варијација за антигорит и хризотил сугерираат фрагментирани и локално контролирани распределби, додека другите фази покажуваат поуниформни обрасци (Ceci, 2025). Овој статистички модел е конзистентен со петрографските набљудувања и резултатите од геостатистичкото моделирање, во кои вариограмите и кригингот укажуваат на ограничен просторен континуитет на азбестиформните фази. Друг важен аспект на истражувањето е интегрирањето на лабораториските резултати со просторните анализи и геостатистичкото моделирање (Sinani, 2026). Примената на кригинг интерполацијата овозможи изградба на модели за

дистрибуција на серпентински минерали и идентификација на зони со зголемен потенцијал на опасност. Сепак, овие модели се толкуваат како индикативни, бидејќи резултатите зависат од структурата на вариограмот и густината на земање примероци. Мапите на кригинг варијанса покажуваат зголемена несигурност во периферните области, нагласувајќи ја потребата од погуст мрежи за земање примероци во идните истражувања.

Концептуално, истражувањето јасно прави разлика помеѓу минералошкото присуство и потенцијалниот опасност. Идентификацијата на хризотил и други влакнести фази претставува потенцијал за геолошка опасност, додека реалниот опасност зависи од антропогените фактори кои го контролираат ослободувањето на влакна, условите на дисперзија и изложеноста на животната средина. Од методолошка гледна точка, комбинираната употреба на тенки делови, XRPD и SEM-EDX претставува интегриран пристап кој овозможува повеќедимензионално разбирање на геолошките процеси и потенцијалните опасности од контаминација. Тенките делови обезбедуваат текстурални и структурни информации во оптичка микроскопска скала; XRPD нуди фазна идентификација и квантификација на кристалните минерали; и SEM-EDX овозможува проценка на фиброзната морфологија и хемискиот состав. Интеграцијата на овие три методи значително ја зголемува веродостојноста на толкувањето (Sinani, 2026).

4.1.1. Подготовка на примероци за XRPD и SEM

И покрај фактот дека има неколку значајни напредок во подготовката на примерокот во последните три децении, подготовката на примерокот останува еден од најголемите предизвици и ограничувачки фактори во геохемиската анализа (Elezaj, 2008).

Собраните примероци се транспортирани во Лабораторијата на Универзитетот во Митровица за физичка подготовка. Првично, примероците беа мелени со помош на мелница Пин Јан додека не се постигне фина гранулометрија (Слика 16а). По мелењето, се користеа сита за одвојување на материјалот и беше избрана фракцијата со големина на честички $\leq 63 \mu\text{m}$.

Од оваа фракција беа подготвени точно 10 g материјал за секој примерок, кој потоа беше спакуван и подготвен за понатамошни минералошки и микроскопски анализи (слика 16) (Park, 2016).

Примероците од карпи и присуството на минерали во овие карпи покажуваат различни големини на честички, груби површини и нехомогени состави; затоа, посебно внимание беше посветено на минимизирање на нивното потенцијално влијание врз точноста на резултатите (Park, 2016; Goldstein, 2003).



Слика 16. Мелница со пин Јан што се користи за мелење примероци; (б) примероци од прав по хомогенизација со тежина од 10 g, подготвени за испорака во лабораторија
Figure 16. (a) Pin Yan mill used for grinding rock samples to fine granulometry prior to mineralogical and geochemical analyses; (b) representative powdered samples (Samples 1-20) after homogenization and weighing to 10 g, prepared for submission to laboratory analysis.

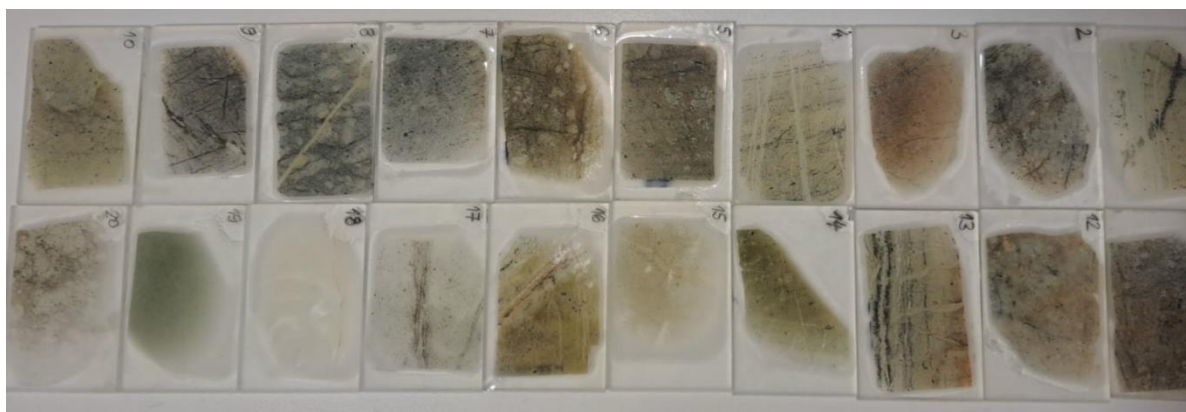
4.1.2. Подготовка на примерок за тенок пресек

За време на подготовката на тенок пресек, сите примероци првично беа собрани *in situ* од карпите и избрани врз основа на структурниот интегритет, литолошката репрезентативност и присуството на вени или серпентинизирани зони од минералошки интерес (а). Оваа постапка беше спроведена во Природните науки лабораторија на Montanuniversität Leoben, Австрија. Примероците беа исечени со помош на дијамантска пила во мали блокови со соодветни димензии и последователно монтирани на стаклени лизгалки со помош на епоксидна смола со низок вискозитет за да се обезбеди ефективна пенетрација во микрофрактури и соодветна механичка стабилност (б), изложување на свежи површини при минимизирање на контаминација и термичка промена (в). Избраните блокови беа исчистени со дестилирана вода и, по сушењето, беа подготвени за полирање како завршна фаза на подготовка (г).

Примероците потоа беа подложени на последователни фази на полирање користејќи прогресивно пофини абразивни фракции додека не се постигне стандардна дебелина од приближно 30 μm (д). Во текот на оваа фаза, беа извршени периодични микроскопски проверки за да се потврди дебелината, транспарентноста и оптичкиот квалитет на тенките делови. Готовите делови беа исчистени, означени со единствени шифри за идентификација и безбедно спакувани за меѓународен транспорт (ѓ).

Петрографската анализа и минералошкото толкување беа спроведени на Универзитетот Зонгулдак Булент Еџевит (67100 Зонгулдак, Турција) со помош на поларизирачки микроскоп под пренесена и рефлектирана светлина. Овој интегриран работен тек обезбедува целосна следливост на примерокот, висок аналитички квалитет и научна веродостојност на резултатите од студијата (Sinani, 2025; Goldstein, 2003).





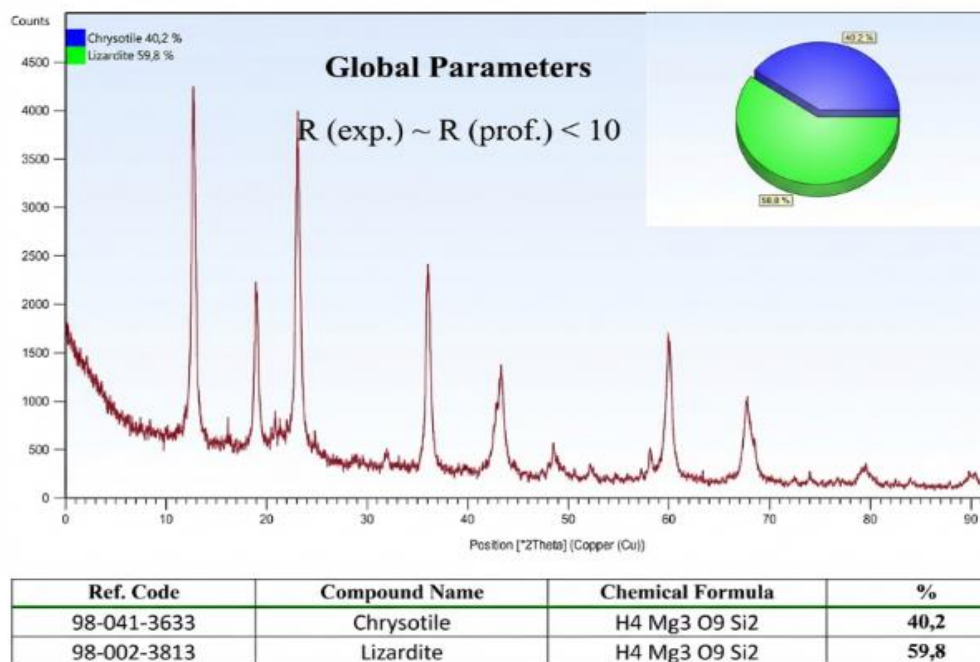
Слика 17. (а) Подготовка на примероци од карпи и тенки пресеци за петрографска анализа; (б) репрезентативни теренски примероци; сечење и епоксидна монтажа; (в) свежо исечени површини; (г) исчистени и исушени блокови; (д) прогресивно полирање до $\sim 30 \mu\text{m}$; (е) завршени тенки делови подготвени за анализа.

Figure 17. (a) Preparation of rock samples and thin sections for petrographic analysis; (b) representative field samples; cutting and epoxy mounting; (c) fresh cut surfaces; (d) cleaned and dried blocks; (e) progressive polishing to $\sim 30 \mu\text{m}$; (f) completed thin sections ready for analysis.

4.1.3. Аналитички методи: дифракција на прав со рендгенски зраци (XRPD)

Податоците од XRD беа обработени со користење на софтверот HighScore Plus, при што се применуваше методот на рафинирање на Ритвелд за квантитативна фазна анализа. Првично, необработените шеми на дифракција беа коригирани за позадина и инструментални ефекти. Идентификацијата на фази беше извршена со користење на базата на податоци на ICSD преку процедура за пребарување-совпаѓање. Последователно, беше конструиран структурен модел кој ги вклучува сите идентификувани минерални фази.

Усовршувањето се вршеше итеративно со прилагодување на факторите на скалата, параметрите на позадината, функциите на профилот на врвот и параметрите на единицата ќелија додека не се постигне конвергенција. Квалитетот на префинетоста беше оценет со користење на факторите на доверливост (R_p и R_{wp}), кои беа постојано под 10%, што укажува на добро вклопување помеѓу набљудуваните и пресметаните обрасци. Квантитативните фазни пропорции беа пресметани врз основа на рафинирани фактори на скала. Резултатите покажуваат конзистентност помеѓу XRD-Rietveld и SEM набљудувањата, потврдувајќи ја веродостојноста на минералошкото толкување (Cecić, 2025).



Слика 18. XRPD дифрактограм кој ја илустрира интерпретацијата на врвовите на дифракција и идентификацијата на фази во анализата на дифракционата прашок со рендгенски зраци.

Figure 18. XRPD diffractogram illustrating the interpretation of diffraction peaks and phase identification in X-ray powder diffraction analysis.

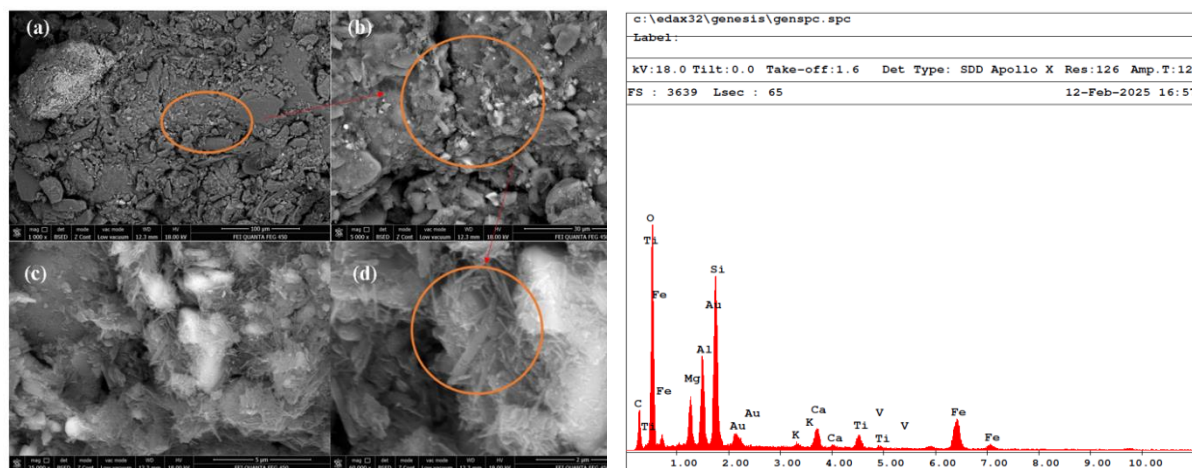
4.1.4. Скенирачка електронска микроскопија со енергетско-дисперзивна спектроскопија (SEM–EDS)

За да се испита морфологијата и хемискиот состав на анализираните примероци се користеше скенирачка електронска микроскопија заедно со енергетска дисперзивна рендгенска спектроскопија (SEM-EDS). SEM обезбедува сликање со висока резолуција на минералните површини и микроструктурите, овозможувајќи набљудување на големината, обликот и текстураалните односи, додека EDS овозможува брзо полуквантитативно определување на елементарниот состав преку детекција на карактеристични рендгенски зраци (Rinaudo, 2003).

Анализите се направени со помош на електронски микроскоп за скенирање FEI Quanta FEG 450. Набљудувањата беа извршени во режим на низок вакуум со помош на детектор за расфрлани електрони назад (BSE) за да се подобри композицискиот контраст. Напонот за забрзување беше поставен помеѓу 15-20 kV. ЕДС анализите беа спроведени на избрани точки и области за да се утврди елементарниот состав на минералните фази.

Примероците беа анализирани со нивно обложување со тенок слој од јаглерод и злато, овој комбиниран пристап беше искористен за да се потврдат

минералните фази идентификувани со XRD, да се карактеризира варијабилноста на составот во зрната и да се разликуваат азбестиформните од неазбестиформните морфологии засновани на навика на влакна и микроструктурни карактеристики.



Слика 19. SEM–EDS анализа на минералните фази: (a) SEM микрографија која ја илустрира минералната морфологија и микроструктурните карактеристики при големо зголемување, истакнувајќи ја текстурата, обликот и фиброзните карактеристики на зрната; (б) Спектарот на EDS кој го покажува елементарниот состав на анализираната област за полуквантитативна хемиска карактеризација на минералната фаза.

Figure 19. SEM–EDS analysis of mineral phases: (a) SEM micrograph illustrating mineral morphology and microstructural features at high magnification, highlighting grain texture, shape, and fibrous characteristics; (b) EDS spectrum showing elemental composition of the analyzed area for semi-quantitative chemical characterization of the mineral phase.

4.1.5. Геостатистичко моделирање и просторна визуелизација на дистрибуцијата на минералошките фази врз основа на XRPD податоци

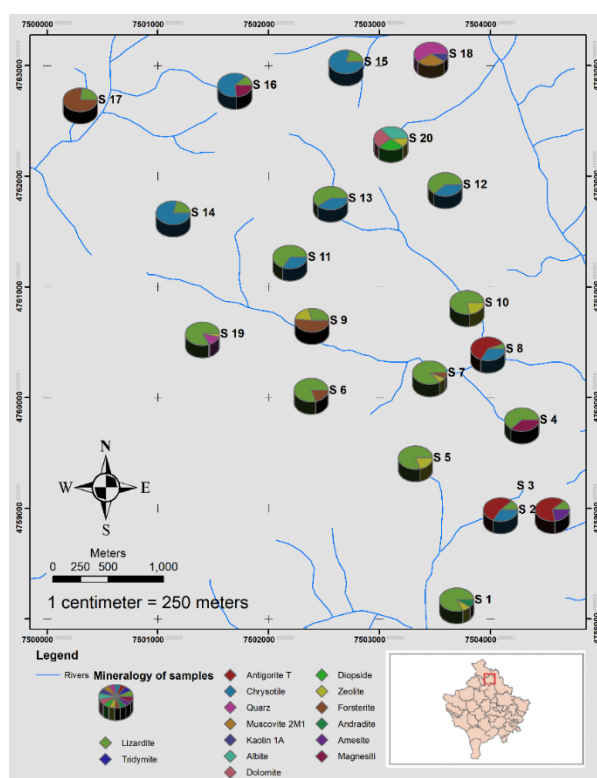
Графичкиот приказ на минералошката фазна дистрибуција, врз основа на XRD анализи и геостатистичко моделирање со помош на кригинг, ја рефлектира просторната хетерогеност на минералите од серпентинска група во рамките на испитуваната област и овозможува идентификација на зони со релативно поголемо или помало изобилство на специфични фази и во 2D и во 3D димензии (Mellini, 2013). Мапите на дистрибуција и радијалните дијаграми покажуваат дека антигоритот и лизардитот покажуваат пошироки просторни размери и посилен просторен континуитет поврзан со различни процеси на серпентинизација и услови на притисок-температура, додека нивните политипови (на пр., Антигорит-Т средина, Лизардит и Хризотирит ги одразуваат локалните микробиолошки услови) (Mukasa-Tebandeke, 2015). Хризотилот прикажува високо фрагментирана дистрибуција со изолирани врвови на концентрација, нагласувајќи ја неговата структурно контролирана природа. Интерполацијата

беше извршена во Golden Software Surfer преку експериментални вариограми и вградени теоретски модели (сферични или гаусови), чии параметри (грутка, праг, опсег) служат како влезни податоци за кригинг за генерирање интерполирани површини и 2D-3D контурни мапи. Резултатите укажуваат на умерени до добро дефинирани просторни структури за антигорит и лизард, поддржувајќи ја веродостојноста на кригинг, додека високиот сооднос на грутка и праг за хризотил сугерира слаб просторен континуитет и бара претпазливо толкување. Мапите на кригинг варијанса потврдуваат помала несигурност во близина на местата за земање примероци и поголема несигурност кон периферните зони, нагласувајќи ја потребата за погусто идно земање примероци.

5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

5.1. Графичка распределба на минералошките фази

Минеролошкиот состав на секоја точка за земање примероци е визуелизиран со користење на цилиндрични графикони, што овозможува директна споредба на пропорциите на фазите меѓу поединечните локалитети. Слика 20 ја прикажува просторната дистрибуција на азбестни минерални фази добиени од минералошки анализи на теренски примероци со геогенетска референца (Sinani, 2025; MDP, 2020). Картата ги прикажува релативните проценти на антигорит, лиздрит и хризотил, кои ги претставуваат доминантните минерали од серпентинската група пронајдени во ултрамафичните карпи на проучуваната област, додека претставени се и секундарни алтерациски минерали, вклучувајќи кварц, мусковит, доломит и зеолит. Таквата варијабилност е карактеристична за хетерогените патишта на серпентинизација и текстуралната еволуција на ултрамафичните карпи контролирани од процесите на интеракција на течни карпи, како што е опишано во класичните студии за серпентинските текстури и серпентинизацијата (Wilk, 2019).

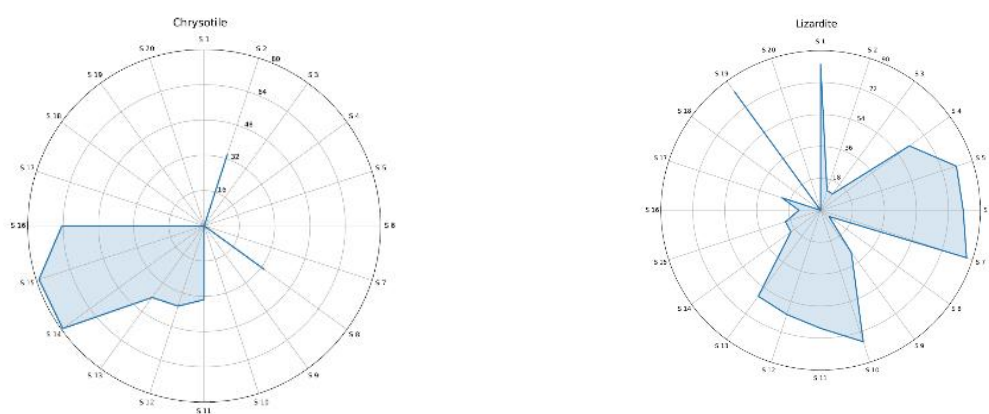


Слика 20. Просторна дистрибуција на минералошкиот состав на примероците претставени со кружни дијаграми.

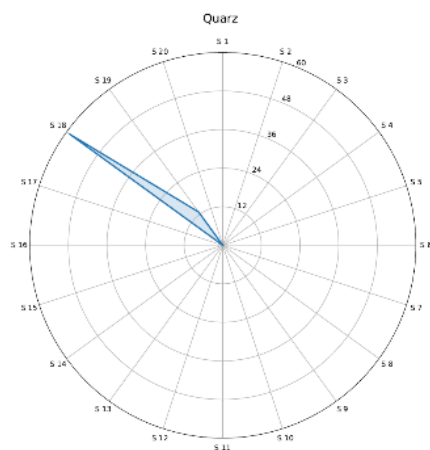
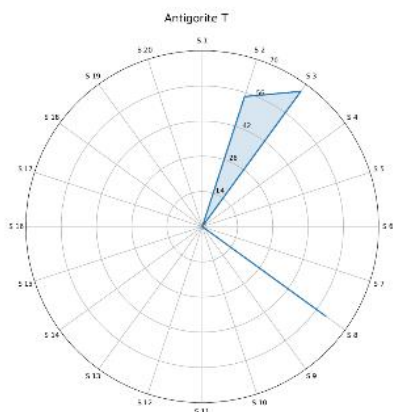
Figure 20. Spatial distribution of mineralogical composition of samples presented using pie charts.

Овие слики ги прикажуваат страничните варијации помеѓу минералните фази и нивните врски со хидрографската мрежа и геолошкиот контекст на проучуваната област.

Радарските дијаграми се суштинска алатка за визуелизација и толкување на минералошки податоци во повеќе варијабли, особено кога е претставена релативната распределба на минералните фази низ примероците и треба да се процени. Нивната употреба е фундаментална во оваа студија, бидејќи тие овозможуваат истовремено споредување на моделите на концентрација и варијабилност на серпентинските минерали, како што се хризотил, лизардит и антигорит, во рамките на проучуваните податоци.

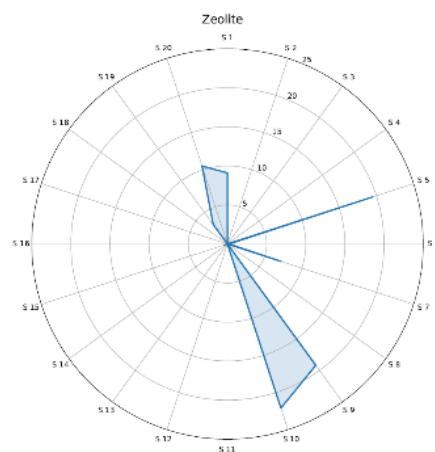
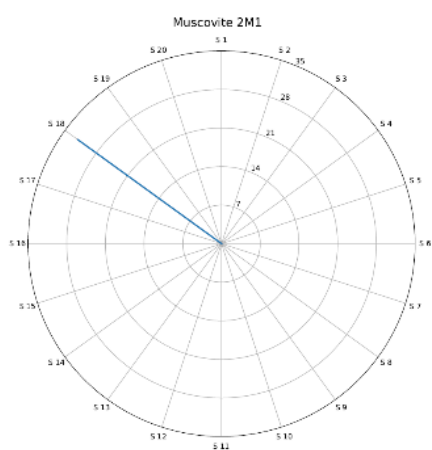


хризотил прикажан на слика (21-а) Лизардит прикажан на Слика (21-б)
покажува многу хетероген и покажува значително ограничена
локализиран модел, со високи дистрибуција меѓу сите
концентрации во примероците S14, S15 идентификувани фази, со врвни
и S16 кои се движат од 64% до 79%, концентрации во примероците S7,
додека умерени вредности се наоѓаат S19, S1, S5, S6 и S10, каде што
во примероците S2, S8, S11, S12 и S13. вредностите надминуваат 75%.
Високото присуство на хризотил во Умерени вредности се прикажани во
ограничена и локализирана група примероците S4, S11, S12 и S13,
примероци укажува на контролирано додека помали количини се
формирање од страна на венски забележани во S2, S3, S8 и S16.
структури, претставени како пукнатини
или микровени каде што се создаваат
услови за проток на флуид.



Антигорит-Т на слика (21-с) покажува значително ограничена дистрибуција, која се јавува само во примероците S2, S3 и S8, каде што концентрациите се движат од 54% до 66%. Отсуството на оваа фаза на друго место покажува дека антигоритот е ограничен на локализирани сектори кои се карактеризираат со релативно повисоки температурни услови.

Кварцот на сликата (21-г) е присутен само во S18 и S19, со изразен максимум во S18 до 59%. Таквото присуство е во согласност со фокусираниот настан на силицификација, поврзан со активноста на хидротермалната течност долж структурните канали.

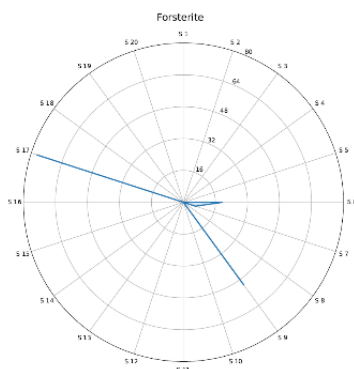


Московитот 2M1 и каолинитот 1A на сликата (21-д) се јавуваат исклучиво во S18, со вредности од 9% ГОРЕ 32%, соодветно Нивната истовремена појава на една локација сугерира

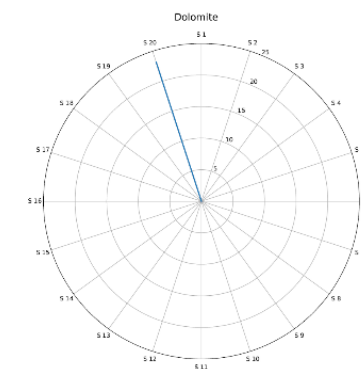
Зеолитот на слика (21-ф) претставува повторена дистрибуција, во примероците S10, S5 и S9, и помало присуство во S1, S7, S15, S19 и S20. Оваа појава е

локализирана хидротермална метасоматска промена.

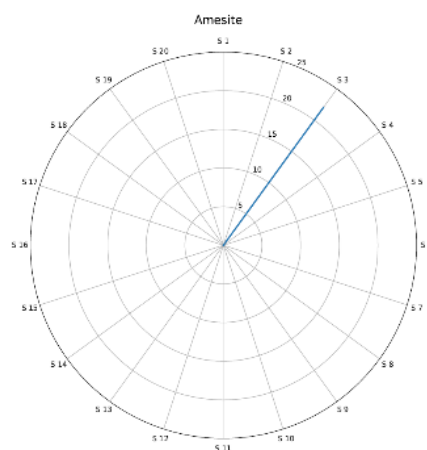
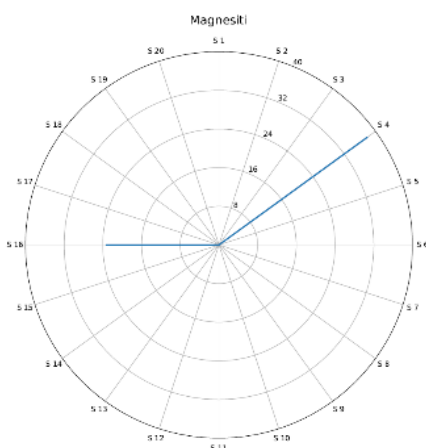
или типична за нискотемпературна хидротермална промена, каде што минералите на зеолит се таложат и се наоѓаат во порите и пукнатините во втората фаза.



Форстерит на сликата (21-г) се појавува во примероците S17 и S9, со високи вредности од 77% и 51%, а во помали количини во S6 и S7. Дистрибутивни реликвии на нецелосно серпентинизирана ултрамафична течна маса.



Доломитот на сликата (21-д) е ограничен на примерокот S20, со значителни количини (37%, 23% и 29%). Овој збир на овие минерали укажува на локализиран метасоматски домен на интеракцијата помеѓу течностите богати со Ca-Mg-Na и ултрамафичните карпи домаќини.



Магнезитот на слика (21-h) се јавува во Амезитот на Слика (21-i) е S4 и S16 со вредности од 38% и 23%, ограничен на примерокот S3 со што покажува високи концентрации на вредност од 22%, што одразува CO₂ што укажува на локализирана локализирана хлоритна промена карбонизација со структурирање за што претставува преодна средина создавање секундарен карбонат помеѓу серпентинските и хлоритните формации.

Слика 21. Радарските дијаграми 21a–21i ја илустрираат распределбата на минералните фази, истакнувајќи го локализираното збогатување на лизардит, хризотил и антигорит-Т.

Figure 21. Radar diagrams (21a–21i) illustrate the distribution of mineral phases, highlighting localized enrichment of lizardite, chrysotile, and antigorite-T.

5.2. Описна статистика на минералошка анализа

Минералошките состави на анализираните примероци, одредени со дифракција на X-зраци (XRPD), се прикажани во Табела 1. Резултатите покажуваат изразена варијабилност во присуството и релативната количина на минерали од серпентинската група во примероците S1-S20. Во резултатите доминираат минерали од серпентинската група, при што се појавуваат лизардит, антигорит и хрисотил, заедно со минерали што содржат Си, како што се кварц, мусковит, доломит и зеолит, кои се карактеристични за серпентинизираниот ултрамафични карпи и одразуваат различни фази на серпентинизација (Sinani, 2026).

Табела 1. Минералoшки состав на примероци од регионот Бајгора врз основа на анализа на рендгенска дифракција (XRPD)

Table 1. Mineralogical composition of samples from the Bajgora bedrock based on X-ray diffraction (XRPD) analysis

Примерок	X	Y	Лизардит	Тридимит	Антигорит	Chrysotile	Quarz	Muscovite 2M1	Kaolin 1A	Albite	Dolomite	Diopside	Zeolite	Forsterite	Andradite	Amesite	Magnesiti
S 1	7503699	4758173	82.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.1	0	8.7	0	0
S 2	7504095	4758987	11.7	0	54.4	33.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S 3	7504563	4758989	11.4	0	66.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.1	0
S 4	7504287	4759799	61.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		37.9
S 5	7503326	4759456	80.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19.5	0	0	0	0
S 6	7502385	4760067	80.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	19.4	0		0
S 7	7503456	4760225	86.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.2	6.3	0	0	0
S 8	7503981	4760440	5.9	0	60.6	33.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S 9	7502393	4760698	29.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19.2	51.3	0	0	0
S 10	7503792	4760859	77.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.1	0	0	0	0
S 11	7502193	4761271	66.5	0	0	33.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S 12	7503594	4761926	61.7	0	0	38.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S 13	7502559	4761803	59.8	0	0	40.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S 14	7501139	4761670	20.7	0	0	79.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S 15	7502699	4763034	20.8	0	0	78.8	0	0	0	0	0	0	0.4	0	0	0	0
S 16	7501695	4762824	12.2	0	0	64.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23.3
S 17	7500300	4762691	22.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	77.1	0	0	0
S 18	7503467	4763106	0	0	0	0	58.9	32.2	8.9	0	0	0	0	0	0		0
S 19	7501403	4760576	82.5	1.5	0	0	12.8	0	0	0	0	0	3.1	0	0	0	0
S 20	7503105	4762342	0	0	0	0	0	0	0	37.4	23.2	28.8	10.5	0	0	0	0

Резултатите за лизардит во анализираните примероци покажуваат изразена просторна варијабилност. Таквата хетерогеност е карактеристична за неуниформни процеси на серпентинизација контролирани од структурна пропустливост, патишта на течности и физичко-хемиски услови кои се развиваат (Karamat Ali, 2017). Присуството на неколку полиморфи на лизардит (2H1, 2H2 и 1T) сугерира повеќестепена кристализација под променливи режими на температура и притисок за време на прогресивна серпентинизација.

Резултатите за антигоритот покажуваат многу високи резултати во некои примероци, каде што тој доминира минералошки. Формирањето на антигоритот обично се поврзува со услови на серпентинизација на релативно повисоки температури во споредба со лизардит и хрисотил, што одразува термичка еволуција за време на тектонска седиментација или хидротермални активности што се случиле. Неговите модели на дистрибуција укажуваат на рекристализација долж микрофрактури и ткаенини поврзани со деформација под променливи термички услови.

Хризотилот, како азбестиформен минерал со еколошка важност, се јавува само во локализираните структурни домени. Неговото формирање најчесто е поврзано со доцната фаза на циркулација на течност по фрактури и зони на смолкнување при ниски до умерени температурни услови, каде што затегнувачките микропукнатини обезбедуваат поволни средини за раст на влакна

Покрај серпентинитните минерали, други фази претставуваат и секундарна геохемиска еволуција. Појавата на кварц потврдува присуство на локализирана силицификација поврзана со хидротермални флуиди богати со Si, додека мусковитот и каолинитот укажуваат на нискотемпературна хидротермална промена и процеси на формирање глина. Доломитот и неговата висока содржина на јаглерод се синхронизирани со секундарната карбонизација предизвикана од флуиди што содржат CO₂, каде што интеракцијата со ултрамафичните карпи се чини дека е добро координиран процес.

Изданокот на зеолит потврдува хидротермална промена во подоцнежните хидротермални процеси развиени на ниски температури и во услови типични за постсерпентинизациски средини. Локално зачуваниот форстерит претставува недовршен хидротермален процес и се појавува како реликт.

Описните статистички параметри пресметани за минералошките фази се претставени во Табела 2. Средните, медијалните и модалните вредности од нула низ неколку фази укажуваат на интермитентна појава и дисконтинуирана просторна дистрибуција.

Табела 2. Описна статистика на минералните фази на серпентинска група идентификувани во анализираните примероци

Table 2. Descriptive statistics of serpentine group mineral phases identified in the analyzed samples

	Лизардит	Тридимит	Антигорит Т	Хризотил	Кварц	Московит 2М1	Каолин 1А	Албит	Доломит	Диопсид	Зеолит	Форстерит	Андрадит	Амезит	Магнезити
Средно	43.745	0.075	9.075	20.100	3.585	1.610	0.445	1.870	1.160	1.440	4.565	7.705	0.435	1.300	3.060
Стандардна грешка	7.276	0.075	4.975	6.294	2.981	1.610	0.445	1.870	1.160	1.440	1.682	4.532	0.435	1.300	2.172
Медијана	44.650	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Режим	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Стандарден дев.	32.539	0.335	22.251	28.149	13.330	7.200	1.990	8.363	5.188	6.440	7.523	20.268	1.945	5.360	9.712
Примерок варијанса	1058.756	0.113	495.098	792.348	177.685	51.842	3.961	69.938	26.912	41.472	56.591	410.779	3.785	28.730	94.317
Куртоза	-1.823	20.000	3.020	-0.044	17.905	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	0.912	7.967	20.000	17.000	9.801
Искривување	0.006	4.472	2.158	1.105	4.178	4.472	4.472	4.472	4.472	4.472	1.507	2.889	4.472	4.123	3.196
Опсег	86.500	1.500	66.500	79.300	58.900	32.200	8.900	37.400	23.200	28.800	22.100	77.100	8.700	22.100	37.900
Минимум	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Максимум	86.500	1.500	66.500	79.300	58.900	32.200	8.900	37.400	23.200	28.800	22.100	77.100	8.700	22.100	37.900
Збир	874.900	1.500	181.500	402.000	71.700	32.200	8.900	37.400	23.200	28.800	91.300	154.100	8.700	22.100	61.200
брои	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Табела 3. Статистички параметри (средни вредности, 95% интервали на доверба, резултати од t-тест и p-вредности) за проучуваните минералошки фази

Table 3. Statistical parameters (mean values, 95% confidence intervals, t-test results, and p-values) for the studied mineralogical phases

Параметар	Лизардит	Tridymite	Антигорит	Хризотил	Кварц	Московит 2M1	Каолин 1A	Албит	Доломит	Диопсид	Зеолит	Форстерит	Андрадит	Амезит	Магнезит
Средно	43.745	0.075	9.075	20.100	3.585	1.610	0.445	1.870	1.160	1.440	4.565	7.705	0.435	1.300	3.060
Долна CI (95%)	28.516	-0.082	-1.338	6.927	-2.654	-1.760	-0.486	-2.044	-1.268	-1.574	1.045	-1.781	-0.475	-1.421	-1.486
Горен CI (95%)	58.974	0.232	19.488	33.273	9.824	4.980	1.376	5.784	3.588	4.454	8.085	17.191	1.345	4.021	7.606
±CI (половина ширина)	15.229	0.157	10.413	13.173	6.239	3.370	0.931	3.914	2.428	3.014	3.520	9.486	0.910	2.721	4.546
t-стат(vs 0)	6.012	1.000	1.824	3.194	1.203	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	2.714	1.700	1.000	1.000	1.409
p-вредност (двоопашка)	0.0000	0.3299	0.0839	0.0048	0.2439	0.3299	0.3299	0.3299	0.3299	0.3299	0.0138	0.1054	0.3299	0.3299	0.1750

Статистичката евалуација на минералошките податоци беше спроведена со тестирање на нултата хипотеза (H_0 : средна вредност = 0) за секоја фаза, идентификување на минералите и примена на тест со две опашки заедно со описни статистички параметри. Резултатите покажуваат дека неколку главни серпентински минерали, како и придружните фази, покажуваат статистички значајни средни вредности, додека други остануваат спорадични и од помала важност. Особено, Lizardite, Chrysotile и Antigorite-T покажуваат релативно високи средни концентрации низ локациите, со широк опсег, што ја одразува нивната доминантна улога во склопот на минералите и нивниот силен придонес во севкупната композициска варијанса. Нивните релативно високи стандардни отстапувања, заедно со покачените коефициенти на варијација, дополнително укажуваат на изразена просторна хетерогеност конзистентна со структурно контролираните процеси на серпентинизација.

Голем број дополнителни секундарни минерални фази, како што се каолин 1A, андрадит и московит 2M1, прикажуваат релативно ниски средни вредности и интервали на доверба кои се приближуваат или се преклопуваат на нула, што укажува на интермитентна појава и ограничен просторен континуитет. Минералите како што се кварц, албит, доломит и диопсид покажуваат средни статистички вредности, што значи дека локализираните метасоматски или хидротермални влијанија одиграле улога во нивната регионална дистрибуција. Појавата на високи вредности на куртоза и искривување за неколку фази ги потврдува ненормалните распределби, што укажува на групирани или структурно локализирани модели на минерализација наместо униформа дисперзија.

Комбинираните описни и инференцијални статистички резултати покажуваат дека минералошкиот систем се карактеризира со силна композициска варијабилност и процеси на повеќефазни алтерации. Во овој случај, доминацијата на серпентинските минерали, заедно со неправилната дистрибуција на придружните фази, поддржува модел на хетерогена течна интеракција на карпите контролирана од тектонски патишта, локализиран метасоматизам и нецелосна промена на ултрамафичниот протолит. Ваквите статистички докази дополнително ја оправдуваат примената на просторно моделирање, интерполација и мултиваријантна анализа за напредна

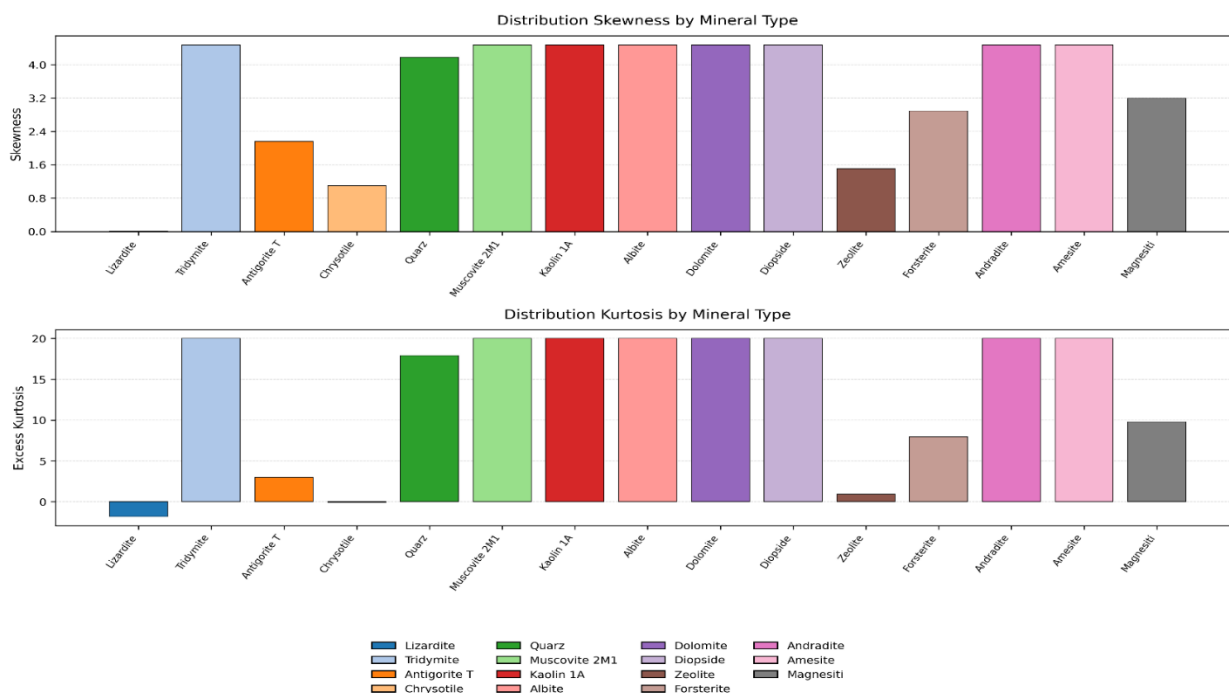
интерпретација на моделите на дистрибуција на минерали во областа на проучување.

5.3. Анализа на асиметрија и куртоза

Односот помеѓу искривеноста и куртозата за минералошките фази идентификувани во проучуваната област е претставена на Слика 22 (а-б) и дава детална евалуација на статистичкиот карактер на дистрибуцијата на содржината на минералите. Искривеноста го опишува степенот на асиметрија на распределбата во однос на средната вредност, додека куртозата ја рефлектира концентрацијата на вредностите околу средната вредност и релативната тежина на опашките на дистрибуцијата. Секоја лента претставува специфична минерална фаза, прикажана во посебна боја, истакнувајќи ги разликите во шемите на дистрибуција и варијабилноста меѓу серпентинските фази и придружните минерали.

Резултатите укажуваат на доминација на позитивни вредности на искривување за повеќето фази, што укажува на правилно искривени распределби и присуство на локализирани високи концентрации или епизоди на селективно збогатување. Спротивно на тоа, одредени фази, како што е лизард (во некои примероци), покажуваат негативна или близу нула искривување, одразувајќи повеќе симетрични распределби или тенденција кон акумулација во интервали со повисоки концентрации. Зголемените вредности на куртозата, особено во неколку силикатни и карбонатни фази, укажуваат на лептокуртични распределби кои се карактеризираат со изразени врвови и тешки опашки, што имплицира силно влијание на оддалечените и значајна литолошка хетерогеност во формацијата. Во некои случаи, негативните или речиси нормалните вредности на куртозата сугерираат порамни (платикуртични) распределби, кои се поврзани со порамномерна дисперзија на минералната фаза.

Севкупно, комбинираната евалуација на искривување и куртоза потврдува дека дистрибуцијата на содржината на минералите не го следи Гаусовиот модел, туку наместо тоа рефлектира сложен геолошки систем, каде што процесите на серпентинизација, хидротермалната промена и структурните контроли одиграле клучна улога. Ова статистички однесување е во согласност со хетерогената и полифазна природа на ултрамафичниот серпентинитски склоп во истражуваната област.



Слика 22. Искривување и куртоза на првата и втората фаза на минералите од серпентинската група идентификувани во анализираните примероци: (а) искривување и (б) куртоза.

Figure 22. Skewness and kurtosis of the first and second phases of serpentine group minerals identified in the analyzed samples: (a) skewness and (b) kurtosis.

5.4. Корелациона матрица на минералозна анализа

Корелационската матрица е статистички резиме што ја покажува линеарната врска помеѓу минералозските варијабли, помагајќи да се идентификуваат минералните групи и генетските процеси.

Табела 4. Пирсонова корелација матрица за минерални фази на серпентинска група и минерали од втора фаза идентификувани во анализираните примероци.

Table 4. Pearson correlation matrix for serpentine group mineral phases and second phase minerals identified in the analyzed samples.

	Lizardite	Tridymite	Antigorite T	Chrysotile	Quarz	Muscovite 2M1	Kaolin 1A	Albite	Dolomite	Diopside	Zeolite	Forsterite	Andradite	Amesite	Magnesiti
Lizardite	1														
Tridymite	0.280	1													
Antigorite T	-0.450	-0.096	1												
Chrysotile	-0.341	-0.168	0.019	1											
Quarz	-0.252	0.163	-0.115	-0.202	1										
Muscovite 2M1	-0.316	-0.053	-0.096	-0.168	0.977	1									
Kaolin 1A	-0.316	-0.053	-0.096	-0.168	0.977	0.00	1								
Albite	-0.316	-0.053	-0.096	-0.168	-0.063	-0.053	-0.053	1							
Dolomite	-0.316	-0.053	-0.096	-0.168	-0.063	-0.053	-0.053	0.00	1						
Diopside	-0.316	-0.053	-0.096	-0.168	-0.063	-0.053	-0.053	0.00	0.00	1					
Zeolite	0.326	-0.046	-0.261	-0.448	-0.151	-0.143	-0.143	0.186	0.186	0.186	1				
Forsterite	-0.108	-0.089	-0.163	-0.286	-0.108	-0.089	-0.089	-0.089	-0.089	-0.089	0.114	1			
Andradite	0.278	-0.053	-0.096	-0.168	-0.063	-0.053	-0.053	-0.053	-0.053	-0.053	0.142	-0.089	1		
Amesite	-0.254	-0.063	0.603	-0.209	-0.063	0.00	0.00	-0.063	-0.063	-0.063	-0.174	-0.094	-0.063	1	
Magnesiti	-0.008	-0.074	-0.135	0.053	-0.089	-0.074	-0.074	-0.074	-0.074	-0.074	-0.201	-0.126	-0.074	-0.063	1

Умерена негативна корелација е забележана помеѓу лизардит и антигорит-Т, со $r = -0,40$, што укажува дека овие две серпентински фази имаат тенденција да не се формираат истовремено во истите примероци. Оваа инверзна врска меѓу нив сугерира спротивна стабилност, при што антигоритот се формира под релативно високи температури и услови на притисок, додека лизардит е карактеристичен за нискотемпературни средини за серпентинизација. Таквата дивергенција сугерира просторно или термичко формирање во рамките на ултрамафичен карпест систем. Слаба позитивна корелација помеѓу лизардит и хризотил ($r = 0,19$) укажува на ограничено коегзистирање, што е во согласност со делумно преклопување во нивните услови на формирање за време на серпентинизацијата. И двата минерали се формираат во серпентински средини богати со течност; сепак, хризотилот најчесто се јавува по должината на фрактури и лизгачки површини.

Силната корелација помеѓу кварцот и мусковитот 2M1 ($r = 0,977$) укажува на многу кохерентна врска на врските помеѓу овие минерали. Оваа врска силно ја поддржува хидротермалната потекло каде што присуството на течности богати со силициум диоксид укажува на истовремено формирање на фази на кварц и мика. Силните корелации помеѓу кварцот и каолинот 1A ($r = 0,977$), како и помеѓу мусковитот и каолинот ($r = 1,000$) потврдуваат минерален асоцијации генетски поврзани со промена на глината на ниски температури. Умерените позитивни корелации помеѓу албитот, доломитот и диопсидот ($r \approx 0,18$ за доломит диопсид и албит диопсид) сугерираат дека овие минерали се поврзани со метасоматски процеси кои самите содржат течности богати со Ca-Na-Mg. Врската помеѓу нив ги одразува локализираните области каде што интеракциите течност-карпа создале метасоматски реакции кои го модифицирале оригиналниот ултрамафичен протолит. Форстеритот покажува генерално слаби корелации со повеќето примероци во студијата, каде што генерално се појавува како зачувана примарна реликтна фаза добиена од ултрамафичниот протолит. Отсуството на силни корелации укажува дека неговата дистрибуција е во голема мера независна од процесите во фазите на секундарна алтерација.

Магнезитот покажува слаби до умерени корелации со неколку фази, вклучувајќи мала позитивна врска со хризотил ($r = 0,033$) и слаби негативни врски со други минерали.

Овој модел сугерира компатибилност на локализираните процеси на карбонизација предизвикани од течности што содржат CO₂.

Рво истата форма, амазитот ни се појавува со слаби корелации со повеќето минерали, потврдувајќи просторно ограничена појава и формирање под специфични физичко-хемиски услови, каде што постои можност за транзиција помеѓу места со доминантно присуство на серпентин кон оние каде што доминира хлорит.

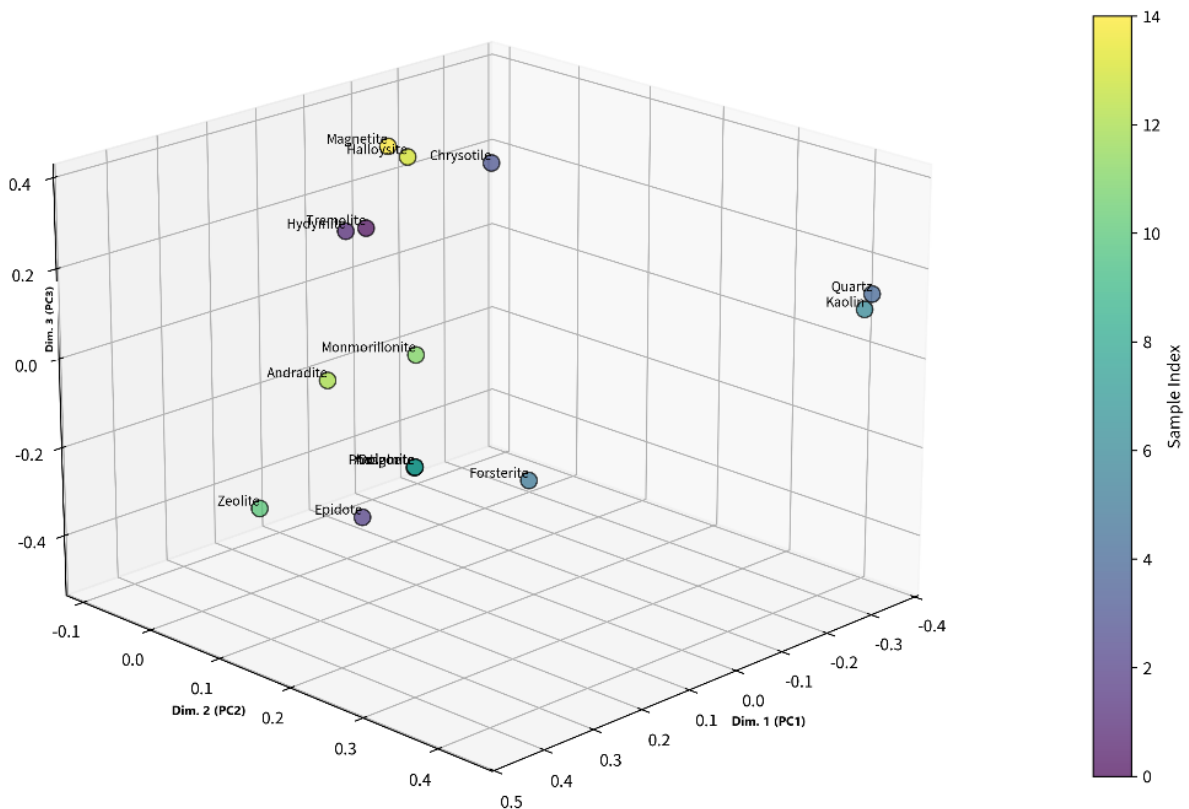
5.5. Анализа на главни компоненти на минералошки фази

Резултатите од PCA покажуваат дека дистрибуцијата на минералите е предизвикана од хетерогени физичко-хемиски услови на минералите, вклучувајќи промени во температурите на формациите и составот на течностите и нивното движење предизвикано од структурната пропустливост. Разделувањето на минералните заедници во PCA просторот поддржува модел на епизодна циркулација на течности и локализирани реакциони зони. Моделите од овој тип се карактеристични за серпентинизирани ултрамафични терански површини кои имаат контролирани структури, каде што мрежите на фрактури и патеките на течности ја диктираат минералошката еволуција.

Табела 5. Карактеристичните вредности и процентот на варијанса објаснети со секоја главна компонента извлечена од PCA

Table 5. Characteristic values and percentage of variance explained by each principal component extracted from PCA

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15
Lizardite	0.0008	-0.3232	-0.46	0.0376	-0.2666	-0.0115	0.0396	-0.1411	-0.2223	-0.4626	0.0052	0.5714	0	0	0
Tridymite	-0.0399	-0.0387	-0.1734	0.048	-0.4645	0.6974	-0.1092	0.3169	0.1219	0.3231	0.0008	0.0275	0.076	-0.1313	-0.084
Antigorite_T	-0.0397	-0.0185	0.4782	0.4336	-0.1211	-0.0303	-0.0143	-0.0328	0.6206	-0.1636	0.0039	0.3907	0	0	0
Chrysotile	-0.0579	-0.1025	0.3648	-0.5225	-0.0229	-0.0857	-0.4129	-0.0717	-0.1618	0.3557	0.0052	0.4937	0	0	0
Quartz	-0.3502	0.4129	-0.1444	0.0195	-0.0867	0.0642	-0.0069	0.0192	0.0061	0.0609	0.0014	0.1343	-0.3537	0.6113	0.3912
Muscovite	-0.3457	0.4264	-0.1085	0.0094	0.0132	-0.0865	0.0167	-0.0495	-0.0203	-0.0086	0.0013	0.1299	-0.1799	-0.1312	-0.7807
Kaolin	-0.3457	0.4264	-0.1085	0.0094	0.0132	-0.0865	0.0167	-0.0495	-0.0203	-0.0086	0.0013	0.1299	0.5294	-0.4727	0.3942
Albite	0.4452	0.3322	0.0015	-0.0343	-0.0669	0.0073	0.0069	0.0436	-0.0354	-0.0478	-0.4069	0.1212	0.5275	0.4292	-0.1937
Dolomite	0.4452	0.3322	0.0015	-0.0343	-0.0669	0.0073	0.0069	0.0436	-0.0354	-0.0478	-0.4069	0.1212	-0.5275	-0.4292	0.1937
Diopside	0.4455	0.3318	0.0004	-0.0337	-0.0669	0.007	0.0069	0.041	-0.0349	-0.0472	0.8177	0.109	0	0	0
Zeolite	0.1883	-0.0659	-0.4257	0.2603	0.1644	-0.121	-0.0108	-0.4748	0.228	0.6096	-0.0006	0.1426	0	0	0
Forsterite	0.0119	-0.0419	-0.0753	0.1318	0.7594	0.282	0.0606	0.4306	-0.0676	0.0132	0.0043	0.3535	0	0	0
Andradite	0.0115	-0.0879	-0.2057	0.1264	-0.1994	-0.6244	-0.1044	0.6677	0.0645	0.2052	0.0012	0.034	0	0	0
Amesite	-0.0243	-0.0076	0.3432	0.545	-0.1555	-0.011	0.2188	-0.0391	-0.6623	0.2543	0.001	0.0866	0	0	0
Magnesite	-0.0243	-0.0668	0.0724	-0.3649	-0.0946	-0.043	0.8675	0.0669	0.1428	0.1977	0.0019	0.1714	0	0	0



Слика 23. Парцела на тридимензионална анализа на главна компонента (PCA) на првите три компоненти (Дим.1-Дим.3).

Figure 23. Three-dimensional principal component analysis (PCA) score plot of the first three components (Dim.1-Dim.3).

Графиконот ги прикажува оптоварувањата и клучните компоненти на секој минерал според главната компонента, додека презентацијата на графиконот во тридимензионална форма ги илустрира просторните односи помеѓу минералните варијабли во рамките на намалениот димензионален простор дефиниран од првите три компоненти (Dim.1-Dim.3).

PC1 е главно контролиран од силните позитивни оптоварувања на албит, доломит и диопсид ($\sim 0,45$ секое), додека е во контраст со силните негативни оптоварувања на кварц ($\sim 0,35$), мусковит ($\sim 0,35$) и каолин ($-0,35$). Затоа, оваа компонента се појавува како градиент на состави помеѓу метасоматските комплекси Ca-Na-Mg и фазите на хидротермална алтерација што содржат силициум диоксид.

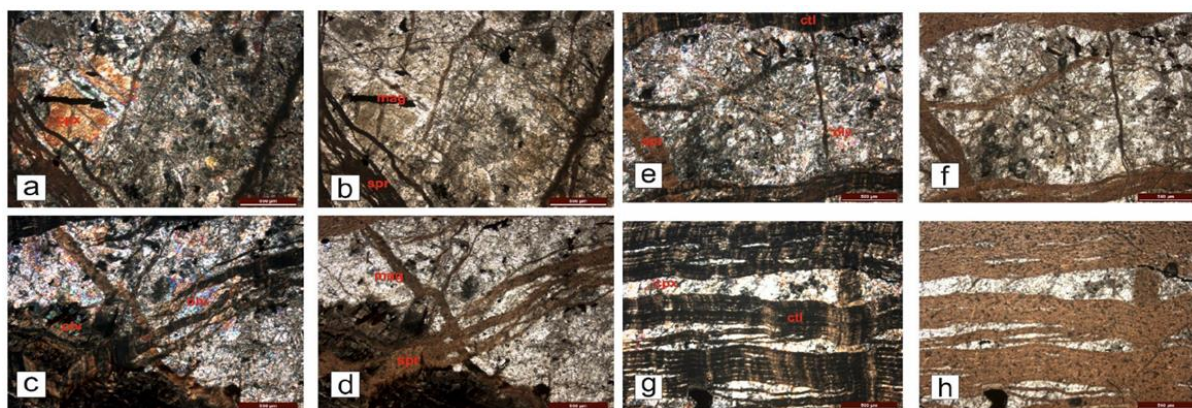
PC2 претставува оптоварувања со позитивни оптоварувања на кварц, мусковит и каолин ($\sim 0,42$), заедно со умерени оптоварувања на албит и доломит ($\sim 0,33$). Оваа компонента претставува секундарна хидротермална алтерација

што го одразува формирањето на минерали во прогресивна минералошка форма предизвикана од хидротермални процеси од течни флуиди.

PC3 е доминиран од минералите Антигорит-Т (0,48) и Амезит (0,34), што укажува на варијабилност поврзана со транзиционите хлоритни заедници во серпентинот. PC3 ја одразува минералошката диференцијација поврзана со метаморфните линии што зависеле од температурата.

5.6. Петрографска анализа на истражуваното подрачје

Во истражуваното подрачје беше спроведена петрографска анализа со тенок пресек со цел да се идентификува минералошкиот состав, структурите, текстурите на карпите, како и геолошките процеси што влијаеле врз нивното формирање. Примероците беа подготвени како тенки пресекувања и испитани под поларизирачки микроскоп, што овозможи идентификација на примарни и секундарни минерали, нивните односи и степенот на промена. Посебно внимание беше посветено на идентификацијата на фазите поврзани со минерализацијата, како и текстурните карактеристики што ги одразуваат условите на формирање и геолошката еволуција на истражуваното подрачје.



Слика 24. Петрографски карактеристики на Примерокот 1: изменета ултрамафична карпа со реликтен клинопироксен, псевдоморфна замена на оливин и доказ за харцбургитски до лерзолитски протолит (a-h).

Figure 24. Petrographic features of Sample 1: altered ultramafic rock with relict clinopyroxene, pseudomorphic olivine replacement, and evidence of a harzburgitic to lherzolitic protolith (a-h).

Оваа бројка покажува ултрамафична карпа која претрпе интензивна промена, што резултира со значително бришење на нејзините примарни магматски текстури. Сепак, реликтните минералошки и текстурални карактеристики укажуваат на тоа дека протолитот бил перидотит изведен од мантија, најверојатно со харцбургитски до лерзолитски состав. Зачувувањето на

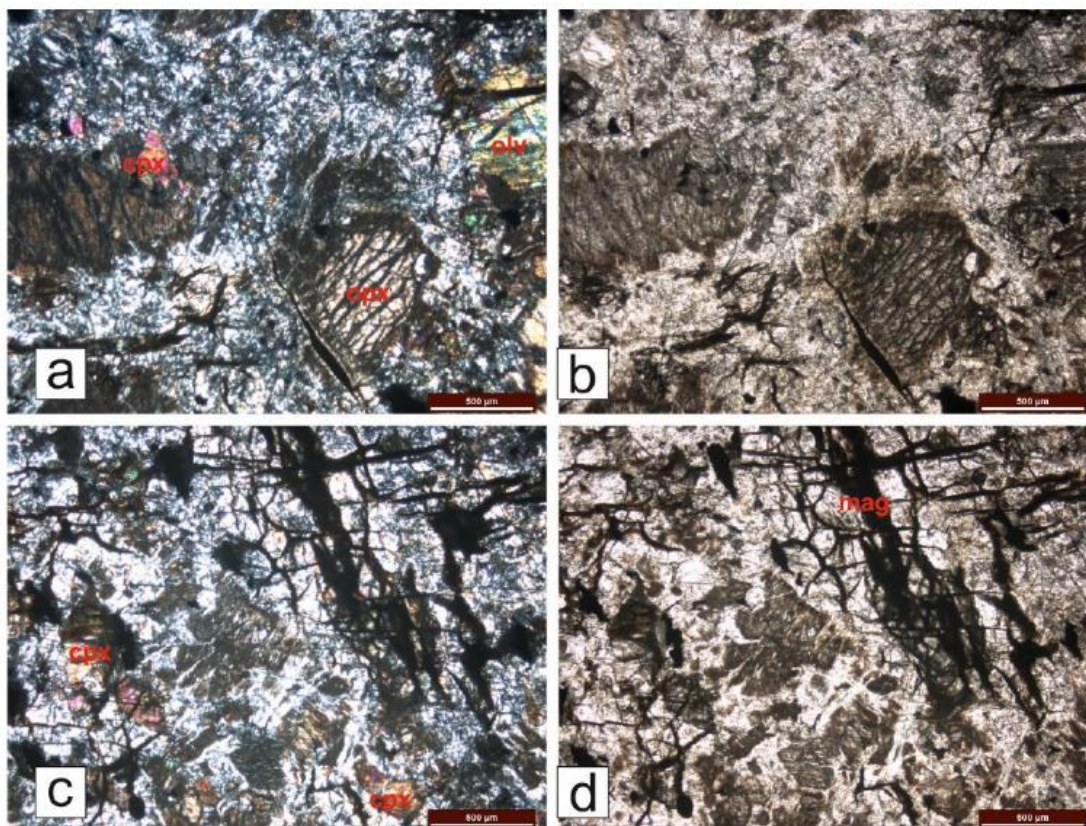
кристалите на клинопироксен (Cpx) отпорни на промена, заедно со псевдоморфните замени на оливин (Ol), претставува клучен доказ кој го поддржува ова толкување.

Добро развиена мрежна текстура доминира во карпестата матрица, рефлектирајќи ги псевдоморфите на оливин. Во рамките на оваа текстура, оливинот се појавува со бои со висока интерференција во мрежните јадра, додека серпентинските минерали од типот на лизард (Lz) прикажуваат ниска двокршност и сива до црна боја на интерференција што ги оцртуваат границите на мрежата. Оваа псевдоморфна текстура за замена е типична за процесите на хидратација со ниски температури кои влијаат на ултрамафичните карпи. Железото ослободено од кристалната решетка на оливин за време на серпентинизацијата е редистрибуирано и концентрирано главно во центрите на вените и долж мрежните граници, каде што се формирале непротирни минерали како магнетит и хематит. Соживотот и акумулацијата на овие железни оксиди ја разграничуваат мрежната рамка и ги рефлектираат реакциите на редокс поврзани со интеракцијата на течните карпи.

Прогресивната промена во Примерокот 1 е дополнително потврдена со интензивно дамкање на железен оксид и структури слични на дамки, развиени околу зрната оливин. Овие карактеристики укажуваат на оксидирачки услови за време на напредните фази на хидротермална промена. Истовременото присуство на серпентинизациски текстури и оксидациони халоси подразбира историја на повеќестепена промена која вклучува почетна хидратација проследена со прогресивна оксидација под физичко-хемиски услови кои се развиваат.

Структурно, најистакната карактеристика на примерокот е развојот на ленти текстури и зони поврзани со фрактура што одговараат на системи за смолкнување или фрактура. Во рамките на овие зони, влакнести минерали со сива до црна интерферентна боја растат нормално или косо на сидовите на фрактурата, што укажува на механизам за раст на заптивките на пукнатини. Овој модел на раст ги одразува повторените настани на фрактура проследено со таложување на минерали од циркулирачките хидротермални течности. Врз основа на фиброзната морфологија, оптичките својства и структурната ориентација, овие минерали се идентификувани како хризотил (Ct1). Присуството на хризотил

во вените за полнење на фрактура претставува најзначајниот петрографски доказ за развојот на азбестиформните минерални фази во оваа карпа.



Слика 25. Петрографски карактеристики на примерокот 2: оливин, ортопироксен и клинопироксен со псевдоморфна серпентинска замена, што укажува на серпентинизација на лерзолитски протолит (a-d).

Figure 25. Petrographic features of Sample 2: olivine, orthopyroxene, and clinopyroxene with pseudomorphic serpentine replacement, indicating serpentinization of a lherzolitic protolith (a-d).

Претставуваат ултрамафична карпа со лерзолитски состав која претрпе екстензивна и интензивна серпентинизација. Зачуваниот примарен минерален збир вклучува оливин, ортопироксен (Orx) и клинопироксен (Cpx), иако повеќето примарни текстури се делумно изменети со секундарни процеси на промена поврзани со хидратација и метаморфизам со низок степен.

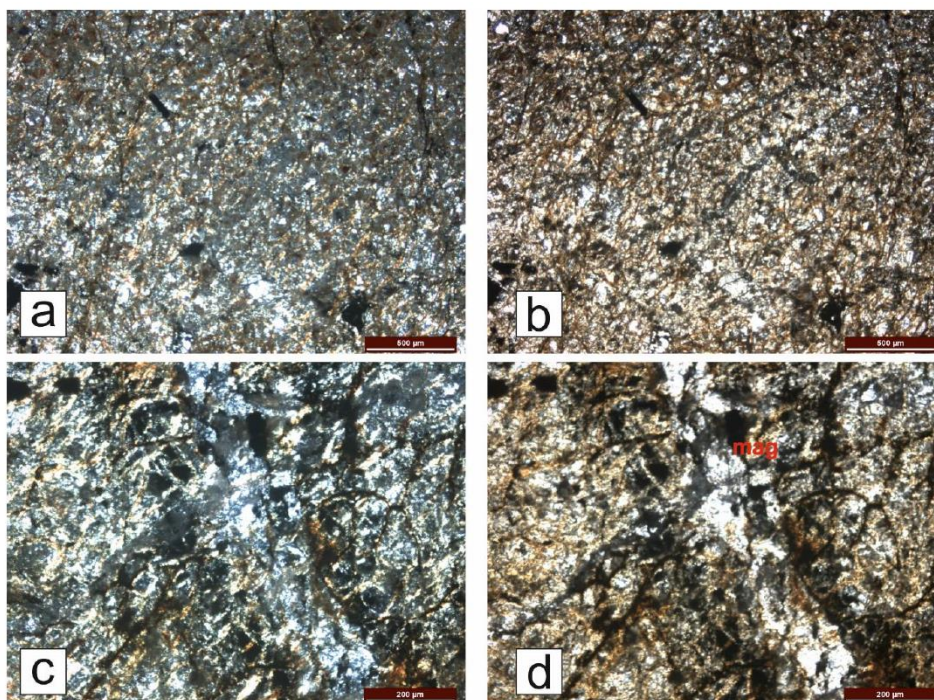
Најкарактеристична петрографска карактеристика на овој примерок е промената на кристалите на ортопироксен, кои прикажуваат типична псевдоморфна текстура. Зрната на ортопироксен, препознатливи по нивните ниски бои на интерференција и добро дефинираните рамнини на расцепување, постепено се заменуваат со серпентински минерали долж површините на расцепот и кристалните рабови, додека ги задржуваат своите оригинални контури и граници. Оваа псевдоморфна замена покажува дека

серпентинизацијата настанала преку промена со помош на течност без целосно уништување на оригиналната кристална морфологија на карпата домаќин. Спротивно на тоа, кристалите на клинопироксен се изложени боите со повисоки пречки и изгледаат релативно поотпорни на процесите на промена, останувајќи како реликтни фази во изменетата матрица и зачувувајќи делови од нивните примарни текстури.

Карпестата матрица е силно под влијание на серпентинизацијата и содржи бројни непроѕирни минерали поврзани со процесите на промена. Магнетитот се јавува како дебели, дисконтинуирани вени развиени по зоните на деформација и системите на фрактура, што укажува на мобилизација и концентрација на железо ослободено за време на разградувањето на феромагнезиските минерали. Присуството на магнетитни вени укажува на оксидирачки процеси поврзани со циркулацијата на течноста и структурната контрола во карпата. Реликтните зрна клинопироксен се зачувани како изолирани кристали затворени во серпентинизираната матрица, нагласувајќи ја хетерогената природа на промената низ примерокот.

Структурно, развојот на вените кои носат магнетит долж деформационите линии укажува на силно тектонско влијание врз протокот на течности и прераспределбата на минералите за време на промената. Комбинираното присуство на баститизиран ортопироксен, реликтен клинопироксен и плумби со фрактури богати со магнетит ја рефлектира историјата на повеќестепена промена која вклучува почетна серпентинизација проследена со оксидација и минерална реорганизација под физичко-хемиски услови кои се развиваат.

Севкупно, Примерокот 2 бележи прогресивна трансформација од лерзолитски ултрамафичен протолит во силно серпентинизирана карпа, во која баститизацијата со ортопироксен го сочинува доминантниот механизам за промена. Петрографските докази ја нагласуваат важноста на структурните патишта во контролирањето на циркулацијата на течноста, интензитетот на серпентинизација, и ремобилизација на железо, одразувајќи сложена хидротермална тектонска еволуција на проучуваниот ултрамафичен систем.



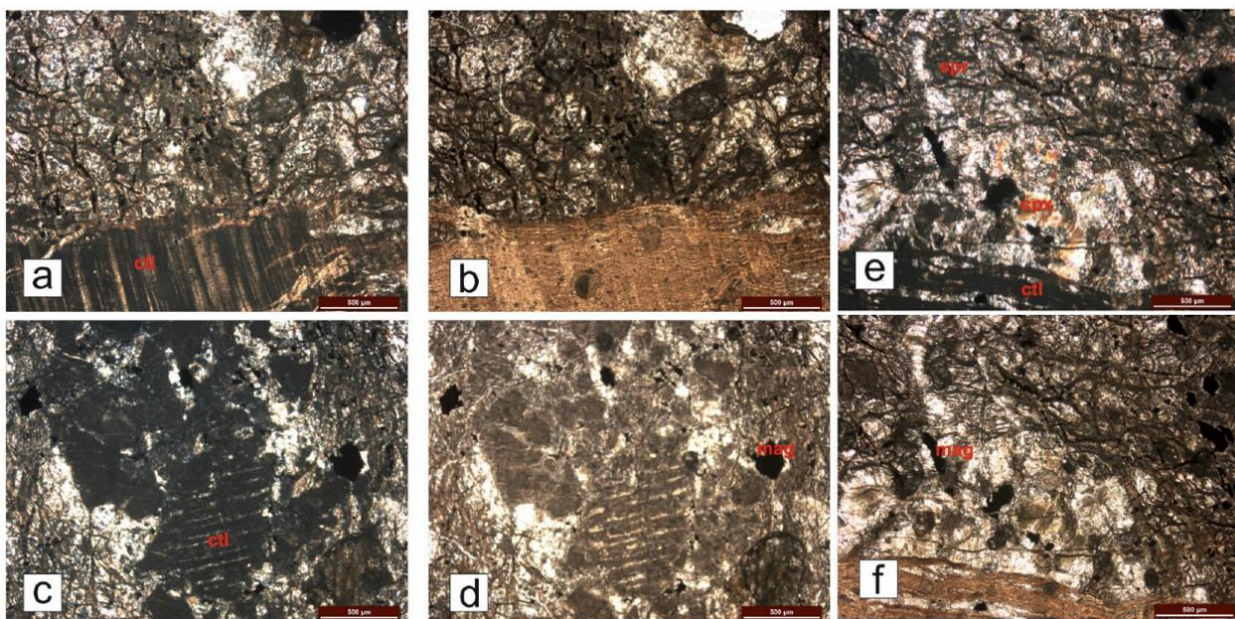
Слика 26. Петрографски карактеристики на Примерокот 3: целосно серпентинизирана ултрамафична карпа со продорна мрежна текстура, криптокристална серпентинска матрица и отсуство на примарни минерали, што укажува на промена во напредната фаза (a-d).
Figure 26. Petrographic features of Sample 3: fully serpentinized ultramafic rock with pervasive mesh texture, cryptocrystalline serpentine matrix, and absence of primary minerals, indicating advanced-stage alteration (a-d).

Овој примерок претставува напредна фаза на промена во проучуваната ултрамафична карпа. Карпата е целосно изменета и не се зачувани примарни магматски реликтни минерали како што се оливин или пироксени. Минералошкиот состав и текстурата главно се доминирани од минерали од серпентинската група, кои се заменети со оригиналниот ултрамафичен протолит преку интензивни процеси на серпентинизација.

Хомогено распределена мрежеста текстура го карактеризира овој тенок дел, што го одразува целосното исчезнување на границите на зрната и внатрешните структури на примарните кристали на оливин. Уникатниот развој на оваа текстура низ целата карпа сугерира дека протолитот можеби првично бил дунит по состав, првично составен главно од оливин. Целосното уништување на примарните текстури укажува на продолжена и широко распространета интеракција помеѓу ултрамафичните минерали и хидротермалните течности под метаморфни услови со низок степен.

Примерокот, исто така, покажува силни докази за напредна оксидација. Интензивната кафеава до црвеникава боја забележана под поларизирана светлина ги одразува широко распространетите оксидативни процеси што влијаат на целата матрица на карпата. Магнетитот, формиран за време на серпентинизацијата со ослободување и прераспределба на железото од феромагнезиските минерали, се јавува како ситно дисперзирани зрна и како мали линеарни агрегати расфрлани низ карпата домаќин. Оваа дистрибуција укажува дека мобилноста на железото била широко распространета и не е ограничена на структурно контролирани патишта, што укажува на екстензивно задржување на течности во доцните фази на алтерација. За разлика од Примерокот 1, каде што хрисотилните фрактурни заптивки покажуваат локализирана азбестиформна минерализација, Примерокот 3 не покажува јасна структурна или текстуална контрола изразена преку вени на минерализирани влакна. Наместо тоа, примерокот бележи целосна минералозна и текстуална хомогенизација, што претставува терминална фаза на серпентинизација во која примарните петролошки карактеристики целосно исчезнале.

Севкупно, Примерокот 3 претставува целосно серпентинизирана и високо оксидирана ултрамафична карпа што ја претставува последната фаза на хидротермална алтерација.



Слика 27. Петрографски тенок пресек на примерокот 4 кој покажува серпентинизација и деформација контролирана од вените (а-ф).

Figure 27. Petrographic thin-section of Sample 4 showing serpentinization and vein-controlled deformation (a-f).

Овој примерок претставува силно серпентинизирана ултрамафична карпа, карактеризирана со напредна фаза на структурна контрола врз формирањето на минерали. За разлика од Примерокот 3, каде што серпентинизацијата е широко распространета, Примерокот 4 покажува изразени карактеристики на деформација изразени со добро развиени вени кои доминираат во петрографската структура.

Во рамките на карпестата матрица, зачувани се типични текстури на серпентинизација, вклучувајќи решеткасти структури што укажуваат на замена на оливин со серпентински минерали. И покрај обемот на промена, реликтните кристали на клинопироксен (Cpx) се локално зачувани, што сугерира дека оригиналниот протолит бил ултрамафична перидотитна карпа. Магнетитот (Mag), формиран со ослободување на железо за време на серпентинизацијата, е концентриран и по границите на решетката и на границите на вените, одразувајќи редокс процеси поврзани со хидротермална промена.

Карактеристична петрографска карактеристика на Примерокот 4 е развојот на хрисотилски вени кои покажуваат попречен раст на влакната по должината на фрактурните и екстензионите фрактури. На сликите (ab), хрисотилските влакна растат нормално на сидовите на вените, формирајќи класична попречна текстура на влакната. Оваа геометрија на раст укажува дека фрактурите биле отворени под тектонски стрес и истовремено исполнети со хризотил нанесен од хидротермални течности. Ваквите структури се дијагностички за структурно контролирано формирање на азбест.

Деталното испитување на внатрешните венски структури (слики c-d) открива лентести или скалести распореди на хризотилни влакна. Оваа структура е карактеристична за епизоден раст на вените преку механизам за затворање на фрактура што вклучува повторени циклуси на фрактура и минерални таложења. Присуството на овие структури укажува дека формирањето на хризотил не било единствен настан, туку резултат на повеќекратни епизоди на интеракција на деформационата течност. Поврзаноста на серпентинизирани матрични структури со структурно контролираните хризотилни вени сугерира двостепена еволутивна историја:

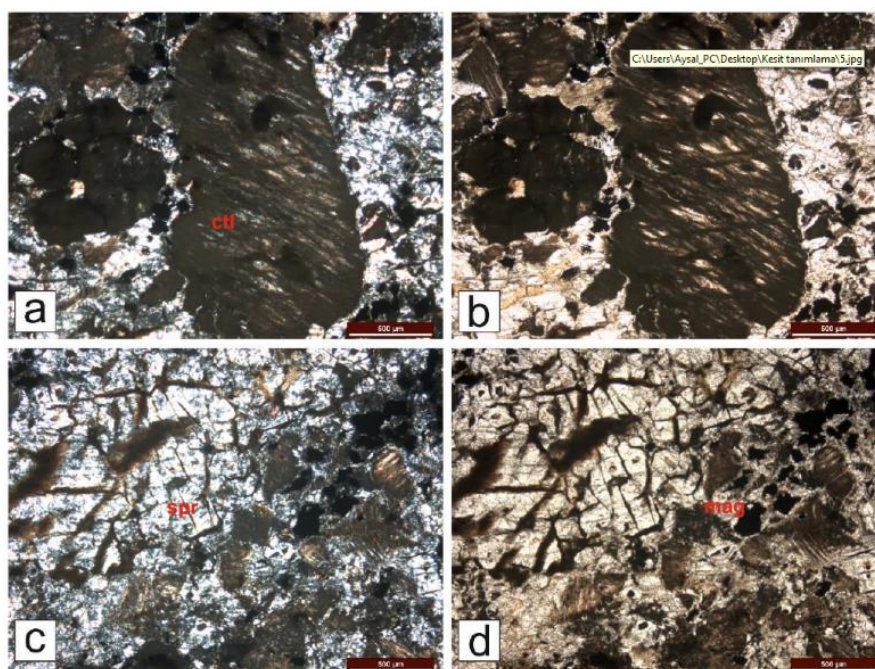
а) регионална серпентинизација на ултрамафичниот протолит што произведува мрежести текстури и магнетит; проследено со

б) тектонски индуцирано фрактурирање и хидротермална циркулација што доведува до локална минерализација на хризотил.

Концентрацијата на магнетит по границите на вените дополнително ја поддржува мобилизацијата на железото потпомогнато од течност за време на деформацијата.

Во споредба со Примерокот 1, каде што хрисотилите се јавуваат во зони на фрактури со ленти во рамките на сè уште делумно зачувана мрежеста матрица, Примерокот 4 покажува посилна структурна доминација, со добро развиени вени со вкрстени влакна што укажуваат на поинтензивно тектонско влијание. За разлика од Примерокот 3, кој покажува широко распространета серпентинизација и текстурална хомогенизација без јасна структурна контрола, Примерокот 4 зачувува јасни докази за минерализација предизвикана од деформација.

Севкупно, Примерокот 4 бележи структурно контролиран хидротермален систем на серпентинизација во кој формирањето на хрисотили е директно поврзано со режимите на тектонски притисок и епизодните процеси на запечатување на расед. Петрографските докази потврдуваат дека минерализацијата на азбестот во овој примерок е генетски поврзана со патеките на течности контролирани од фрактури, а не со интрузивна промена на карпата домаќин.



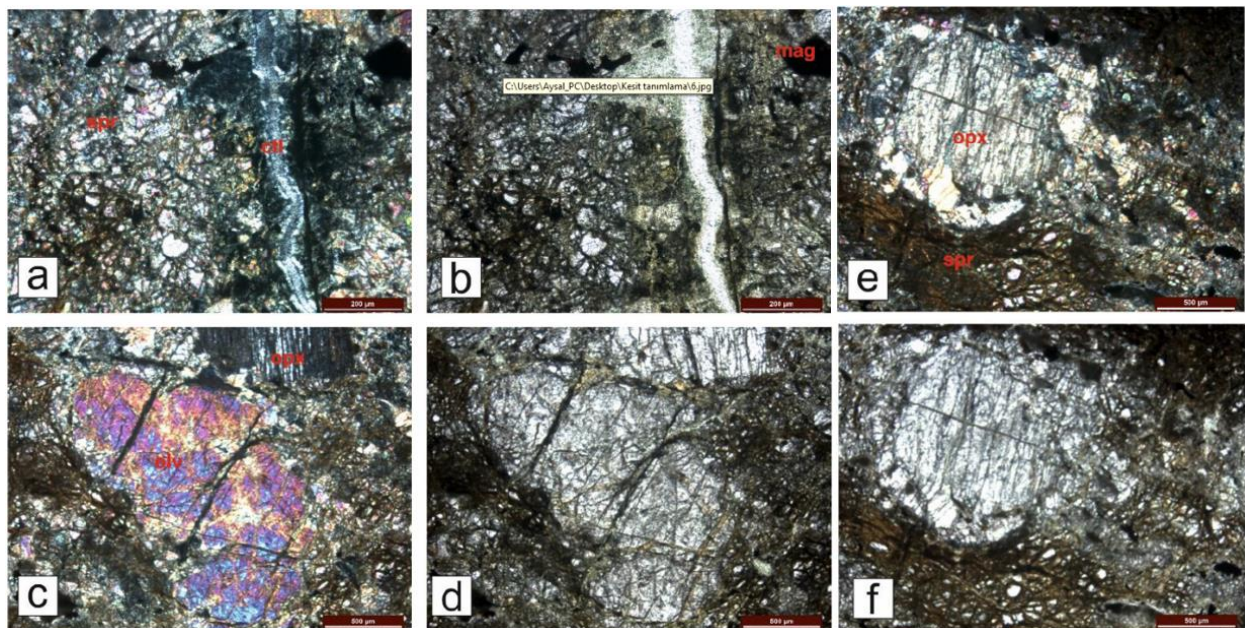
Слика 28. Микроструктурни карактеристики на примерокот 5: замена на бастит по ортопироксен, мрежеста текстура серпентинизирана матрица и домени со магнетит (a-d).
Figure 28. Microstructural characteristics of Sample 5: bastite replacement after orthopyroxene, mesh-textured serpentinized matrix, and magnetite-bearing domains (a-d).

Примерокот 5 е ултрамафична карпеста маса од семејството Харцбург која претрпела обемна серпентинизација, што резултирало со значителна минералозна и текстурна трансформација. Сепак, процесот на промена е многу напреден, реликтните текстури во карпата овозможиле реконструкција на нејзината оригинална ултрамафична структура.

Карактеристично за овој примерок се добро дефинираните текстури, забележани како псевдоморфна замена на големи ортопироксенски кристали со минерали од серпентинската група, главно лизардит. Овие псевдоморфи ја зачувале надворешната морфологија и трагите од ортопироксенските кристали, докажувајќи дека замената се случила преку реакции на течна маса, додека се одржува кристалографска контрола.

Матрицата ни покажува дека се работи за типична мрежна текстура што произлегува од оливинска серпентинизација. Присуството на магнетитни вени и расфрлани зрна укажува на значителна мобилизација на железо. Ова ги одразува новите услови на интензивна хемиска промена во која феромагнетиските минерали биле прогресивно дестабилизирали и заменети со серпентински фази.

Во споредба со претходно анализирани примероци, Примерокот 5 претставува средна до напредна фаза на серпентинизација во која интеракцијата помеѓу текстурите и мрежата се формира, зачувувајќи ги оригиналните Харцбурговски минерални интеракции, додека се забележува обемна секундарна промена каде, за разлика од Примерокот 4, кој е доминиран од структурни контроли и хрисотилски вени што ги исполнуваат фрактури, Примерокот 5 се карактеризира главно со текстури за замена во карстната матрица, наместо со дискретни вени на тектонска контрола. Примерокот 5 сведочи за прогресивен процес на хидротермална трансформација на харцбургитски протолит, кој се карактеризира со кристалографски контролирана замена на ортопироксен, широко распространета серпентинизација на оливин и значително формирање на магнетит. Петрографските карактеристики во овој примерок укажуваат на интензивна интеракција помеѓу карпестите флуиди во услови на напредна хемиска промена, што претставува преодна фаза помеѓу делумно зачувани ултрамафични текстури и целосно серпентинизирани литологии во рамките на проучуваниот систем.



Слика 29. Микроструктурни карактеристики на примерокот 6 кои ги истакнуваат делумно зачуваните примарни минерали, серпентинизираната матрица и лизардитни вени контролирани со фрактура (a-f).

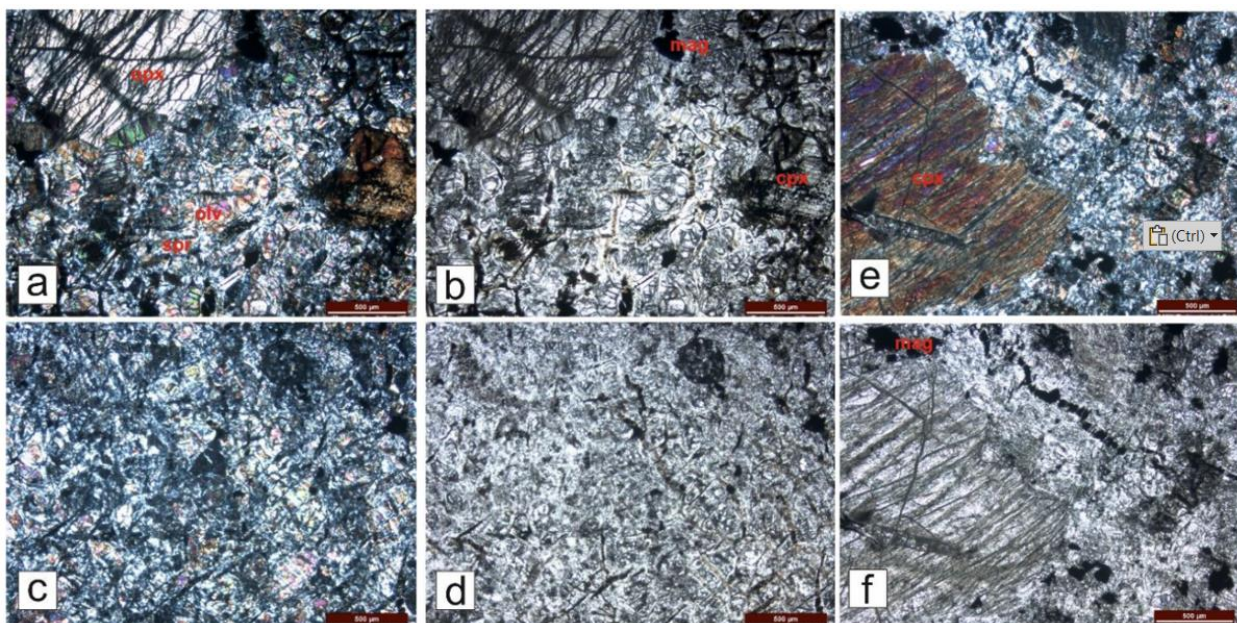
Figure 29. Microstructural characteristics of Sample 6 highlighting partially preserved primary minerals, serpentinized matrix, and fracture-controlled lizardite veins (a-f).

Станува збор за харцбургитна карпа која има зачувано висок степен на зачувување на примарните минерали од мантија. Присуството на вени поврзани

со серпентинизација во примерокот ги зачувало реликтните текстури, што укажува дека процесите на алтерација биле помалку распространети во споредба со претходно проучуваните примероци. Оливинските порфирокласти се претставени со високи и добро зачувани интрузии кои покажуваат јасна отпорност на алтерација. Нивното постоење во добра состојба каква што е, укажува на нецелосна пенетрација на течности и локални ограничувања кои биле во односот течност-карпа. Слично на тоа, ортопироксенските кристали, карактеризирани со боја и добро дефинирани интрузии на траги од расцепување, остануваат само делумно изменети, што укажува дека алтерацијата не се развила целосно. Реликтните минерали даваат силен петрографски доказ дека оригиналниот протолит бил харцбургит составен главно од оливин и ортопироксен.

Од структурна перспектива, вените исполнети со лизардит ја сечат карпестата подлога, што укажува на локализирана циркулација на хидротермални течности долж фрактури. Присуството на лизардитски вени кои се појавуваат во форма на крстови укажува на активност во форма на патишта за пенетрација на течности и минерални таложења за време на подоцнежните фази на алтерација. Појавата на магнетит придружена со серпентинизација потврдува прераспределба на железото за време на реакциите на хидратација и оксидација.

Во споредба со примероците што ја покажуваат напредната фаза на серпентинизација, како што е прикажано во примероците 3 и 4, Примерокот 6 претставува помалку изменета еволутивна фаза каде што примарната минералологија се чини дека е зачувана во значителна мера. Хетерогеноста на движењата на течната маса подразбира или помалку интензивна промена за време на хидротермалниот процес или пократко времетраење на интеракцијата помеѓу течната маса и карпестата маса во споредба со примероците што се целосно трансформирани. Генерално, Примерокот 6 претставува рана или средна фаза на серпентинизација во Харцбурговски ултрамафичен протолит, каде што примарните текстури на мантија остануваат многу евидентни и покрај развојот на серпентински минерали и локализираната минерализација на лизардитот по должината на фрактурите.



Слика 30. Текстурална еволуција на Примерокот 7 што укажува на серпентинизација во средна фаза, со промена на оливин и релативна стабилност на фазите на пироксен во порфирокластична рамка (а-ф).

Figure 30. Textural evolution of Sample 7 indicating intermediate-stage serpentinization, with alteration of olivine and relative stability of pyroxene phases within a porphyroclastic framework (a-f).

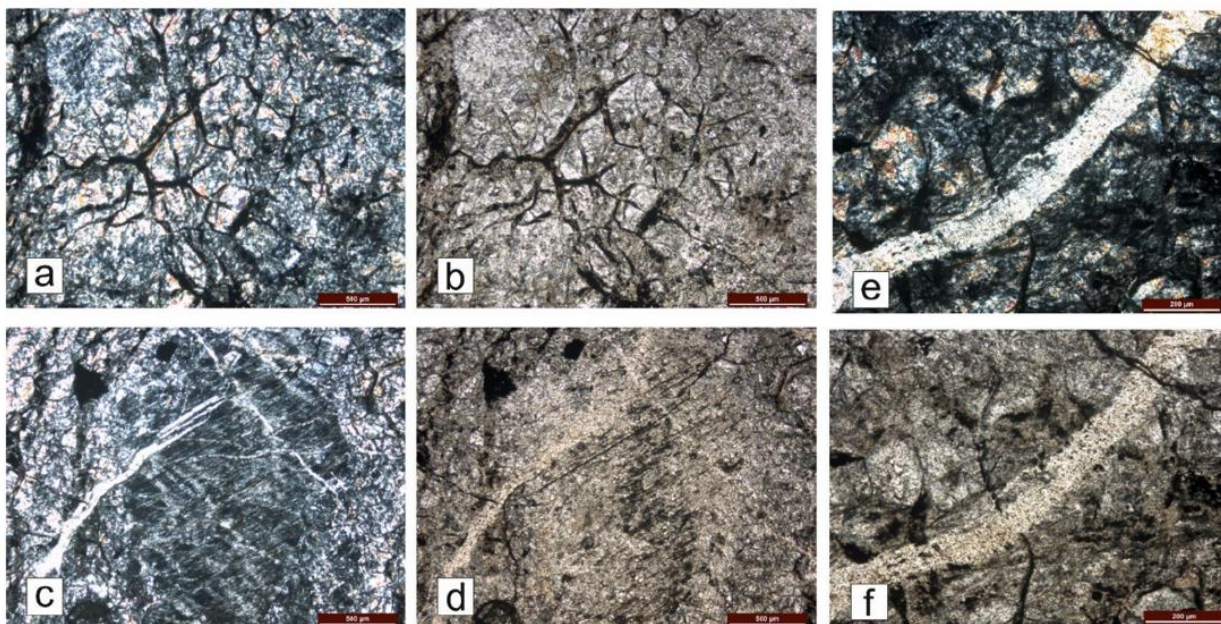
Овој примерок покажува ултрамафичен протолит со лерзолитски состав, каде што се забележува коегзистенција на примарни мантилни минерали како што се оливин, ортопироксен и клинопироксен. Сепак, процесот на серпентинизација се забележува низ целата карпеста маса, зачувувањето на пироксенските фази и реликвии докажува дека процесите на алтерација биле нецелосни и хетерогени.

Целокупната текстура на примерокот е порфирокластична, карактеризирана со големи реликтни кристали кои се присутни во матрица со интензивен интензитет на серпентинизација. Оваа текстура претставува процес на деформација кој создал контрасти во големината на минералите помеѓу отпорните порфирокласти и подлогата што изгледа ситнозрнеста. Самата матрица покажува добро развиена мрежна текстура добиена од серпентинизацијата на оливин, покажувајќи ги реакциите на реакциите на хидратација кои постепено ги замениле примарните оливински минерали со минерали од серпентинската група.

Кристалите на клинопироксен се особено истакнати во овој примерок и се јавуваат како големи порфирокласти кои покажуваат бои со висока интерференција и добро дефинирани траги на расцепување. Овие кристали покажуваат значителна отпорност на промена, зачувувајќи ги внатрешните

кристалографски карактеристики и покрај обемната деформација и серпентинизација на матрицата. Кристалите на ортопироксен, идентификувани по нивните бои со помала интерференција, покажуваат рани фази на серпентинизација по должината на деформациските рамнини на процесот на расцепување, што укажува дека промената преференцијално започнала по областите кои биле структурно послаби во кристалната решетка.

Магнетитот е присутен како зрна дисперзирани во серпентинизираната матрица во линеарен модел кои се порамнети со структурата, што укажува на мобилизација на железо за време на процесот на серпентинизација и поврзаните процеси на оксидација. Присуството на вени на магнетит укажува на локализирана циркулација на течност по должината на фрактурите, иако за разлика од примероците доминирани од структури што носат хризотил, Примерокот 7 не претставува обемни системи на вени исполнети со влакна, што укажува дека структурната контрола врз минерализацијата на азбест била изразена и добро контролирана. Во споредба со другите проучувани примероци, Примерокот 7 претставува средна фаза од процесот на серпентинизација во која примарните текстури на лерзолит останале делумно зачувани, каде што коегзистенцијата на клинопироксенски порфиорокласти отпорни на алтерација и силно серпентинизирана матрица одразува хетерогена интеракција помеѓу течната маса и карпестата маса што е контролирана од минералната стабилност и историјата на деформација. Доказите од овој примерок ни даваат значајни докази за прогресивна серпентинизација, доминирана од алтерација на оливин, додека пироксенските минерали останале релативно стабилни за време на раните до средните фази на алтерација.



Слика 31. Микроструктурни карактеристики на примерокот 8 што прикажува добро развиена мрежа и бастит текстури со граници збогатени со магнетит и формирање на вени во доцна фаза (а-ф).

Figure 31. Microstructural characteristics of Sample 8 showing well-developed mesh and bastite textures with magnetite-enriched boundaries and late-stage vein formation (a-f).

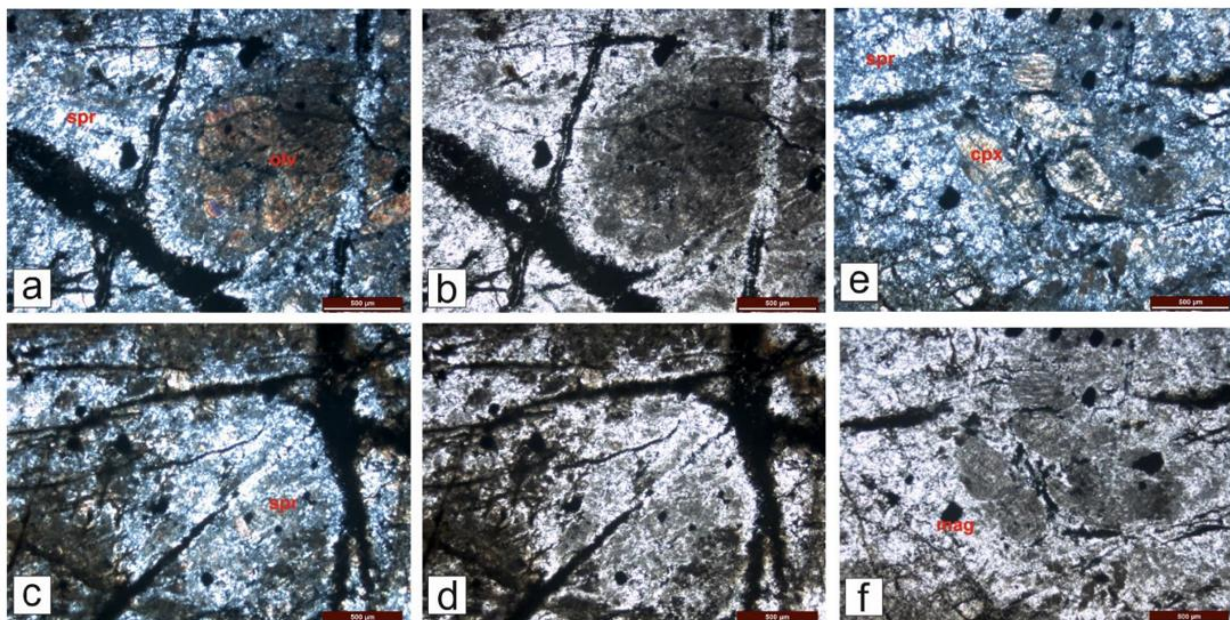
Станува збор за ултрамафична карпа од харцбургитно потекло, но поминала низ напредна фаза на серпентинизација, прилагодувајќи се на структурна модификација. Повеќето од примарните минерали со мантилно потекло се промениле значително, што докажува интензивна интеракција помеѓу карпестите флуиди и хидротермалните процеси. Доминантна петрографска карактеристика низ целиот дел е мрежната структура развиена како резултат на целосна серпентинизација на оливинот. Оваа структура се карактеризира со полигонални мрежи чии граници се дефинирани со секундарни магнетитни вени формирани со оксидација на железо ослободено за време на реакциите на процесот на серпентинизација. Количината и континуитетот на магнетит по должината на контактот и мрежата укажуваат на хемиска промена и дистрибуција на железото во карпата.

Покрај оваа структура, примерокот претставува и истакната баститна структура формирана со псевдоморфна замена на ортопироксенските кристали со влакнести минерали што содржат серпентин. Овие структурни карактеристики ги зачувуваат оригиналните кристални граници и траги оставени од фрагментацијата на ортопироксенот, потврдувајќи дека процесот на замена се развил под кристалографска контрола. Интеракцијата помеѓу решетката и

баститните текстури одразува истовремена промена во количината на материјал богат со оливин и пироксен, што е во согласност со прогресивниот процес на серпентинизација на протолитот од харцбургит.

Клучна карактеристика во структурата на Примерокот 8 е присуството на дебели вени кои ја прекинуваат текстурата на карпестата маса. Овие вени кои ги исполниле пукнатините укажуваат дека подоцнежната хидротермална тектонска фаза има надредени карпести слоеви создадени од претходни процеси. Нивните меѓусебни врски укажуваат дека деформацијата и протокот на флуиди продолжиле по развојот на примарните текстури на серпентинизација, обезбедувајќи докази за тектонска активност во различни временски интервали и постдеформациски минерални таложења.

Во споредба со другите примероци, примерокот 8 претставува напредна фаза на промена во која примарната минералологија целосно исчезнала, иако текстурните докази сè уште ја зачувуваат еволутивната секвенца на процесот на серпентинизација. Генерално, Примерокот 8 открива многу агресивен процес на серпентинизација во кој оливинот, како и ортопироксените, се екстензивно трансформирани, додека последователните процеси на полнење на вени и фрактури оставиле многу траги од претходните текстури на промена.



Слика 32. Репрезентативни текстури од Примерокот 9 кои покажуваат напредна серпентинизација со мрежи на фрактури исполнети со магнетит и селективно зачувување на клинопироксен (а-ф).

Figure 32. Representative textures of Sample 9 showing advanced serperntinization with magnetite-filled fracture networks and selective preservation of clinopyroxene (a-f).

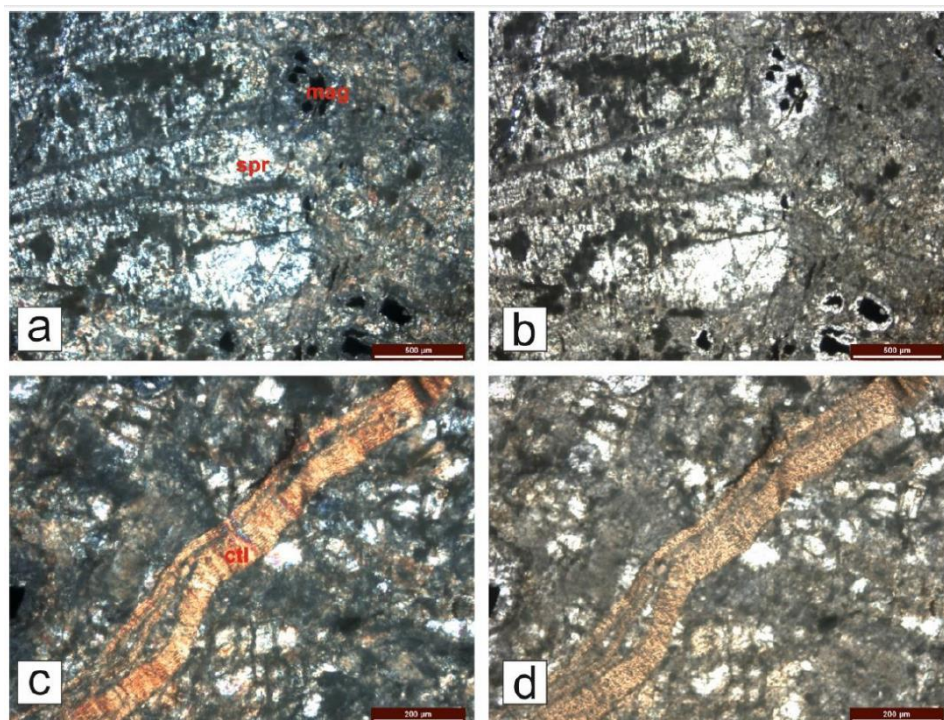
Станува збор за ултрамафична карпа која претрпела многу интензивна серпентинизација, од која се формирани и напредувале темни минерали. Присуството на реликтни кристали на оливин и клинопироксен укажува дека оригиналниот протолит од кој потекнуваат овие минерали е лерзолитски, иако повеќето од примарните минералошки карактеристики претрпеле значителни промени од секундарните процеси на алтерација.

Доминантните текстурни карактеристики се структурите на добро развиена мрежа формирана со серпентинизација на оливин. За разлика од претходно анализираните примероци, присуството на дебело-жилен магнетит во фрактурите резултирало со процес на рефлексација и силна мобилизација на железо (Fe) за време на серпентинизацијата. Концентрацијата на магнетит по должината на овие фрактури укажува на напредни реакции поврзани со обемна интеракција на течната карпа која претрпела услови на интензивна алтерација.

Поголемиот дел од карпата е серпентинизиран до висок степен каде што примарните граници на зрната се неразделни. Во рамките на оваа изменета матрица, се гледаат мали реликтни кристали на клинопироксен, кои се зачувани како изолирани остатоци, покажувајќи голема отпорност на алтерација во споредба со оливинот што се појавил. Овие реликвии се појавуваат како локализирани точки опкружени со темни минерали, потврдувајќи ја и истакнувајќи ја прогресивната замена што се случила за време на примарните фази на серпентинизација.

Од структурна перспектива, дебелите фрактури што се исполнети со магнетит укажуваат на деформација каде што циркулацијата на течности играла главна улога во контролирањето и прераспределбата на минералите. Примерокот 9 главно се одликува со системи на фрактури богати со магнетит кои дејствуваат како изолатори на форстерит, потврдувајќи дека оксидацијата и присуството на железо биле доминантни процеси во доцна фаза.

Во споредба со претходно анализираните примероци, Примерокот 9 претставува напредна фаза и силен развој на темни минерали и речиси целосна серпентинизација на матрицата, сè уште зачувувајќи мали остатоци од



примарната минералогичка на мантија.

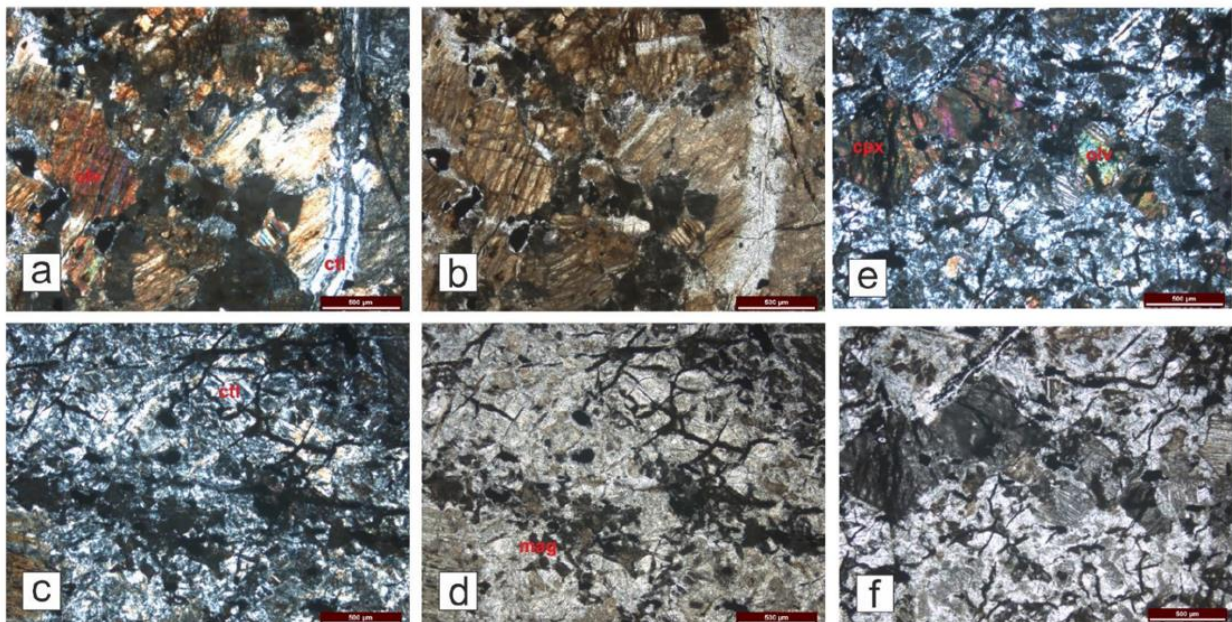
Слика 33. Микроструктурни карактеристики на Примерокот 10 што прикажува фолирана серпентинска матрица, текстури на панделки и магнетитни ленти порамнети со деформација (а- г).

Figure 33. Microstructural characteristics of Sample 10 showing foliated serpentine matrix, ribbon textures, and deformation-aligned magnetite bands (a-d).

Станува збор за високо деформиран примерок каде што тектонските процеси одиграле многу доминантна улога и за време и по процесот на серпентинизација.

Во рамките на матрицата, серпентинските минерали се појавуваат со издолжена морфологија и се порамнети паралелно со фолијата, која е добро дефинирана, формирајќи карактеристична Fino лентеста текстура. Овој феномен потврдува деформација под динамички услови и сугерира дека серпентинизацијата се случила истовремено со тектонско движење или за време на процесот на динамичен метаморфизам по должината на структурната зона. Темните минерали, како што е магнетит, се концентрирани во тенки појаси каде што во некои сегменти се прекинати паралелно со фолиациските рамнини, што укажува на прераспределба синхронизирана со тектонските процеси што се случиле во исто време.

Секундарните вени што сечат низ карпестата матрица претставуваат уште една многу важна карактеристика во Пример 10. Овие вени се исполнети со фиброзен лизардит и покажуваат брановидна геометрија, што укажува на рехабилитација по должината на фрактурите за време на прогресивна деформација. Минерализацијата на лизардит и неговото вкрстено поврзување со фолираната матрица демонстрираат процес на инфилтрација од страна на масата на течности на локации по должината на тектонските линии и фрактури. Силен процес на оксидација и боене на железо поврзан со овие вени укажува на многу доцна фаза на циркулација на течности под овие оксидирачки услови, кои се надредени на претходните текстури на серпентинизација. Во споредба со другите примероци, Примерокот 10 претставува фаза која е контролирана од структурата и ултрамафичната промена во која процесите на деформација го насочиле движењето на минералите, патиштата на течностите и секундарниот раст на минералите. Додека примероците како 3 или 9 бележат широко распространета серпентинизација и оксидација под релативно статични услови, Примерокот 10 одразува геолошки многу динамична средина во која метаморфното раседување и деформацијата, како и хидротермалната активност, дејствувале истовремено.



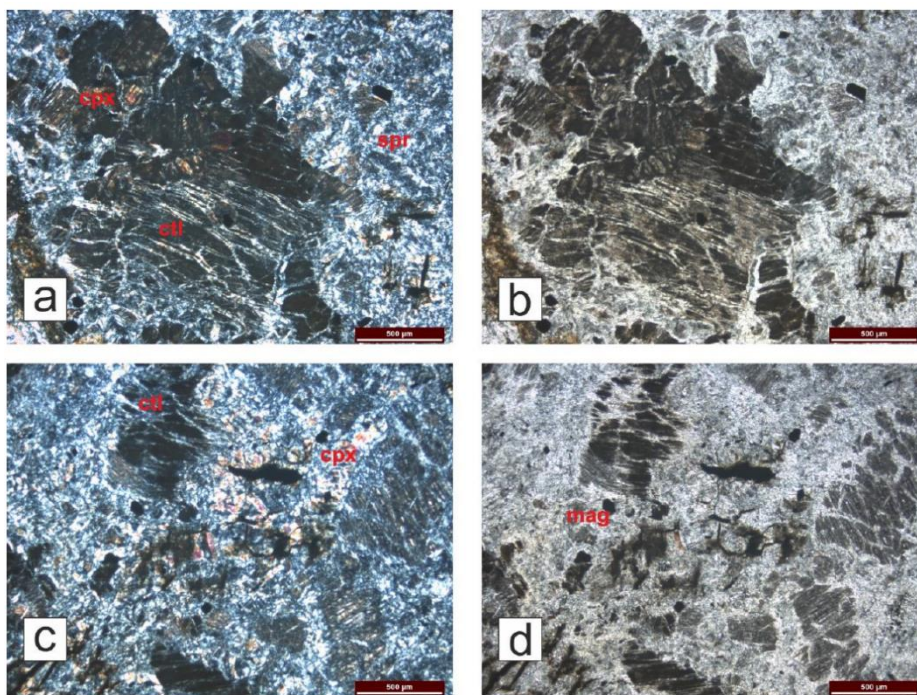
Слика 34. Текстурална еволуција на Примерокот 11 што укажува на прогресивна серпентинизација со мобилизација на железо, сегрегација на магнетит и формирање на хидротермална вена долж тектонските патишта (а-ф).

Figure 34. Textural evolution of Sample 11 indicating progressive serpentinization with iron mobilization, magnetite segregation, and hydrothermal vein formation along tectonic pathways (a-f).

Овој примерок дава важни информации и за минералошкиот состав и за структурната еволуција на ултрамафичната карпа. Интеракцијата помеѓу реликтните кристали на оливин и клинопироксен го потврдува протолитот на лерзолитот, покажувајќи дека и покрај процесот на серпентинизација што се случил, некои од минералите што дошле од мантија ги задржале своите својства.

Карактеристика забележана во овој примерок е присуството на секундарни венски структури што ја сечат карпата домаќин. Овие вени, кои се исполнети со фиброзен хризотил и лизардит, се јавуваат во близина на оливинот по фрактурите, докажувајќи дека процесот на серпентинизација каде што се формирале азбестните минерали не бил ограничен од статички промени во матрицата, туку главно бил под влијание на структурите и карпестата маса. Формата на полнење на пукнатините со хризотил и лизардит укажува на процесот на циркулација на хидротермални течности по тектонските пукнатини, докажувајќи дека главниот фактор што го контролира движењето на минералите бил факторот на деформација!

Карпестата матрица се карактеризира со добро развиена мрежна структура формирана со серпентинизација на оливин, каде што контактот на минералните мрежи е нагласен со густо раздвојување со магнетит, што ја одразува мобилизацијата на железото за време на процесот на хидратација и последователните процеси на оксидација. Присуството на магнетитни мрежи укажува на услови на хемиска промена како интензивен процес каде што се случила значителна прераспределба на железото за време на серпентинизацијата. Реликви од оливин и клинопироксен се зачувани во голема мера, демонстрирајќи отпорност на промена. Клинопироксенот генерално покажал голема стабилност останувајќи како изолиран минерал, додека оливинот е екстензивно трансформиран во серпентински минерали. Примерокот 11 дава докази за процес што се случил од средна до напредна фаза на промена во која серпентинизацијата комуницирала и се развивала со структурно контролирани хризотилски вени. Примерокот 11 бележи комплексна интеракција помеѓу серпентинизацијата, деформацијата и хидротермалните процеси. Петрографските анализи сугерираат дека структурните линеаменти и фрактури играле клучна улога во контролирањето и формирањето на хризотил и лизардит.



Слика 35. Петрографски карактеристики на примерокот 12: баститизација со ортопироксен и серпентински минерали (лизардит, хризотил) кои формираат псевдоморфни текстури (а-д).
Figure 35. Petrographic features of Sample 12: orthopyroxene bastitization and serpentine minerals (lizardite, chrysotile) forming pseudomorphic textures (a-d).

Примерокот број 12 дава јасен доказ за минералозна промена од ултрамафична карпа од лерзолитно потекло. Поврзаноста на структурите добиени од ортопироксен и клинопироксен сугерира примарна минерална асоцијација од мантија, додека контрастните соодноси помеѓу овие изменети минерали сугерираат прогресивна и селективна природа на процесот на серпентинизација.

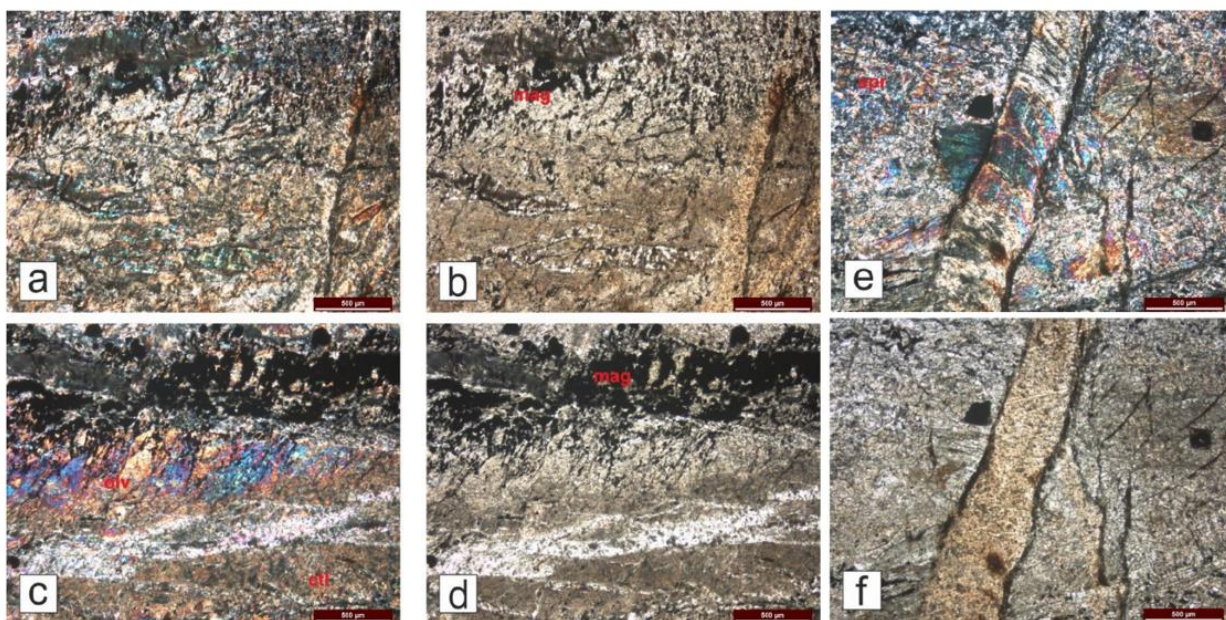
Главната карактеристика во петрографијата на овој примерок е целосната трансформација на ортопироксенот во баститна структура. Влакнестите серпентински минерали, вклучувајќи ги лизардитот и хризотилот, се развиле преференцијално за време на расцепувањето, формирајќи псевдоморфни структури кои ја зачувуваат оригиналната кристална морфологија и внатрешната ориентација на минералот. Ова сугерира кристалографски контролирана замена, во која хидратацијата и промената напредувале по структурните линии во рамките на кристалната решетка на ортопироксенот.

Додека кристалите на клинопироксен презентирани во оваа структура покажуваат значителен отпор на промена. Овие кристали се зачувани како обоени порфирокласти, додека го зачувуваат поголемиот дел од внатрешната

структура, што укажува на стабилноста и отпорноста на минералите за време на серпентинизацијата.

Низ целата матрица, магнетитот се појавува како темен минерал концентриран по должината на контактните линии со интензивно изменети баститски зони и зони на фрактури. Неговата дистрибуција укажува на мобилизација на железо за време на процесот на серпентинизација и последователните процеси на оксидација. Особено е важно да се напомене дека збогатувањето на магнетитот останува многу ограничено и не продира во свежите кристали на клинопироксен, што дополнително ја нагласува специфичната чувствителност на минералот на промена и инфилтрација на течности.

Од ова беше забележано дека Примерокот 12 претставува фаза на промена која се карактеризира со силна минералошка селективност, а не со целосна хомогенизација. Додека минералот ортопироксен е целосно трансформиран во бастит, отпорниот минерал клинопироксен останува во голема мера недопрен, што укажува на нецелосна серпентинизација. Затоа, овој примерок бележи средна еволутивна фаза доминирана од текстури за замена, но примарни минералошки контрасти кои сè уште се зачувани.



Слика 36. Петрографски тенок пресек на примерокот 13 кој покажува интензивна деформација и фолијација во услови на високо напрегање (а-ф).

Figure 36. Petrographic thin-section of Sample 13 showing intense deformation and foliation under high-strain conditions (a-f).

Во овој случај имаме карактеристичен пример за интензивен динамичен метаморфизам и тектонски контакт во рамките на проучувана ултрамафична

карпеста маса. Како што може да се види, примарните магматски текстури целосно исчезнале како резултат на екстремно интензивната деформација, додека структурата на карпата е доминирана од силна фолијација структурно контролирана од висок притисок.

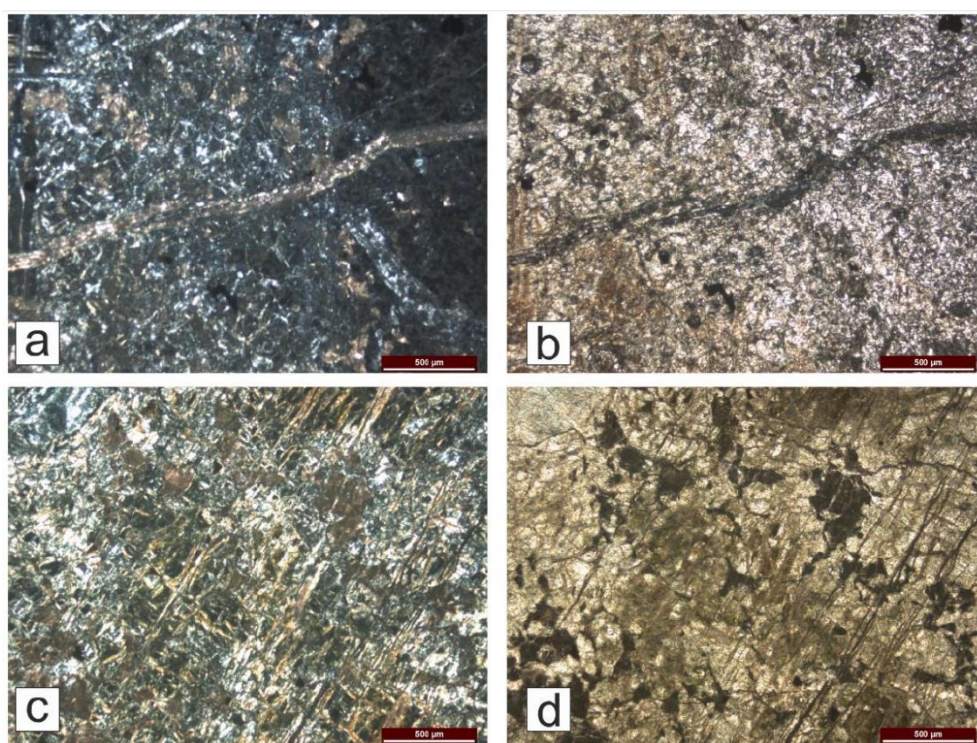
Карактеристични петрографски карактеристики се развиле во таканаречената сегментирана структура на оливин, каде што кристалите на оливин се формирале под екстремни услови на тектонски притисок. Овие сегменти од оливинските ленти покажуваат значителна дуктилна деформација бидејќи карпата претрпела промена каде што процесот на деформација се случил истовремено во активната зона на рифтинг. Дебелите тела на магнетит кои се ориентирани во форма паралелна со структурите претставуваат интензивна мобилизација и концентрација на железо за време на контактот, што можеби се случило за време на процесот на ерозија и оксидација потпомогнато од течност во зоната на деформација.

Целата маса на серпентински минерали и темни фази покажува силна ориентација паралелна со оската на деформација, создавајќи шистозна ткаенина од дуклит која преминува во милонитна. Овој процес ни покажува дека серпентинизацијата се случила под нестатички услови, но била процес тесно поврзан со динамички метаморфни процеси. Истата ориентација на серпентинот и магнетитот го потврдува синкинематскиот раст на минералите за време на деформацијата, тврдејќи за структурна контрола врз еволуцијата и минералошките процеси.

Присуството на секундарни вени што се појавуваат во матрицата се толкува и како посткинематички карактеристики, каде што овие вени се формирале како подоцнежни фази по деформацијата и континуираната циркулација на течности. Нивните вкрстено-поврзувачки односи даваат јасен доказ за повеќекратни деформации на протокот на течности за време на еволуцијата на ултрамафичниот систем.

Врз основа на други анализи, Примерокот 13 ја претставува фазата доминирана од деформации, во која тектонските процеси ги преклопувале и во голема мера ги бришеле примарните текстури, додека претходните примероци ги зачувале ретикуларните текстури поврзани со статичка или полустатичка серпентинизација, Примерокот 13 ни покажува процес на серпентинизација предизвикан од деформација под динамички услови, со силно минерално

проширување и развој на милонитно ткиво. Генерално, Примерокот 13 документира напредна тектоно-метаморфна фаза во еволуцијата на ултрамафичните карпи, карактеризирана со интензивно смолкнување, формирање на оливински ленти, ориентирани магнетитни ленти и посткинематички вени.



Слика 37. Петрографски тенок пресек од Примерокот 14 кој покажува напредна серпентинизација, баститска текстура и псевдоморфни домени богати со магнетит (а-д).
Figure 37. Petrographic thin-section of Sample 14 showing advanced serpentinization, bastite texture, and magnetite-rich pseudomorphic domains (a-d).

Овој примерок претставува напредна фаза на промена што ја напаѓа ултрамафичната карпеста маса во значителна мера. Примарните текстури се целосно исчезнати и карпата е доминирана главно од секундарни минерали формирани за време на интензивниот процес на серпентинизација и хемиските промени поврзани со него.

Најкарактеристичните карактеристики на овој примерок се развојот на високо изменета текстура на бастит што резултираше со целосна замена на ортопироксенските кристали. Влакнестите серпентински минерали, како што е хризотилот, ги зачуваа оригиналните псевдоморфни контури на претходникот пироксен. Сепак, врз основа на претходните анализи што ги забележавме со

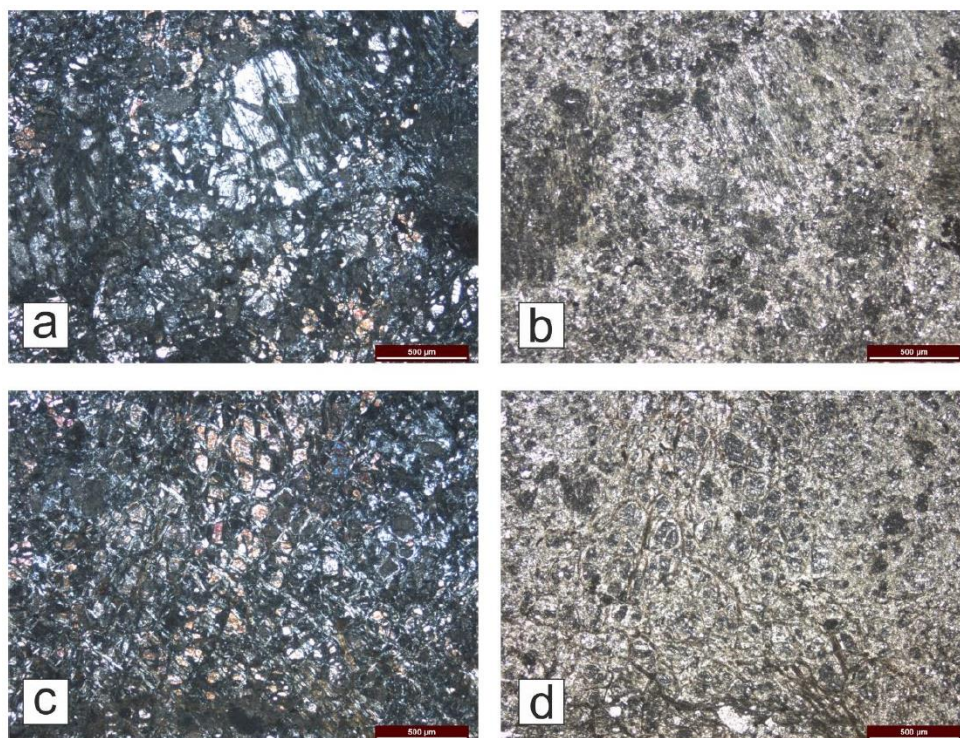
мала промена во Примерокот 14, тој содржи изобилство темно-дисеминирани минерали, кои создадоа многу разновиден изглед.

Неправилните акумулации на магнетит во баститните формации укажуваат на интензивна мобилизација и прераспределба на железото, што укажува на процес што продирал длабоко во внатрешноста на кристалот за време на напредните фази на серпентинизација.

Матрицата се состои од ситнозрнеста, високо серпентинизирана карпеста маса во која кристалните контури се целосно неразличливи или дури исчезнуваат. Овој висок степен на хомогенизација одразува обемна интеракција помеѓу флуидот и карпата што се случила за време на хидротермални услови.

Фините венски структури што се појавуваат во матрицата укажуваат на секундарно присуство на фрактури формирани по главната фаза на промена.

Севкупно, Примерокот 14 илустрира примерок многу напреднат во процесот на серпентинизација во кој ортопироксенот е целосно заменет со серпентински минерали и магнетит, вклучувајќи хризотил и лизардит, што резултира со високо изменета и текстурално комплексна ултрамафична карпа.



Слика 38. Петрографски карактеристики на примерокот 15: добро развиена мрежна текстура по оливин, баститни псевдоморфи по ортопироксен и серпентински минерали (хризотил, лизардит) што укажува на статичка серпентинизација во стабилни услови (а-д).

Figure 38. Petrographic features of Sample 15: well-developed mesh texture after olivine, bastite pseudomorphs after orthopyroxene, and serpentine minerals (chrysotile, lizardite) indicating static serpentinization under stable conditions (a-d).

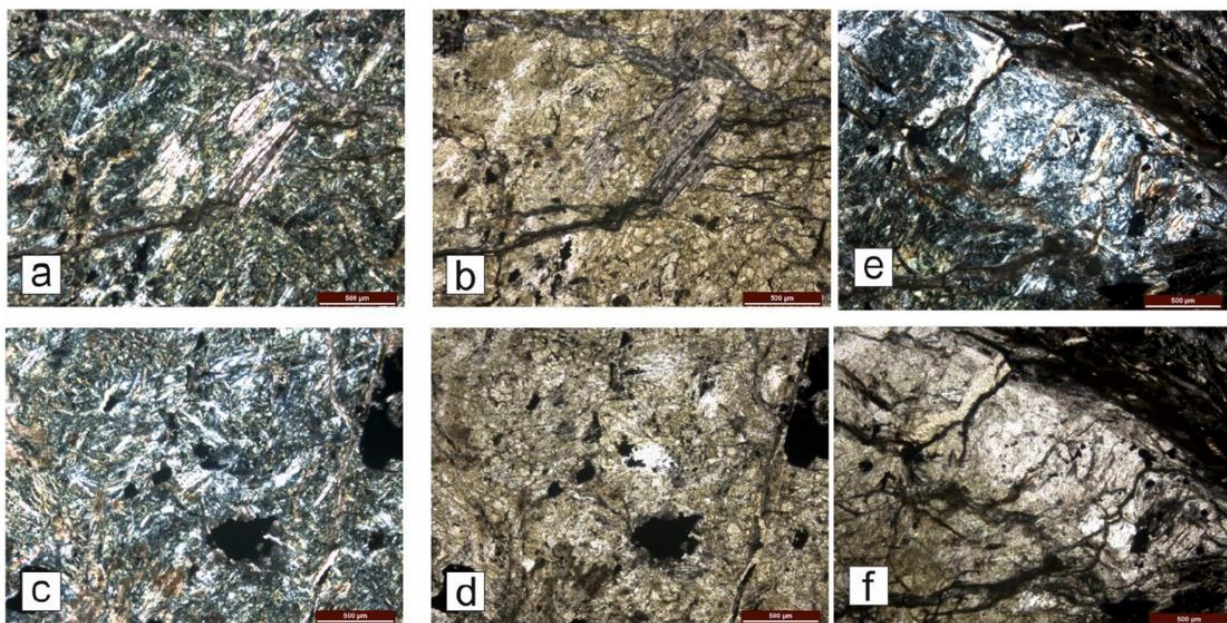
Тоа е многу карактеристичен пример каде што се развиле текстури на серпентинизација во ултрамафични карпи кои потекнуваат од харцбургитски протолит. Поврзаноста помеѓу производите на алтерација добиени од оливин и ортопироксен покажа дека примарното минерално склопување во мантија претрпело обемни промени, додека ги зачувало клучните текстурни карактеристики.

Највпечатливата карактеристика на овој примерок е присуството на многу правилна геометриски решеткаста текстура формирана со серпентинизација на оливин. Линиите на решетката се јасно дефинирани од контурите и се богати со магнетит ослободен за време на реакциите на хидратација и оксидација кои се поврзани со оваа алтерација.

Епицентрите на минерализација се целосно исполнети со серпентински минерали, главно хризотил и лизардит, со што се прави целосна замена на оливинот и се зачувуваат псевдоморфните структурни обрасци. Високиот степен на геометриска регуларност сведочи за релативно униформна инфилтрација на течности и условите под кои се случила хемиска алтерација за време на серпентинизацијата.

Примерокот 15 претставува типичен пример за статичен процес на серпентинизација, каде што ефектите од примарниот процес на деформација се ограничени, а текстурите на алтерација остануваат јасно препознатливи. За разлика од високо деформираните примероци кои се појавиле со ламинарни или фиброзни текстури, текстурите во Примерокот 15 укажуваат на промена под релативно стабилни услови доминирани од интеракцијата на карпите и течната маса на местото на тектонско пренатрупање.

Севкупно, Примерокот 15 покажува напредна, но текстурално добро организирана фаза на хидротермални процеси, во која и оливинот и ортопироксенот се трансформираат во серпентински минерали, додека ја зачувуваат својата рамка од нивното структурно потекло.



Слика 39. Петрографски тенок пресек на примерокот 16 што ги прикажува карактеристиките на серпентинизација и тектонска деформација (а-ф).

Figure 39. Petrographic thin-section of Sample 16 showing serpentinization and tectonic deformation features (a-f).

На сликите од тенкиот пресек на примерокот 16 ги гледаме ефектите од комбинацијата на процесот на серпентинизација и тектонската деформација во ултрамафична карпа, каде што примарните магматски текстури се нарушени и реорганизирани како резултат на тектонска активност и фрактури. Ова потврдува дека целиот процес се случил под динамични, а не под статички услови.

Низ целата матрица на примерокот, типичната решеткаста текстура што ја гледаме во составот на серпентинизираната и помалку деформирана карпа е заменета со нова комплексна, фиброзна серпентинска структура која е локално испреплетена. Развојот на нови и компресирани текстури укажува на рекристализација на серпентинските минерали што е резултат на деформација под услови на тектонски притисок. Ова укажува дека процесот на серпентинизација се случил на синхронизиран начин со деформацијата, што резултира со проширување на минералите и структурна реорганизација под услови контролирани од тектонски притисок.

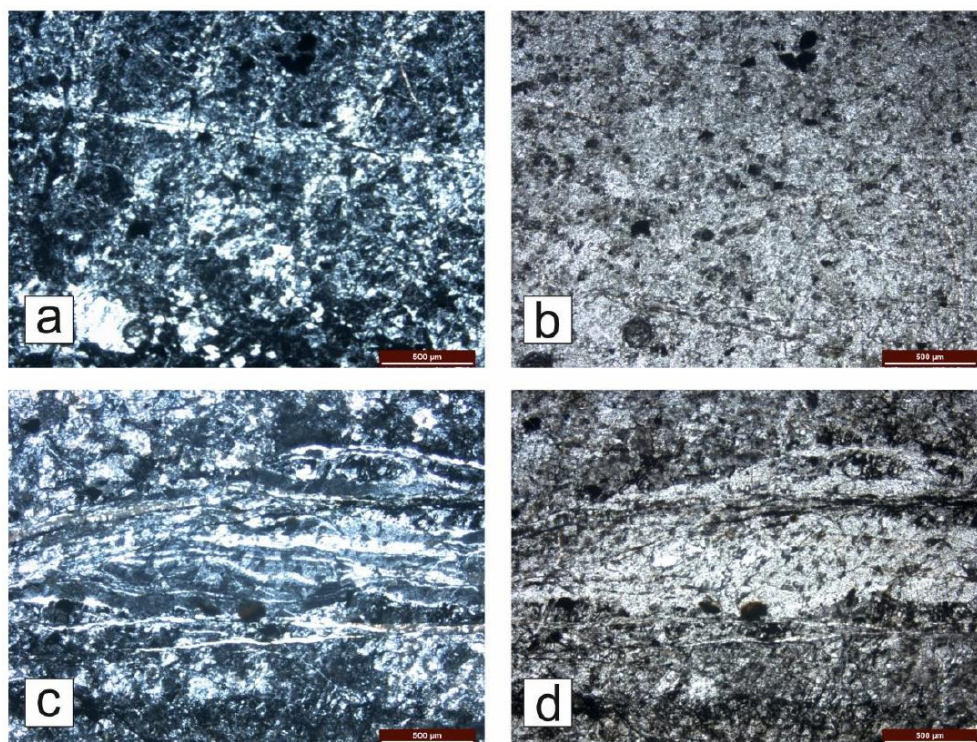
Темните минерали како што е магнетит се големи, агрегати со неправилна форма распоредени низ целата матрица.

Овој модел ја објаснува активноста и мобилизацијата на железото за време на повторно таложење во процесот на деформација, каде што циркулацијата на

течности и динамичките процеси на рекристализација промовирале дифузна сегрегација на минералите, наместо локализирана концентрација по минерализираните вени.

Значајна петрографска карактеристика на овој примерок е присуството на големи ортопироксенски порфиорокласти кои покажуваат делумна бастилизација. Присуството на овие кристали покажува јасни докази за механичка деформација, вклучувајќи кршење и свиткување по нивните рабови. Оваа матрица, која е опкружена и богата со серпентин, се чини дека тече околу овие порфиорокласти, што е отпорно, претставувајќи контраст во компетентноста помеѓу примарните минерални остатоци и серпентинизираната матрица, без целосно структурно одвојување.

Севкупно, Примерокот 16 документира тектонска средина на хидротермална промена во која деформацијата и интеракцијата помеѓу карпестата маса и течноста во минералната рекристализација беа тесно поврзани.



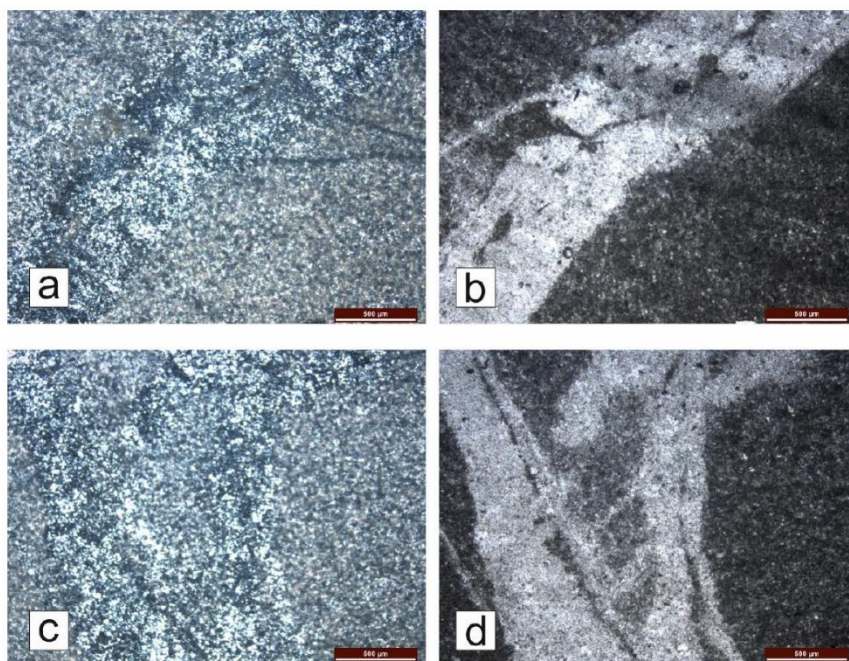
Слика 40. Петрографски карактеристики на примерокот 17: ултраfino-зрнести серпентинска матрица, катакластични текстури, дисперзиран магнетит и локализиран структури на смолкнување формирани при динамична деформација (а-д).

Figure 40. Petrographic features of Sample 17: ultrafine-grained serpentine matrix, cataclastic textures, dispersed magnetite, and localized shear structures formed under dynamic deformation (a-d).

Овој примерок претставува напредна фаза на деформација и значително намалување на големината на зрната што влијае на ултрамафичната карпа. Примарните магматски текстури, како и типичните серпентинизирани структури како што е ретикулацијата, целосно исчезнаа и се заменети со многу фин и масивен материјал, што укажува на обемна преработка под динамички услови.

Матрицата на карпата е доминирана од криптокристален во кој контурите на овој минерал се неразличливи. Оваа екстремно фина структура потврдува дека механичкото дробење и рекристализација поврзани со катакластичната деформација биле интензивни. Темните минерали, кои се главно магнетит, се појавуваат како многу фини зрна и се дистрибуирани низ целата матрица, но не како вени или концентрирани површини, што одразува широко распространета прераспределба на железото за време на деформацијата каде што промената била потпомогната од течната маса.

Истакната структурна карактеристика е развојот на локализирана зона на смолкнување во која деформацијата е силно концентрирана. Во оваа зона, серпентинизираниите минерали претставуваат паралелно проширување во насока на движење на структурите што е слично на течната маса, што укажува на дуктилен тек на серпентинизираната матрица под диференцијален притисок помеѓу масите. Додека примерокот 17 одразува интензивна тектонска реорганизација со намалување на големината на зрната што создава хомогенизирана и масивна серпентинитна структура. Општо земено, Примерокот 17 документира тектонско-метаморфна фаза која се карактеризира со карпи под диференцијален притисок, од која дошло до развој на криптокристален серпентинит и локализирана деформација во зони на смолкнување. Петрографските докази сугерираат дека процесите на деформација доминирале во конечната еволуција на карпата, трансформирајќи ги претходните текстури во ситнозрнести серпентинити со ткаенина која била контролирана од структурите што се формирале во динамична тектонска средина.



Сл. 41. Петрографски карактеристики на Примерок 18: хомогенизирана серпентинска матрица, кршливо испукување и стокворк жилен систем што укажува на доцнофазна деформација (а-д).
Figure 41. Petrographic features of Sample 18: homogenized serpentine matrix, brittle fracturing, and stockwork vein system indicating late-stage deformation (a-d).

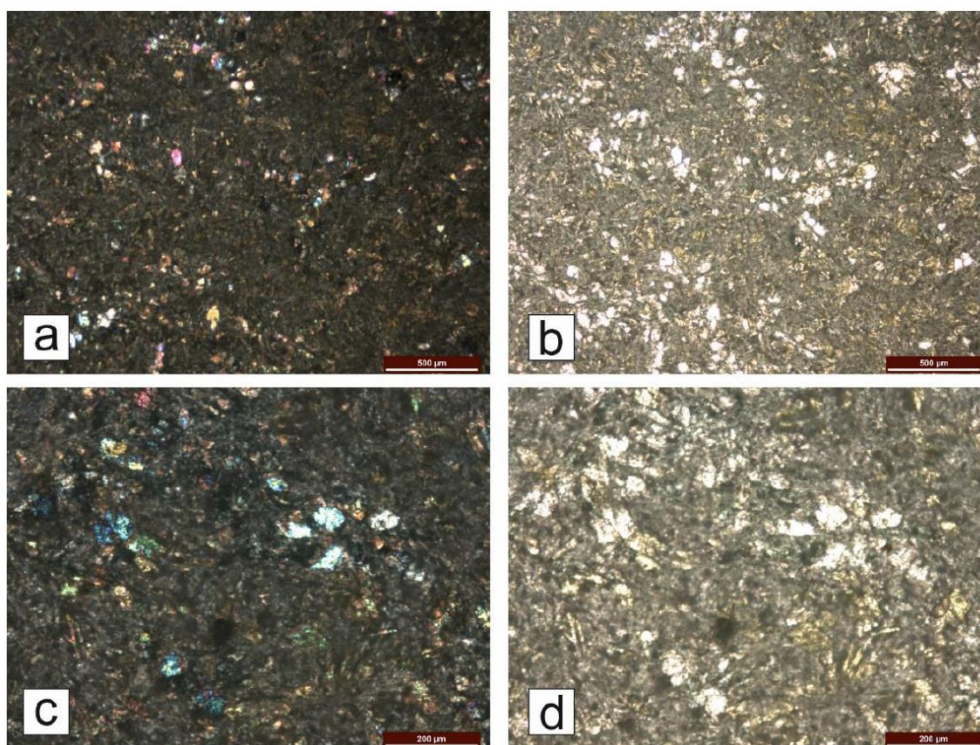
Претставува ултрамафична карпа формирана од напредна фаза на промена која е придружена со кршлива деформација и обемно жиловидност. Примарните магматски текстури создадени од оливин и пироксени исчезнале и се заменети со масивна, хомогенизирана структура, што укажува на интензивна и продолжена серпентинизација пред деформација.

Матрицата е доминирана од фина, криптокристална и хомогена серпентинска маса, каде што минералешките промени повеќе не се очигледни. За разлика од динамички ориентирана и фолијатна структура забележана во Пример 17, серпентинската матрица во Пример 18 е целосно неориентирана и масивна, што укажува на отсуство на динамичка рекристализација придружена со еластично расцепување. Наместо тоа, структурата одразува статичка серпентинизација проследена со кршливи фрактури.

Петрографската карактеристика на овој примерок е разновидноста на неправилни фрактури, како и облици на вени што ја сечат масивната матрица. Овие вени имаат остри врвови што се разгрануваат локално за да формираат хаотична текстура во која фрактурите се повторуваат. Нивната посветла боја и јасни граници укажуваат на таложење во доцна фаза на хидротермални

минерали, како што се карбонати и силикатни фази, за време на процесите на формирање и фрактура. Моделот на овие наслаги укажува дека по хидротермалниот процес, карпестата маса претрпела кршлива деформација, при што тектонските или хидрауличните притисоци генерирале обемни мрежи на фрактури кои последователно биле исполнети со циркулирачки течности. Во споредба со претходно анализираните примероци, Примерокот 18 претставува модел кој е формиран во подоцнежна еволутивна фаза, карактеризирана со кршлива суперпозиција, а не со еластична деформација.

Петрографските докази ја нагласуваат улогата на тектонското или хидрауличното фрактурирање во доцната фаза во модифицирањето на ултрамафичните карпи и олеснувањето на циркулацијата на хидротермалните течности за време на последните фази на промена.



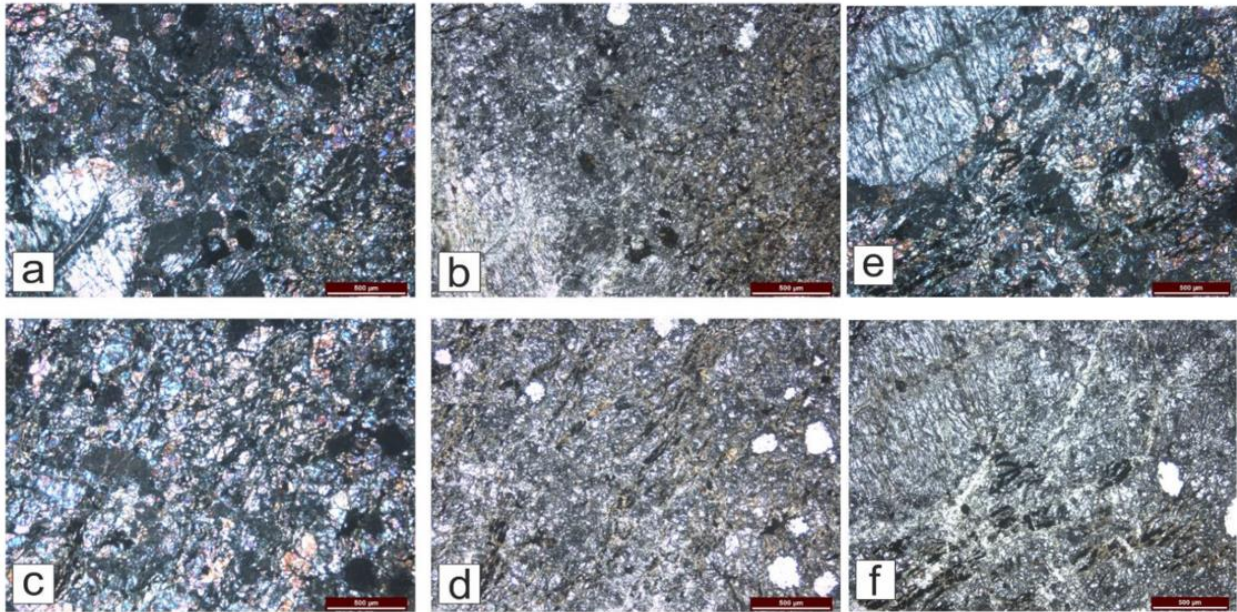
Слика 42. Петрографски тенок пресек од Примерокот 19 кој покажува интензивна кршлива деформација и катакластична текстура (а-д).
Figure 42. Petrographic thin-section of Sample 19 showing intense brittle deformation and cataclastic texture (a-d).

Овој примерок, исто така, претставува напредна фаза на кршлива деформација и интензивно дробење што влијае на ултрамафичен протолит кој претходно поминал низ процеси на серпентинизација. Сите примарни магматски текстури, вклучувајќи мрежни и порфирокластични структури, се целосно деформирани и

сега се заменети со добро фрагментирано катакластична ткаенина, што укажува на кршлива деформација и многу високо тектонско оптоварување.

Појавата на пресекот е доминирана од бројни фрагменти од мали, неправилно аголни кристали во темна серпентинска матрица. Овие фрагменти, кои се појавуваат со бои со висока интерференција под вкрстено поларизирана светлина, претставуваат фрагментирани остатоци од оливин и пироксен. Нивните аголни форми и остри рабови по должината на фрактурата јасно укажуваат на механичкиот процес на фрагментација, претставувајќи интензивно кршење на зрната по должината на зоната на расцепување или одвојување.

Околната матрица се состои од фини серпентински минерали каде што карпестата маса е формирана со механичко мелење. Оваа фина матрица ги пополнила просторите помеѓу аголните пукнатини, кои создале типична текстура на катакластична деформација што е поврзана со фрактура. Примерокот 19 покажува кршливо однесување, во кое намалувањето на големината на зрната е контролирано повеќе од фрактура отколку од рекристализација. Во споредба со другите примероци во серијата, Примерокот 19 претставува една од најекстремните фази на кршлива деформација. Додека Примерокот 17 ја одразува деформацијата во зоната на кршливо-дуктилна транзиција, а Примерокот 18 го документира навлегувањето на масата во масивна серпентинска матрица, Примерокот 19 демонстрира целосно катакластична деструкција на ултрамафичната арпеста маса долж зоната на деформација со висок напон.



Слика 43. Петрографски карактеристики на Примерокот 20: ортопироксенски порфиорокласти во серпентинизирана матрица, милонитична фолијација и дуктилно-кршлива деформација на зоната на смолкнување (а-ф).

Figure 43. Petrographic features of Sample 20: orthopyroxene porphyroclasts within a serpentinized matrix, mylonitic foliation, and ductile-brittle shear zone deformation (a-f).

Претставува еден од најјасните примери за интензивен динамичен метаморфизам и деформација на зоната на смолкнување што влијае на ултрамафична секвенца. Примерокот покажува добро развиена порфиорокластична текстура, карактеризирана со големи и механички отпорни кристали вградени во ситнозрнеста, добро ориентирана серпентинизирачка матрица.

Највпечатливата карактеристика во овој дел е присуството на големи ортопироксенски (Орх) порфиорокласти. Овие кристали се одликуваат со нивните мали интерференции во боја и добро дефинирани траги на расцепување. Под тектонски притисок, тие се однесувале како цврсти материи во дуктилна матрица, но се забележуваат и јасни карактеристики на внатрешна деформација. Прекршувањето на нивните контури по рабовите на порфиорокластите укажува дека тие доживеале диференцијален притисок во текот на деформацијата.

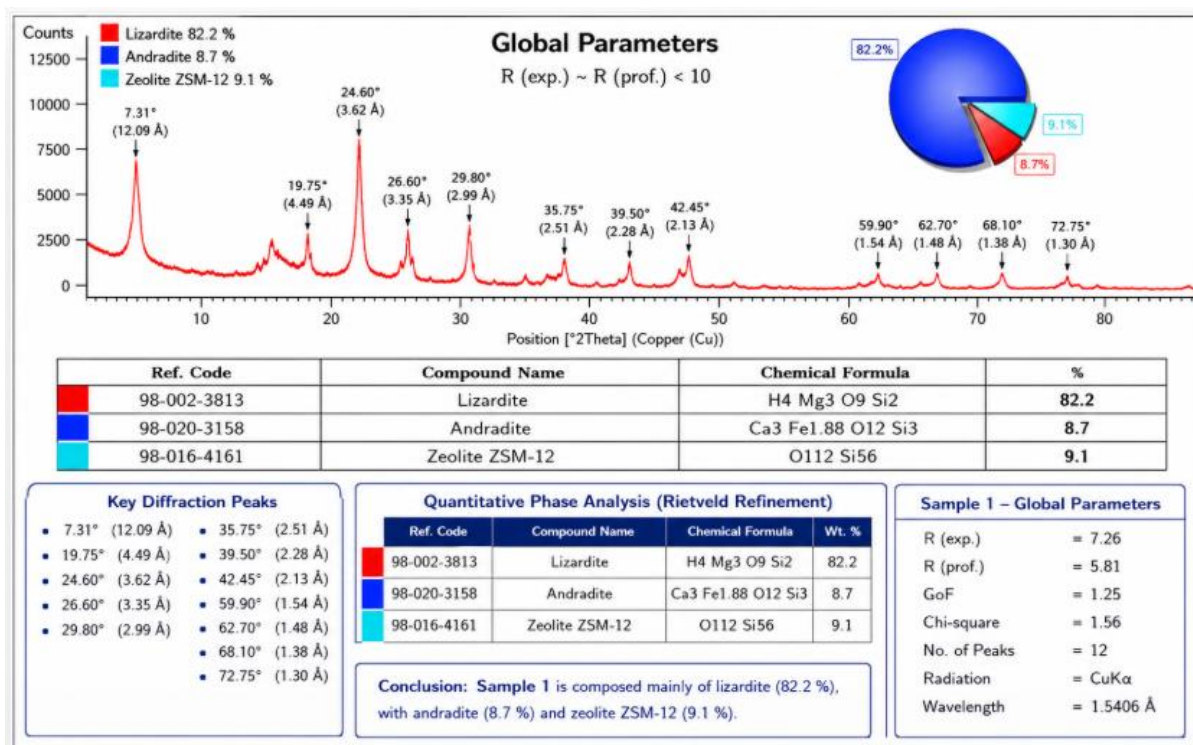
Целата околна матрица се состои од серпентинизирани минерали на оливин и магнетит кои формираат милонитна фолијација. Мали фрагменти од реликти на оливин во оваа матрица се издолжени и порамнети паралелно со насоката на смолкнување, давајќи јасен доказ дека сите пластични деформации и

преориентации на минералите се случиле како резултат на тектонски притисок. Ова ткаенина сугерира дека деформацијата се случила во зоната на рифт под услови кои се приближуваат кон транзицијата од кршливост во дуктилна. Во споредба со претходно анализираните примероци, Примерокот 20 претставува напредна фаза на деформација во која доминираат порфиорокlastични и милонитни текстури. Додека претходните примероци документираа статичка серпентинизација и катакlastична фрагментација, Примерокот 20 јасно демонстрира синтектонска рекристализација и пластичен тек.

5.7. XRPD анализа на истражуваното подрачје

Во истражувањето на материјалите, научниците поставиле многу аналитички прашања поврзани со хемискиот состав и анализа и кристалната структура на минералите. Дифракцијата на X-зраци (XRPD) е лабораториска техника која недеструктивно и прецизно добива информации како што се хемискиот состав, кристалната структура, ориентацијата на кристалот, големината на кристалот, деформацијата на решетката, претпочитаната ориентација и дебелината на слојот. Затоа, XRPD се користи за анализа на широк спектар на материјали, од прашоци до цврсти материји и наноматеријали. Многу материјали се составени од мали кристали. Хемискиот состав и структурниот тип на овие кристали се нарекуваат нивни „фази“. Материјалите можат да бидат еднофазни или повеќефазни мешавини и можат да содржат и кристални и некристални компоненти. Во рендгенски дифрактометар, различните кристални фази даваат различни дифракциски шеми. Идентификацијата на фазите може да се изврши со споредување на шемите на дифракција на X-зраци добиени од непознати примероци со шемите во референтните бази на податоци.

Релативните интензитети на шемите во различни фази во повеќефазна мешавина се користат за да се одреди целокупниот состав на примерокот. Дифракцијата на X-зраците е резултат на конструктивна интерференција помеѓу X-зраците и кристалниот примерок. Брановата должина на употребените X-зраци е од ист ред на големина како и растојанието помеѓу атомите во кристалната решетка. Ова води до дифракциски модел кој може да се анализира на неколку начини, од кои најпопуларен е примената на добро познатиот Бреггов закон ($n\lambda = 2d \sin \theta$) кој се користи при мерење на кристали и нивните фази.



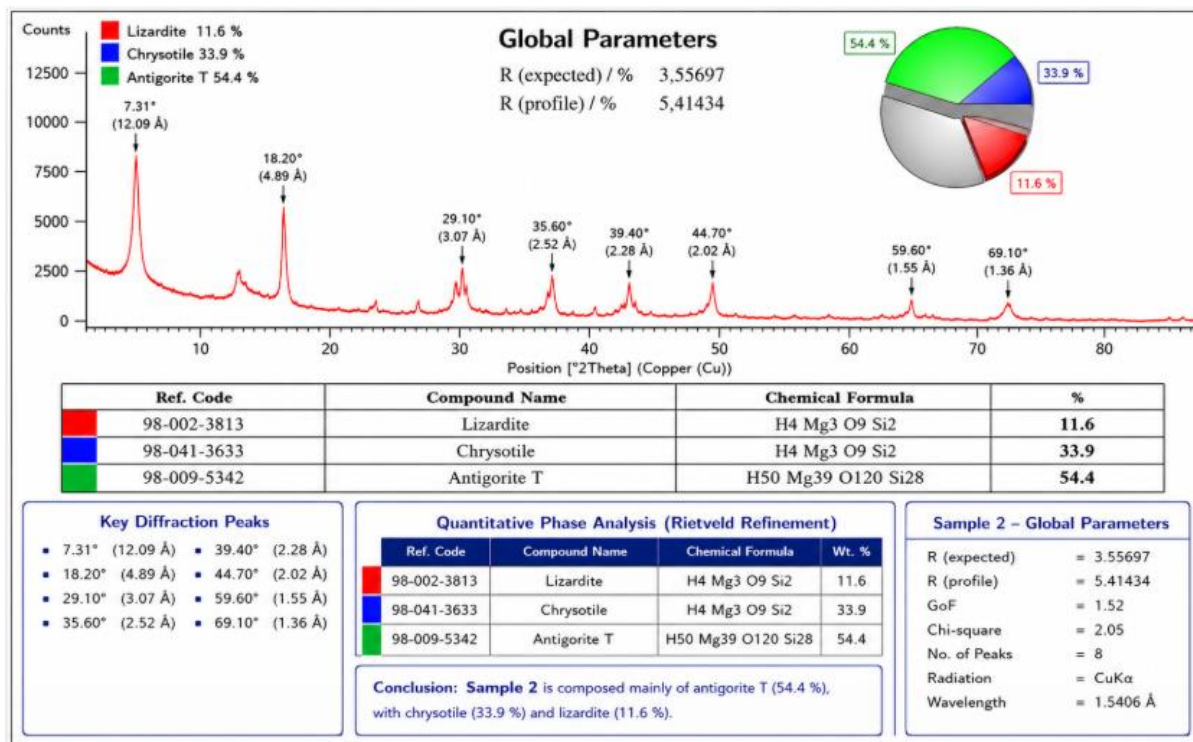
Слика 44. XRD спектар на примерок 1 со идентификувани минерални фази и полуквантитативни пропорции.
Figure 44. XRD spectrum of Sample 1 with identified mineral phases and semi-quantitative proportions.

XRD спектарот на примерокот 1 покажува целосно серпентинизиран состав доминиран од серпентинитни минерали. Квантитативната анализа покажува дека лизардитот сочинува 82,2%, што го потврдува како главна минерална фаза во овој примерок. Главните дифракциски врвови забележани на приближно 12°, 24°, 35-38° и 60° (CuKα) се карактеристични за триоктаедарската структура на лизардитот, што ја поддржува неговата идентификација како доминантна кристална фаза.

Андрадитот 8,7% се појавува како секундарна фаза. Овој калциум-железен гранат обично се формира под метасоматски услови, но се јавува и за време на интеракцијата на ултрамафичните карпи со течности богати со Ca. Неговото присуство потврдува хемиски еволуирана фаза што вклучува хидротермални процеси надвор од примарната серпентинизација.

Додека третата идентификувана фаза, зеолит ZSM-12 9,1%, укажува на доцна фаза на промена. Зеолитните минерали најчесто се поврзуваат со циркулацијата на алкални, богати со силициум диоксид течности под услови на ниска до умерена температура. Оваа фаза претставува секундарен

хидротермален процес карактеризиран со процеси на рекристализација во пукнатините во порозните зони по завршувањето на серпентинизацијата.

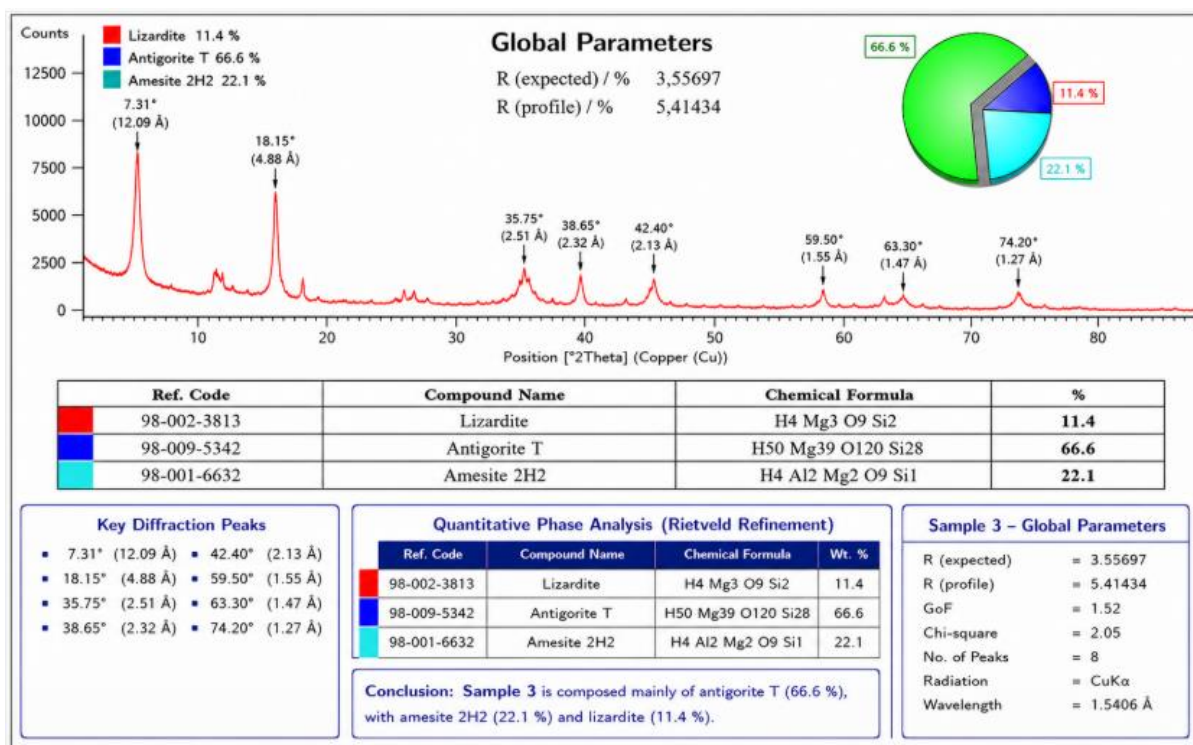


Слика 45. XRD спектар на примерок 2 со идентификувани серпентин фази и полуквантитативни минерални пропорции.

Figure 45. XRD spectrum of Sample 2 with identified serpentine phases and semi-quantitative mineral proportions.

Овој графикон покажува серпентинизиран состав доминиран од серпентински минерали. Антигоритот е доминантна фаза со присуство од 54,4%, проследен од хризотил со 33,9% и лизардит со 11,6%. Доминацијата на антигоритот со над 50% укажува дека се работи за напредни услови на серпентинизација каде што е претставен процес на прогресивна рекристализација на претходните серпентински фази, што одразува развиена минералозна фаза на ултрамафичниот систем. Значителното присуство на влакнести минерали како што е хризотилот укажува на развој на влакнести фази поврзани со проток на флуид кој е контролиран од структури, додека помалиот дел од лизардит се толкува како остаток од почетна фаза на ниска температура. Параметрите на рафинирање (R-очекувано = 3,56% и R-профил = 5,41%) покажуваат одлично вклопување помеѓу пресметаните модели и експерименталните податоци, потврдувајќи ја високата сигурност во идентификацијата на фазите. Генерално, минералоскиот состав на Пример 2 поддржува полифазна еволуција на

серпентинизација, во која процесите на трансформација од раните фази до Антигорит, како и развојот на Хризотил, одразуваат многу сложена интеракција помеѓу термичките услови, циркулацијата на флуидна маса и контролите што се развиле за време на процесите на ултрамафична алтерација.



Слика 46. XRD спектар на примерок 3 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.

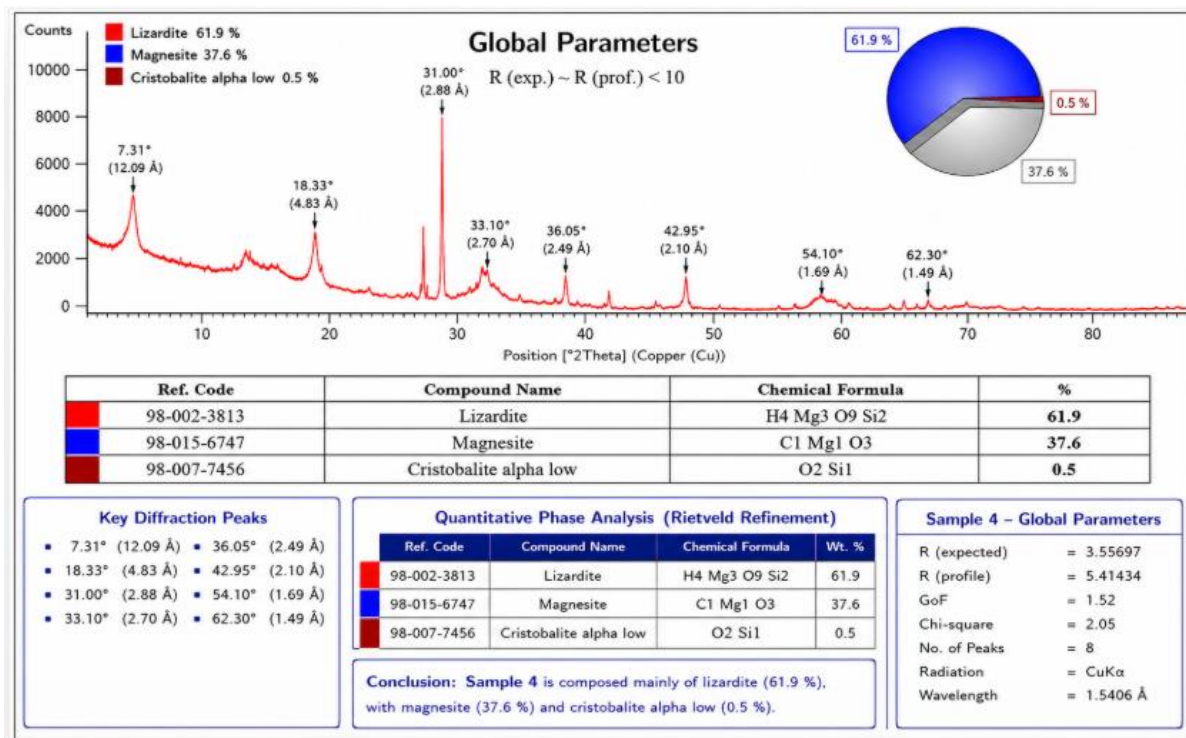
Figure 46. XRD spectrum of Sample 3 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.

Ова открива минерален асамблаж доминиран од Антигорит, кој го сочинува главниот дел со 66,6%, проследен од амезит (2H2) со 22,1%, додека лизардит придонесува со 11,4%. Доминацијата на Антигорит укажува на серпентинизација при релативно високи термички услови во споредба со серпентинитите доминирани од минералот лизардит, што одразува прогресивна рекристализација за време на хидротермалниот процес на ултрамафичната карпа.

Присуството на амезит укажува на фаза на промена што вклучува инкорпорирање на алуминиум, кој се формира под метасоматски услови, а во некои случаи и преку локализирано мешање на течности што го фаворизираат развојот на алуминозни серпентински минерали. Долниот дел од лизардит може

да се види или протолкува како остаток од претходна фаза на серпентинизација што е зачувана за време на прогресивната трансформација во Антигорит.

Целокупната минералозна врска во овој примерок укажува на полифазен еволутивен процес, каде што почетната серпентинизација била проследена со повисоки термодинамички услови и рекристализација на минералите, што го одразува влијанието на циркулацијата на течностите и промената на физичко-хемиските параметри за време на промената на ултрамафичниот протолит.



Слика 47. XRD спектар на примерок 4 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.

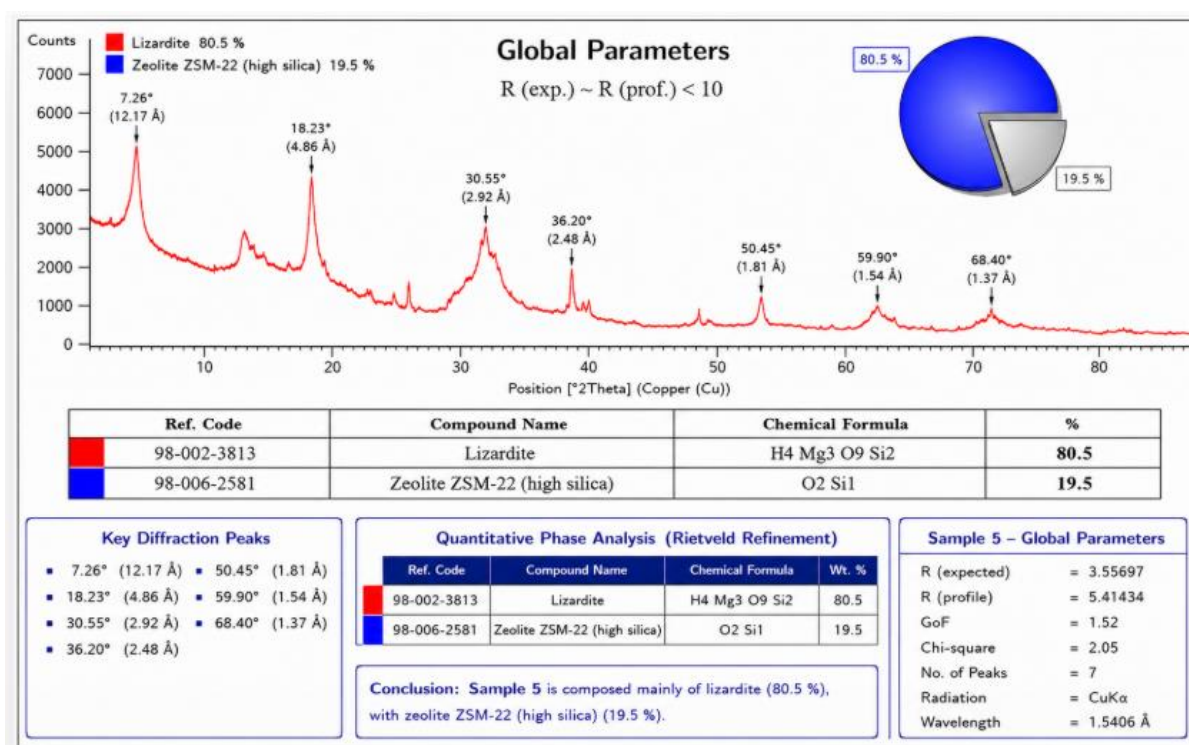
Figure 47. XRD spectrum of Sample 4 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.

Примерокот 4 покажува минералшки состав во кој доминира минералот Лизардит со 61,9%, проследен од Магnezит со 37,6%, додека α -алфа кристобалит е присутен на многу ниски нивоа од 0,5%. Високото присуство на Лизардит укажува на појава на фаза на серпентинизација што се случила под услови на ниска температура за време на хидротермалниот процес, што резултирало со промена на ултрамафичните карпи.

Процентот на магнезит од 37,6% е важен индикатор, кој ги објаснува секундарните процеси на карбонизација што се случиле и влијаеле на

серпентинитот преку циркулација на течности богати со CO₃ што реагирале со минерали што содржат магнезиум во подоцнежните фази од хидротермалниот процес. Оваа минералозна интеракција го објаснува преминот од серпентинизација во карбонизација, кој е поврзан со напредни метасоматски услови и активна тектонска средина каде што циркулацијата на течности била многу интензивна.

Многу ниското присуство на кристобалит се толкува како секундарен силикатен производ што се појавил во текот на последните фази на хидротермална промена каде што Примерокот 4 документира полифазен еволутивен процес.



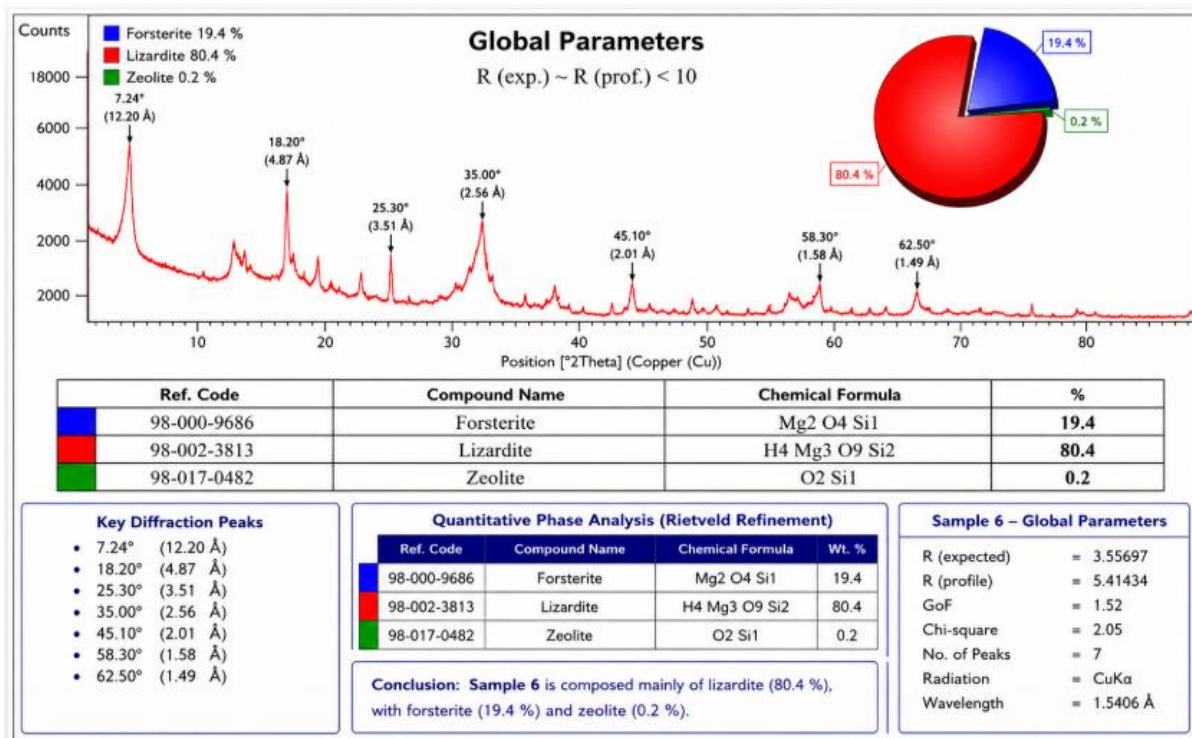
Слика 48. XRD спектар на примерок 5 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.

Figure 48. XRD spectrum of Sample 5 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.

Овој примерок го потврдува високиот минералозки состав на Лизардит со 80,5%, придружен со зеолит ZSM-22 со 19,5%. Доминацијата на лизардит укажува дека процесот на серпентинизација бил главниот процес што довел до промената што влијаела на ултрамафичниот протолит и се случил под релативно ниски температурни услови, типични за хидротермалната хидратација на минерали што содржат оливин и пироксен.

Значителното присуство на зеолитски минерали богати со силициум диоксид укажува на подоцнежна фаза каде што самата циркулација на флуиди содржела флуиди богати со Si кои биле таложена како секундарни минерали во порите и фрактурите по главната фаза на серпентинизација. Оваа минералозна интеракција одразува полифазна еволуција на системот, во која примарната серпентинизација била проследена со последователни метасоматски и хидротермални процеси што го модифицирале оригиналниот состав на карпите.

Поволните параметри на рафинирање ($R(\text{експ.}) \approx R(\text{проф.}) < 10$) ја потврдуваат веродостојноста и точноста на идентификацијата на минералозката фаза. Генерално, спектарот на примерокот 5 претставува серпентинит доминиран од лизардит со јасни докази за секундарна хидротермална активност под влијание на развојот на зеолитните иликатни минерални фази.



Слика 49. XRD спектар на примерок 6 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.

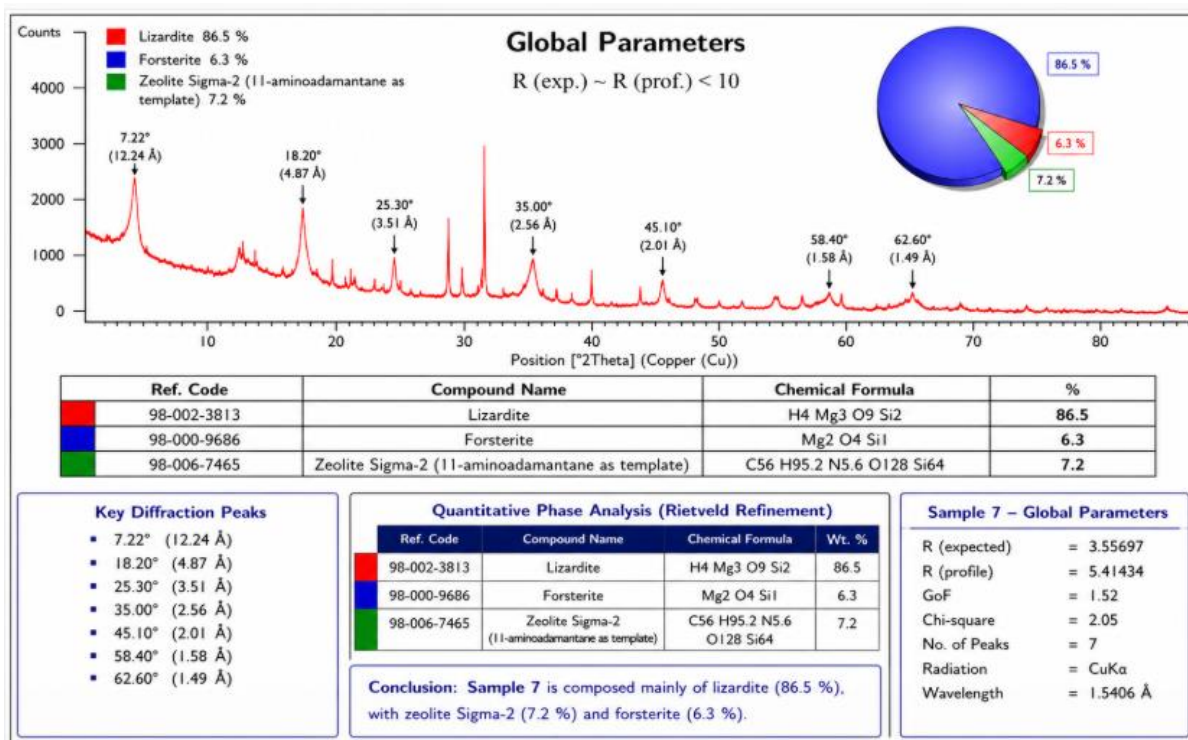
Figure 49. XRD spectrum of Sample 6 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.

Тука имаме минералозки состав во кој доминира лизардит со 80,4%, придружен со дел од форстерит со 19,4%, додека зеолитот се појавува само како трага со 0,2%. Доминацијата на лизардит ни покажува дека серпентинизацијата

била голем процес на промена што влијаел на ултрамафичниот протолит, одразувајќи обемен процес на хидратација под релативно ниски температурни услови.

Сепак, присуството на форстерит, како примарен оливин минерал, е многу значајно, покажувајќи ни дека процесот на серпентинизација не бил целосен, но дека се зачувани остатоци од оригиналната минералологија на протолитот. Овој примерок покажува дека серпентинизацијата била делумна и хетерогена, при што различни делови од карпата се варијабилно изложени на различни степени на течности.

Малото присуство на зеолит се толкува како резултат на процеси што се случиле подоцна како секундарни хидротермални процеси кои имале само многу ограничено влијание. Генерално, Примерокот 6 претставува средна фаза на минералошка еволуција, во која напредната серпентинизација коегзистира со остатоци од примарната минералологија.



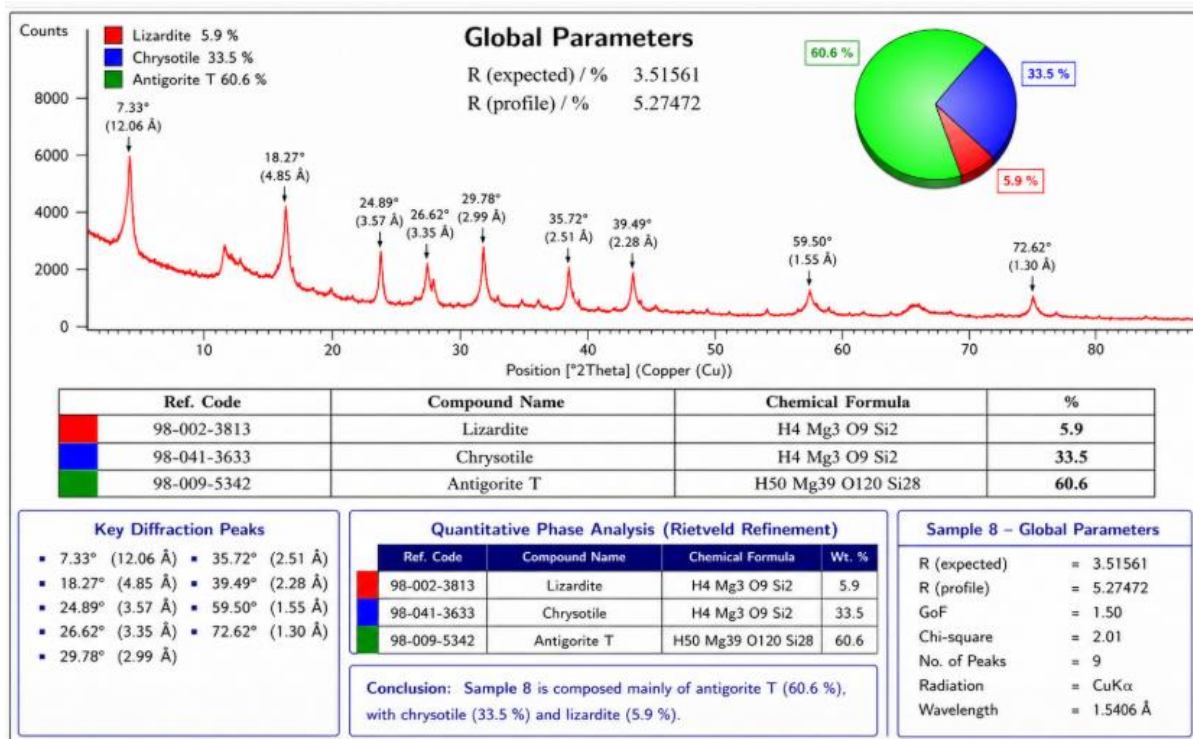
Слика 50. XRD спектар на примерок 7 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.

Figure 50. XRD spectrum of Sample 7 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.

Ова покажува минералошки состав во кој доминира лизардит со 86,5%, а придружен со форстерит со 6,3% и зеолит Сигма-2 со 7,2%. Високото присуство

на лизардит укажува дека серпентинизацијата била главниот процес на промена што влијаел на ултрамафичниот протолит и се случила под услови на ниска до умерена температура, кои се карактеристични за хидротермалните процеси на хидратација во ултрамафичните карпи. Присуството на форстерит, како примарна оливинска фаза, укажува дека процесот на серпентинизација не бил целосно завршен и дека некои реликтни минерали кои ги зачувале своите оригинални својства остануваат. Ова ја одразува хетерогеноста во интензитетот на промената и варијабилноста во пристапот што масата на флуиди го имала до карпата. Идентификацијата на зеолитот Сигма-2 сугерира дека се работи за секундарна хидротермална фаза, поврзана со циркулацијата на флуиди богати со силикати кои ги таложеле зеолитските минерали во подоцнежна фаза од еволуцијата.

Овој минералшки збир потврдува процес што се случил за време на полифазната алтерација за време на серпентинизацијата, во кој секундарните метасоматски процеси играле многу важна улога. Генерално, Примерокот 7 е серпентинит доминиран од Лизардитур, кој содржи остатоци од ултрамафичен протолит и јасни докази за доцна идротермална активност.



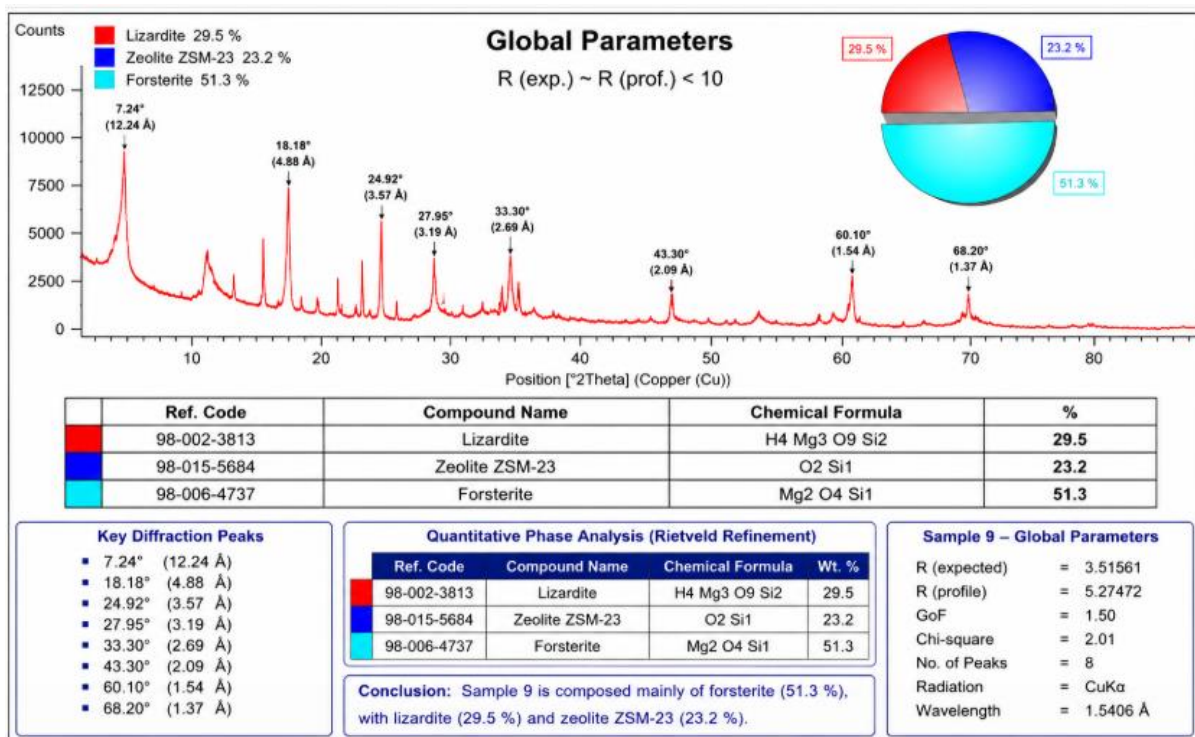
Слика 51. XRD спектар на примерок 8 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав

Figure 51. XRD spectrum of Sample 8 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.

Примерокот 8, анализиран со XRPD, покажува минералошки состав во кој доминира Антигорит, кој ја сочинува главната фаза со 60,6%, проследен од фиброзниот минерал Хризотил со 33,5%, додека лизардит се јавува во помал процент од 5,9%. Доминацијата на Антигорит укажува на напредна фаза на процеси на серпентинизација при релативно повисоки термички услови, што потврдува прогресивен процес на рекристализација за време на фазите на серпентинитот за време на хидротермалната еволуција.

Значајното присуство на фиброзен хризотил претставува фундаментален развој во развојот на фиброзните фази поврзани со циркулацијата на флуиди, каде што движењето на овие флуиди за време на алтерацијата било контролирано од тектонските структури на карпестата маса. Малото присуство на лизардит се толкува како остаток од почетокот на почетната фаза на серпентинизација која се развила под услови на ниска температура.

Параметрите на рафинирање (R -очекувано = 3,51% и R -профил = 5,27%) покажуваат добра согласност помеѓу пресметаниот модел и експерименталните податоци, потврдувајќи ја веродостојноста и точноста во идентификацијата на минералните фази. Генерално, примерокот 8 ја одразува еволуцијата на полифазната серпентинизација, во која трансформацијата во антигорит и развојот на хризотил го демонстрираат значајното влијание на термодинамичките услови за време на циркулацијата на флуидот во процесот на промена на ултрамафичниот протолит.



Слика 52. XRD спектар на примерок 9 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.

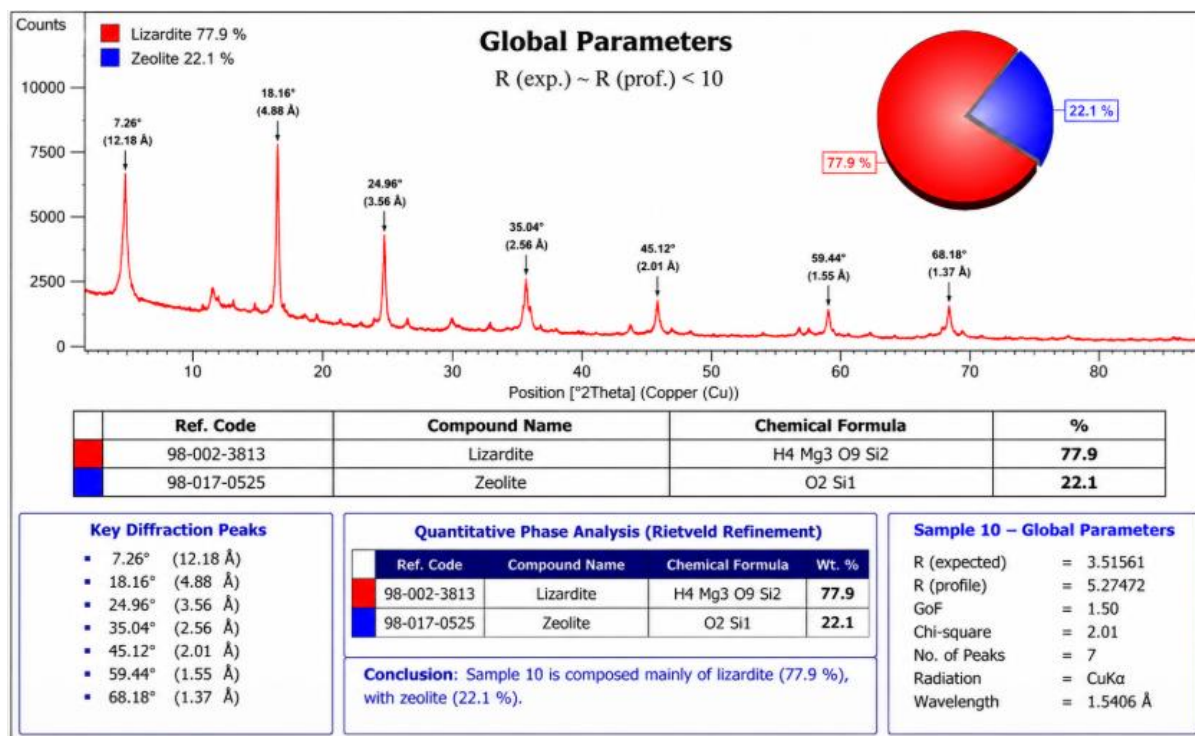
Figure 52. XRD spectrum of Sample 9 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.

Минералошкиот состав на примерокот 9, анализиран со XRPD, е карактеризиран како мешан состав во кој форстеритот ја сочинува доминантната фаза со 51,3%, проследен од лизардит со 29,5% и зеолит ZSM-23 со 23,2%. Доминацијата на форстерит како главна минерална фаза укажува дека ултрамафичниот протолит е зачуван во голема мера, докажувајќи дека процесот на серпентинизација е слабо или делумно развиен.

Присуството на минералот лизардит потврдува процес на делумна хидратација на ултрамафичните минерали под релативно ниски температурни услови. Значајниот процент на зеолит ZSM-23 укажува дека подоцнежна хидротермална или метасоматска фаза која вклучувала циркулација на флуиди со големо присуство на силикати таложила секундарни минерали во карпестите структури.

Оваа минералозна интеракција сугерира еволутивна и полифазна историја во која серпентинизацијата започнала, но не достигнала целосна трансформација на протолитот, додека последователните хидротермални процеси го модифицирале минералниот состав на системот. Генерално, примерокот 9

претставуваше релативно рана до средна фаза на серпентинизација, која се карактеризираше со значително ачувување на примарната минералологија и јасни докази за секундарна хидротермална промена.



Слика 53. XRD спектар на примерок 10 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.

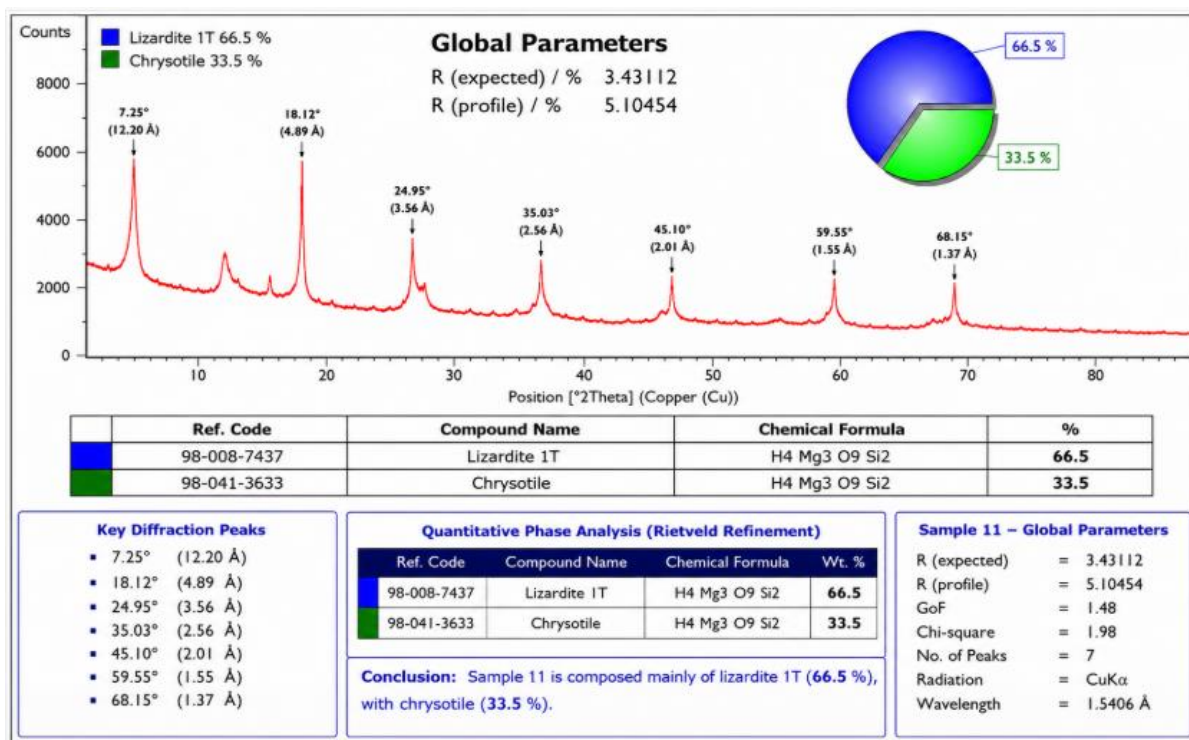
Figure 53. XRD spectrum of Sample 10 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.

Примерокот 10, анализиран со XRPD, се карактеризира со доминација на лизардит од 77,9%, придружен со значителен дел од зеолит од 22,1%. Оваа минералозна распределба укажува дека серпентинизацијата била главниот процес на алтерација што влијаел на ултрамафичниот протолит и се одвивал под услови на ниска температура, процес типичен за ултрамафична минерална хидратација.

Значителното присуство на зеолит укажува на секундарна хидротермална, а во некои случаи и на метасоматска фаза, за време на која циркулацијата на течности богати со силикати довела до таложење на зеолитски минерали во некои подоцнежни фази од еволуцијата на системот. Овој минерален склоп одразува неколку полифазни еволутивни процеси, во кои примарните процеси на серпентинизација биле проследени со секундарни процеси на алтерација кои

биле поврзани со промени во хемијата на флуидите и физичко-хемиските услови на животната средина.

Севкупно, Примерокот 10 одразува серпентинит доминиран од лизардит со јасни докази за хидротермална активност во доцна фаза што придонела за развој на зеолитски фази.



Слика 54. XRD спектар на примерок 11 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.

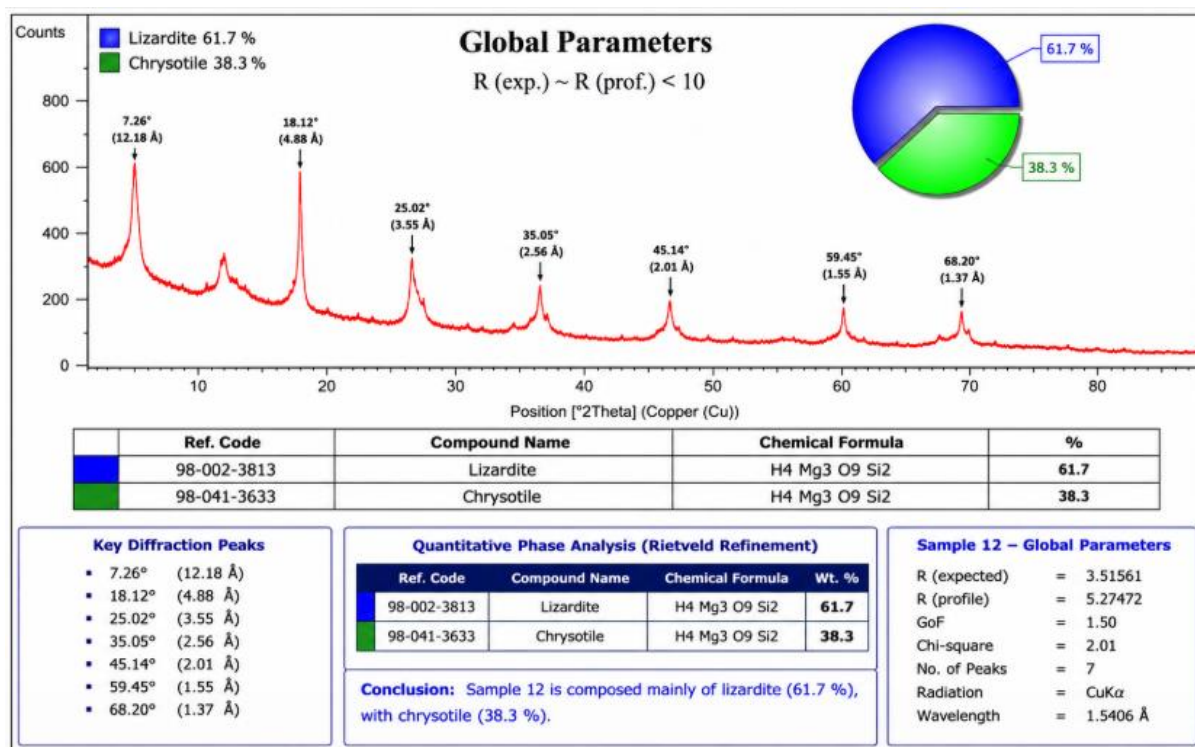
Figure 54. XRD spectrum of Sample 11 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.

Примерокот 11, анализиран со XRPD, покажува целосно серпентинизиран состав кој се состои од 66,5% лизардит 1Т и 33,5% хрисотил. Високото присуство на лизардит укажува дека серпентинизацијата се случила главно под релативно ниски температурни услови и во стабилен режим за време на хидротермален процес, каде што хидратацијата на ултрамафичните минерали довела до развој на серпентински фази со триоктаедарска структура.

Умереното присуство на хрисотил потврдува значајна фиброзна компонента, која обично се поврзува со циркулација на течности долж фрактурните структури и тектонска контрола за време на алтерацијата. Оваа минералошка асоцијација го одразува коегзистенцијата на релативно статичната серпентинизација,

претставена со лизардит, и процесите управувани од течности кои се контролирани од структурите и се изразуваат преку формирање на хризотил.

Параметрите на рафинирање (R -очекувано = 3,43% и R -профил = 5,10%) покажуваат силна согласност помеѓу пресметаниот модел и експерименталните податоци, потврдувајќи ја веродостојноста на идентификацијата на фазите. Каде што примерокот 11 претставува серпентинит формиран под умерени хидротермални услови, каде што имаме многу јасни докази за интеракција помеѓу доминантната серпентинизација и структурно контролираните процеси што го фаворизираат развојот на хризотил.



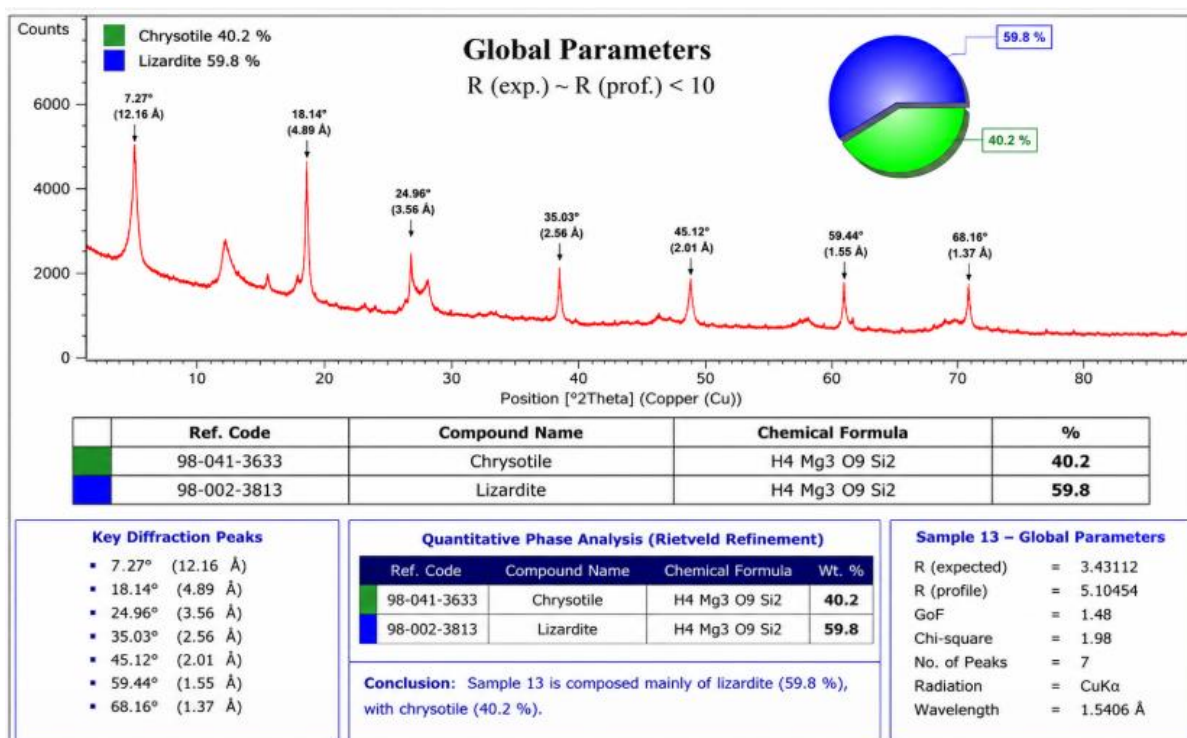
Слика 55. XRD спектар на примерок 12 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.

Figure 55. XRD spectrum of Sample 12 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.

Анализата на примерокот 12 покажува целосно серпентинизиран минералошки состав кој се состои од лизардит со 61,7% и хризотил фиброзен минерал со 38,3%. Доминацијата на лизардитот сугерира дека серпентинизацијата се развила главно под релативно ниски температурни услови и во рамките на стабилен хидротермален режим. Значителното присуство на хризотил укажува на значаен развој на фиброзни минерални фази, кои се поврзани со циркулација на течности по должината на фрактурите и со

структурна контрола што влијае на еволуцијата на системот. Коегзистенцијата на овие два полиморфа укажува на полифазен еволутивен процес, во кој статичката серпентинизација на протолитот била проследена со последователни хидротермални процеси кои биле структурно контролирани и го фаворизирале формирањето на хризотил во карпестата маса.

Севкупно, Примерокот 12 претставува напреден серпентинит во кој доминацијата на лизардитот е придружена со значајна фиброзна компонента, што ја одразува интеракцијата помеѓу хидротермалните услови и структурните фактори за време на промената на ултрамафичната карпа.



Слика 56. XRD спектар на примерок 13 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.

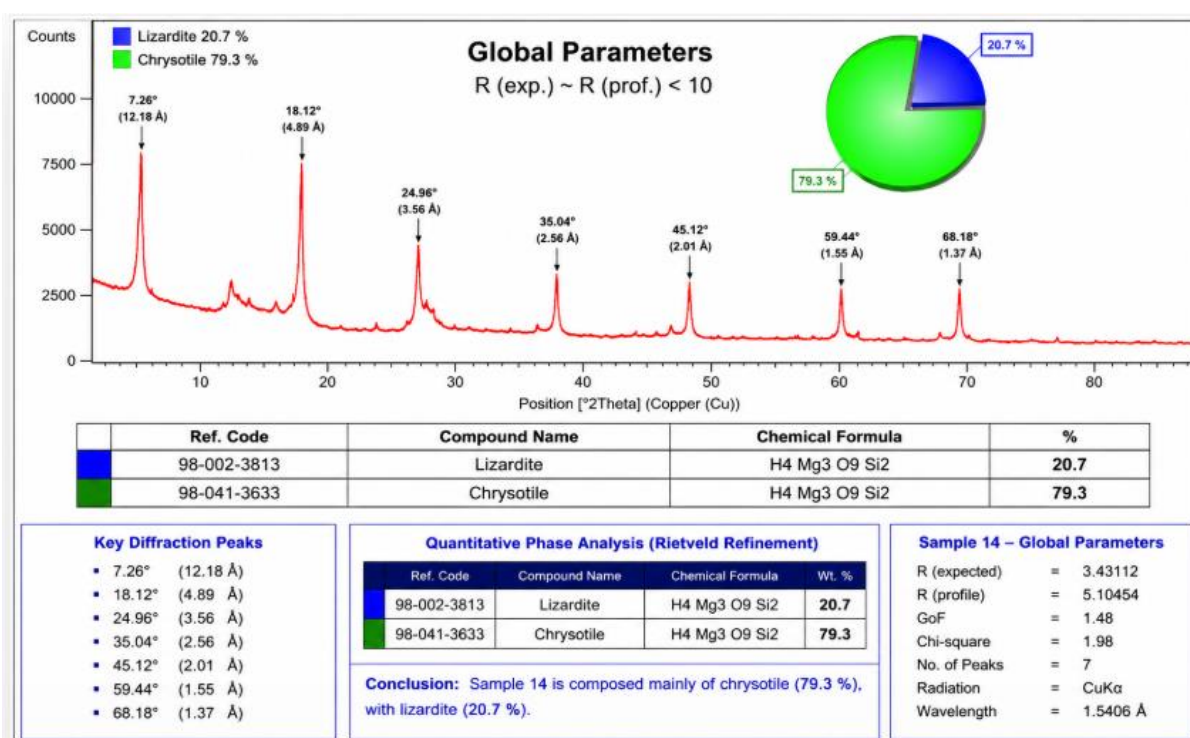
Figure 56. XRD spectrum of Sample 13 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.

Примерокот 13, анализиран со XRPD, ја потврдува минералошката серпентинизација што се случила, каде што лизардит се појавува со 59,8%, а фиброзниот минерал Хризотил со 40,2%. Процесот на серпентинизација што се развил под услови на ниска температура за време на хидротермалниот процес довел до доминација на лизардит.

Високиот процент на хризотил сугерира значаен развој на фиброзни минерални фази, кои обично се поврзуваат со циркулација на течна маса долж фрактури

кои се под влијание и контролирани од тектонски фактори. Коегзистенцијата на овие два серпентински полиморфа одразува мултифазен еволутивен процес што се случил за време на раната статичка серпентинизација, по кој следеле хидротермални и структурно контролирани процеси, каде што условите го фаворизирале формирањето на минералот хризотил.

Севкупно, Примерокот 13 претставува напреден серпентинит со значаен развој на азбестиформни фази, што ја одразува интеракцијата помеѓу хидротермалните услови и структурните процеси што се случиле за време на минералошката еволуција на ултрамафичната карпа.

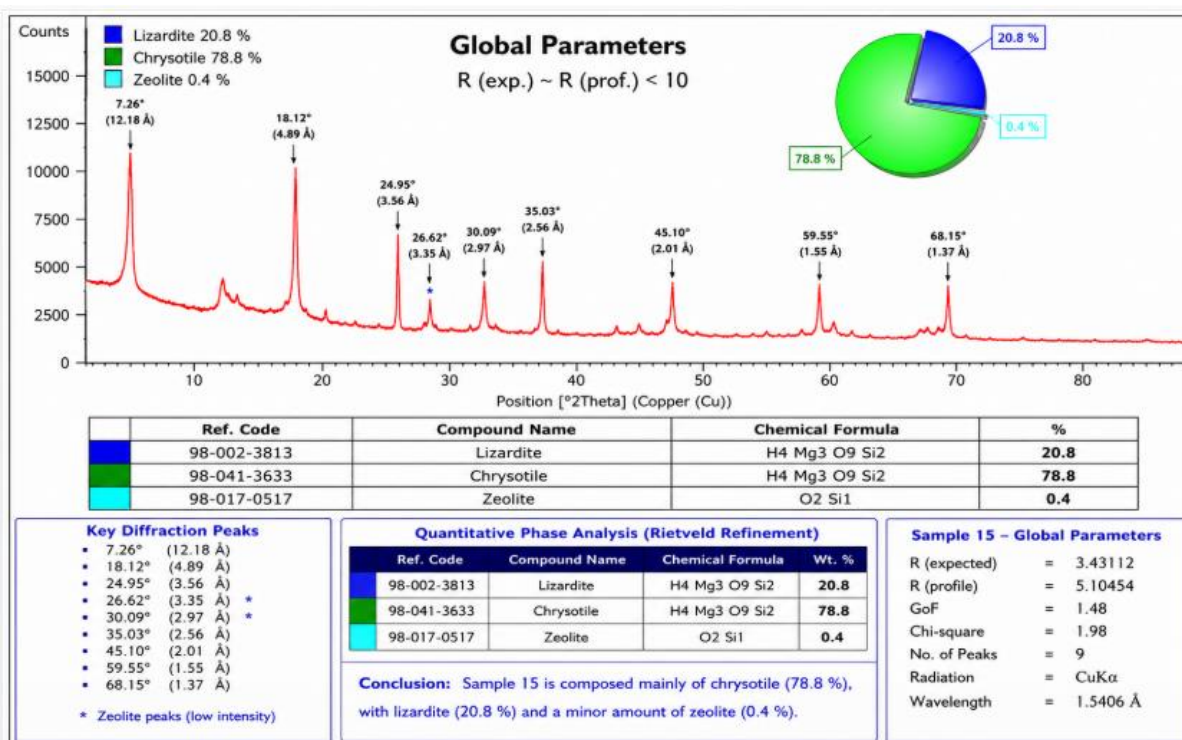


Слика 57. XRD спектар на примерок 14 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.

Figure 57. XRD spectrum of Sample 14 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.

Примерокот 14, анализиран со XRPD, покажува збир на минерали од серпентинската група доминирани од фиброзниот минерал хризотил со 79,3%, додека минералот лизардит се појавува со 20,7% од минералниот состав. Доминацијата на фиброзниот минерал хризотил претставува изразен развој на азбестиформната фаза каде што хидротермалните процеси и структурната контрола одиграле многу голема улога во еволуцијата на овој примерок. Високиот процент на хризотил е поврзан со многу интензивна циркулација на

течности по должината на зоните на фрактура и деформација, каде што физичко-хемиските услови ја фаворизираат кристализацијата на хризотилските влакна и серпентинските минерали. Ниското присуство на лизардит може да се толкува како резидуален процес за време на раната серпентинизација, кој потоа бил надреден со подинамични процеси на тектонска сила што довело до доминантно формирање на хризотил. Овие односи за време на овие фази укажуваат на напредна еволутивна фаза силно контролирана од структурните карактеристики во процесот на серпентинизација. Примерокот 14 претставува серпентинит со висок азбестен карактер каде што почетниот процес на серпентинизација е проследен со интензивен развој на хризотил под хидротермални и тектонски активни услови.



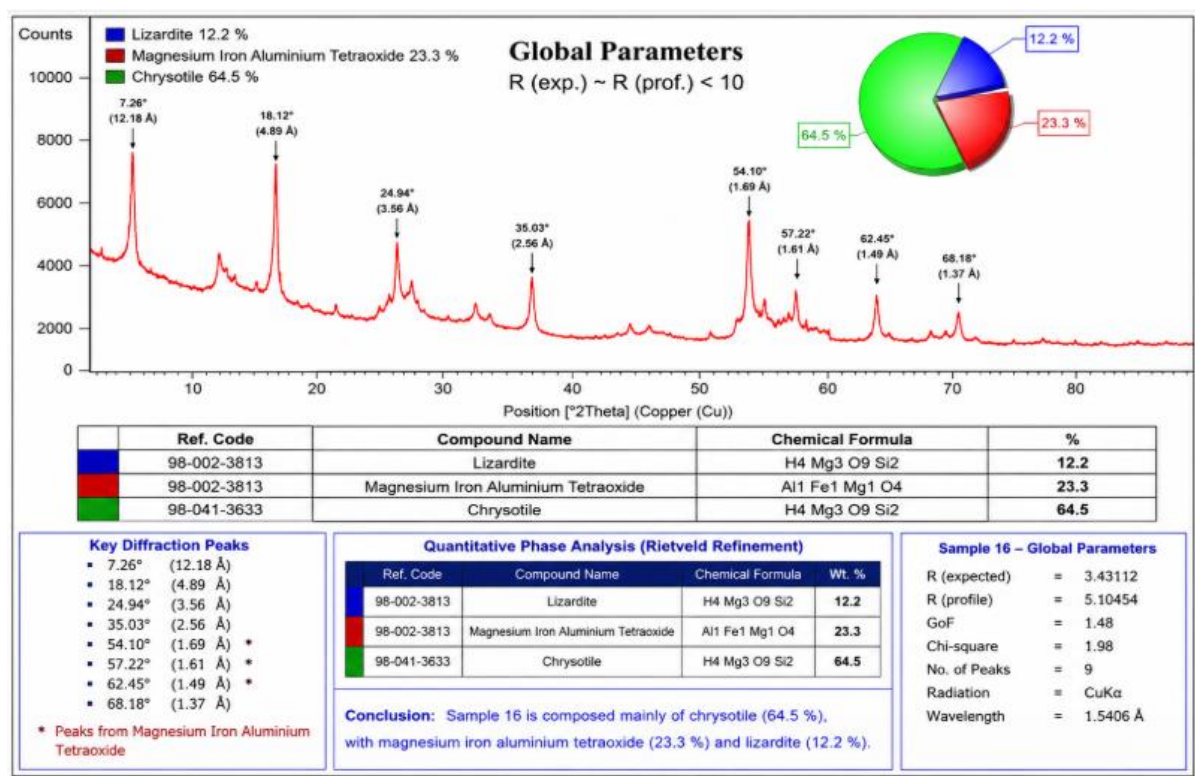
Слика 58. XRD спектар на примерок 15 со идентификувани минерални фази и полуквантитативен состав.

Figure 58. XRD spectrum of Sample 15 with identified mineral phases and semi-quantitative composition.

Анализирано со XRPD за примерок 15, кој претставува минералошки состав во кој доминира фиброзниот минерал Хризотил со 78,8%, проследен од минералот Лизардит со 20,8%, додека минералот Зеолит е присутен само како трага од минерал со 0,4%.

Вкупната доминација на фиброзниот минерал Хризотил јасно ја одразува фазата во развојот на фиброзната серпентинска фаза, аргументирајќи за клучната улога што ја игра циркулацијата на хидротермалните флуиди, во структурните сегменти кои извршиле целосна и специфична контрола за време на промената на ултрамафичниот протолит.

Присуството на Лизардит како секундарен минерал со многу помало присуство се толкува како остаток од почетна фаза за време на процесот на статичка серпентинизација, кој потоа бил надреден со динамички процеси кои ја фаворизирале кристализацијата на фиброзниот минерал Хризотил. Минималната појава на зеолит укажува на секундарен хидротермален процес кој имал многу мало и ограничено влијание врз минералошката еволуција на примерокот. Генерално, овој примерок претставува серпентинит со многу добро развиен азбестиформен карактер, кој за време на почетната фаза на серпентинизација беше проследен со доминантно формирање на хризотил под хидротермални и тектонски активни услови.

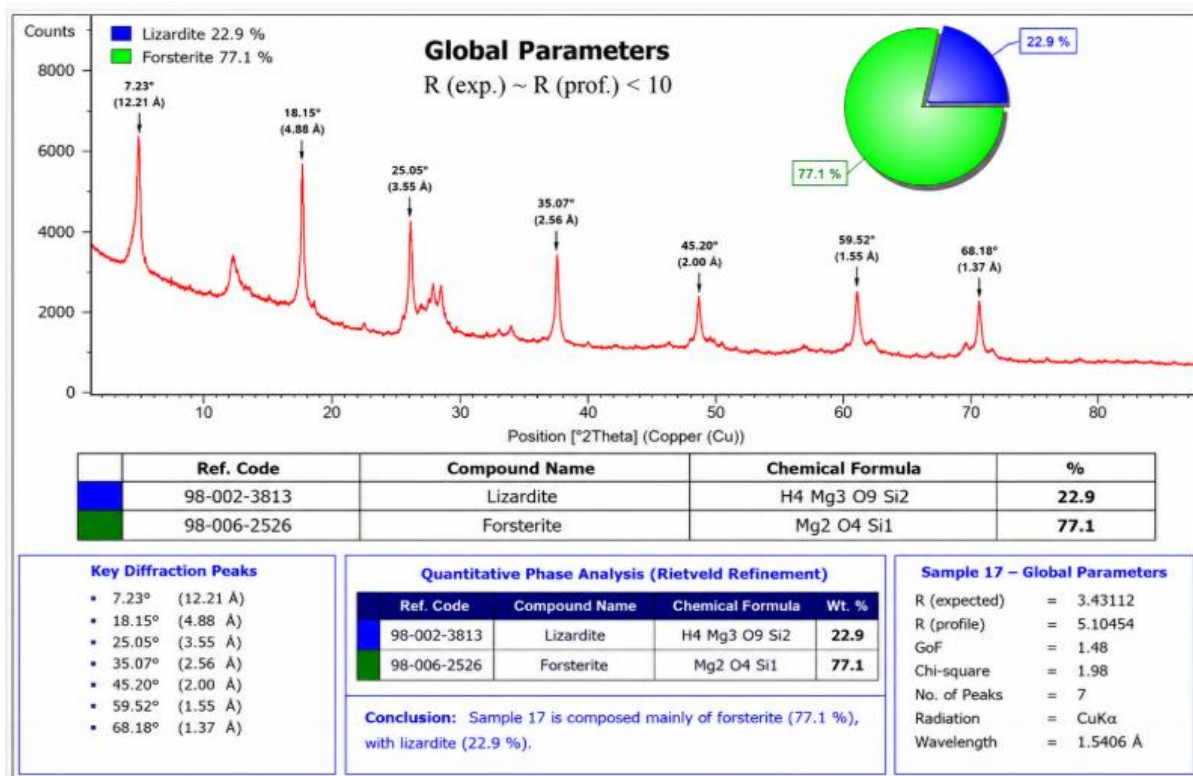


Слика 59. XRD шема од примерокот 16 што ги прикажува идентификуваните минерални фази и нивното релативно изобилство.

Figure 59. XRD pattern of Sample 16 showing identified mineral phases and their relative abundances.

XRPD анализата на примерокот 16, како и примерокот 15, покажува минералошки состав доминиран од влакнестиот минерал Хризотил 64,5%, придружен од секундарниот минерал Лизардит 12,2% и фаза на оксидационен процес идентификуван како алуминиум магнезиум железно тетроксид 23,3%. Доминацијата на Хризотил укажува на изразен развој на влакнестата фаза за време на процесот на серпентинизација, потврдувајќи дека процесите на промена на масата и контрола на циркулацијата на течности по должината на структурите на фрактурата и од активните хидротермални услови. Многу помалиот дел од Лизардит се толкува како остаток од почетната фаза на статичка серпентинизација, која потоа била прекриена со прогресивно формирање на минералот Хризотил. Фазата идентификувана како алуминиум магнезиум железно оксид укажува на секундарни процеси на оксидација и рекристализација, што ја одразува мобилизацијата на Fe и Al за време на хидротермалната еволуција.

Оваа интеракција на оваа минералошка комбинација сугерира полифазна еволутивна активност што се случила, во која почетниот процес на серпентинизација бил проследен со последователни оксидативни процеси кои биле контролирани од структурите што го фаворизирале развојот на хризотил. Генерално, Примерокот 16 претставува серпентинска карпа со напреден азбестен минерален карактер и јасен доказ за комплексна интеракција помеѓу хидратацијата и циркулацијата на течности за време на процесите.



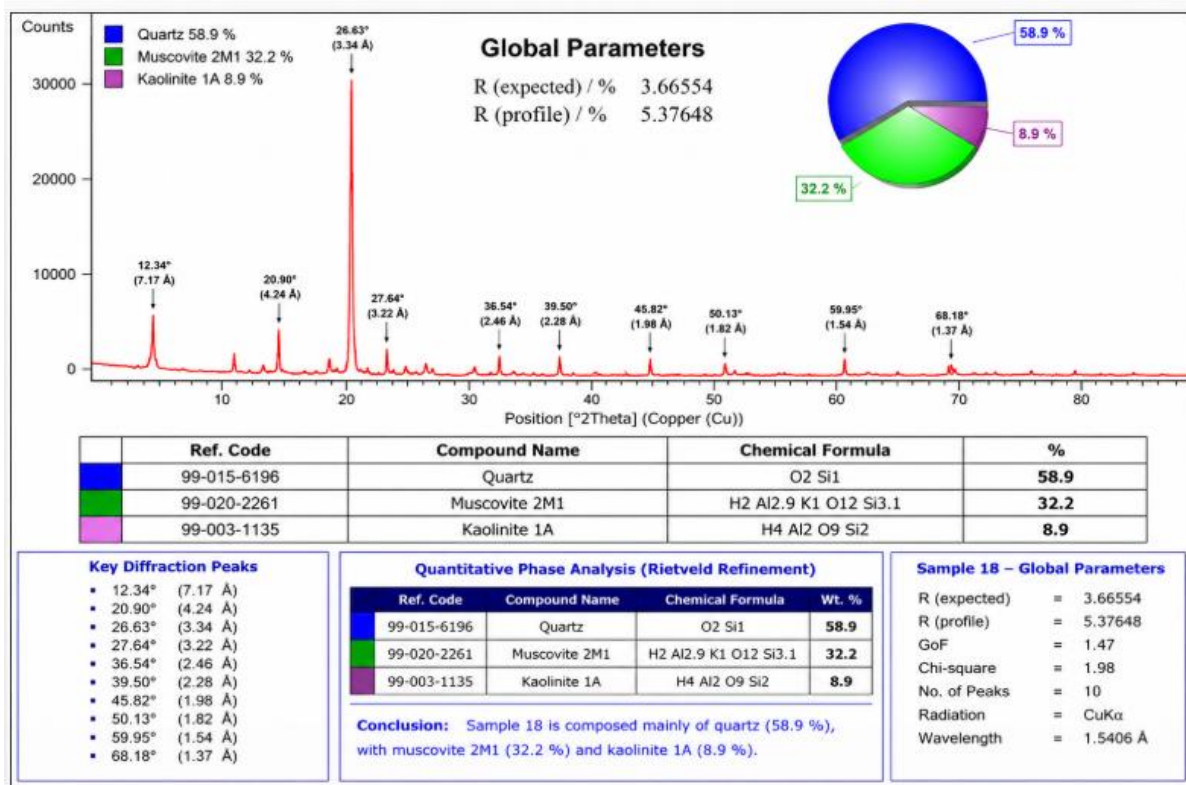
Слика 60. XRD дифрактограм на примерокот 17 кој ги илустрира идентификуваните минерални фази и нивните релативни пропорции.

Figure 60. XRD diffractogram of Sample 17 illustrating the identified mineral phases and their relative proportions.

XRPD анализата на примерокот 17 покажува минералоски состав во кој доминира форстерит со 77,1%, а е придружен со лизардит со 22,9%. Доминацијата на форстерит, како примарна минерална фаза на оливинот, укажува дека протолитот е ултрамафичен по потекло и дека серпентинизацијата е многу ограничена или се развила делумно и локализирана.

Присуството на лизардит во многу мал процент потврдува дека процесите на хидратација започнале, но останале нецелосни во примарната минералоска трансформација, иако промената се случила под релативно ниски температурни услови. Оваа врска на овие фази сугерира рана еволутивна фаза, каде што интеракцијата на карпестата маса и течната маса била ограничена и под хетерогени услови.

Севкупно, Примерокот 17 претставува релативно свежа ултрамафична карпа со мала и локализирана серпентинизација што одразува некои почетни фази на промена што се лучиле пред целосниот развој на доминантните серпентинитни фази.



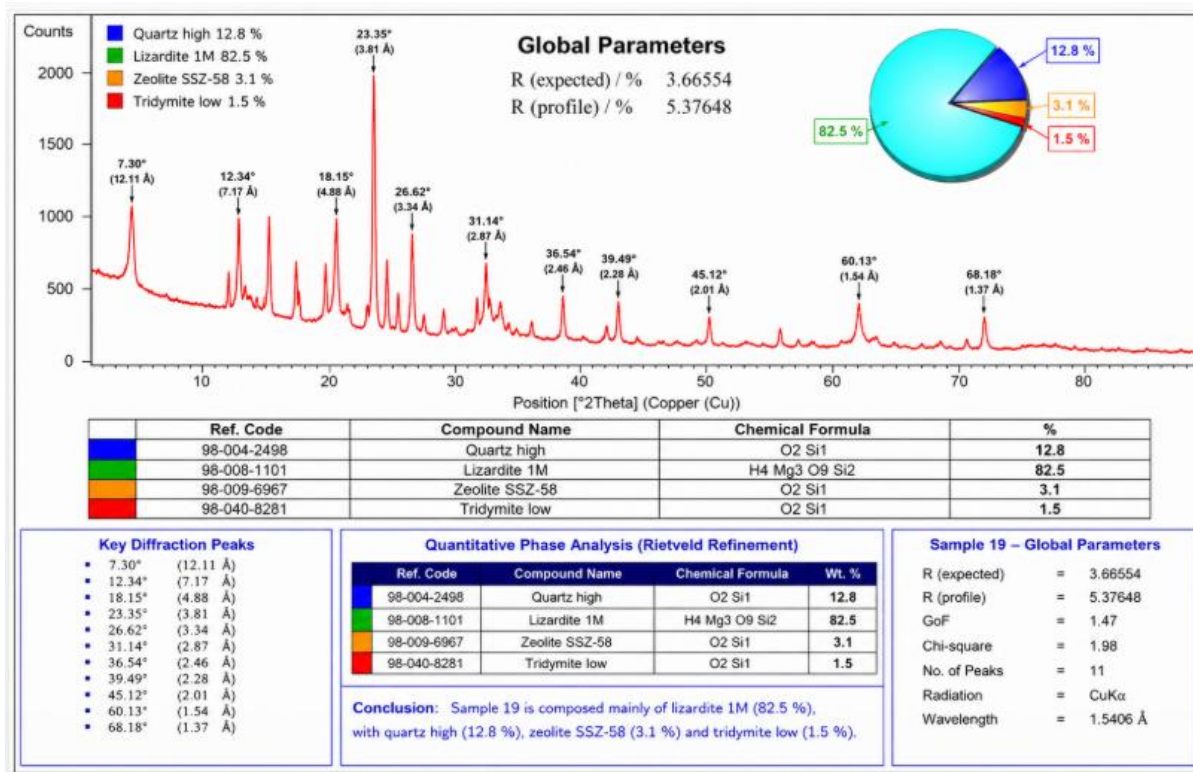
Слика 61. Шема на дифракција на X-зраци од Примерокот 18 што го истакнува идентификуваниот минерален состав и релативните фазни изобилства.
Figure 61. X-ray diffraction pattern of Sample 18 highlighting the identified mineral assemblage and relative phase abundances.

Примерокот 18, анализиран со XRPD, покажува сосема различен минералоски состав од претходните примероци, во овој примерок доминантен минерал е кварцот со 58,9%, придружен од мусковит 2M1 со 32,2% и каолинит 1A 8,9%. Доминацијата на кварцот укажува на висока содржина на силикатни елементи што сугерира протолит богат со силициум или напредна фаза на силицификација за време на хидротермалниот процес.

Присуството на мусковит ги одразува процесите на хидротермална алтерација како што е метаморфизмот со низок степен, во кој течностите фаворизираат формирање на алумосиликатни филосиликатни минерали, додека минералот каолинит претставува подоцнежна фаза на алтерација формирана на пониски температури и покисели услови, типични за средини и карпести маси кои претрпеле супергена алтерација.

Овој минералоски склоп покажува полифазна еволутивна историја, во која процесите на силицификација и хидротермалната алтерација имале секундарно влијание врз алтерацијата на глината. Параметрите на рафинирање (R-очекувано = 3,67% и R-профил = 5,38%) покажуваат многу добро совпаѓање

понеѓу пресметаниот модел и експерименталните податоци, потврдувајќи ја точноста и веродостојноста на идентификацијата на фазите. Генерално, овој примерок претставува материјал со изменет состав на глина и силно под влијание на хидротермални и супергени процеси за време на неговата минералозна еволуција.



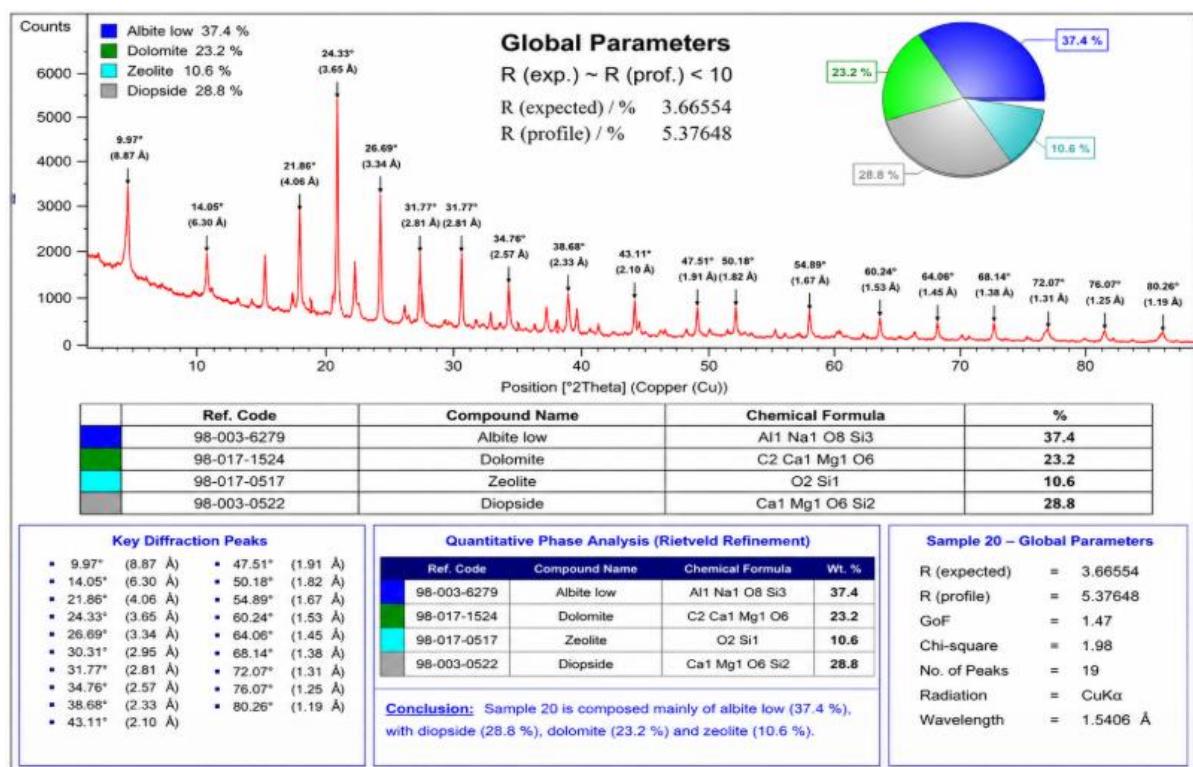
Слика 62. XRPD шема од примерокот 19 што го прикажува фазниот состав и полуколичитивната дистрибуција на идентификуваните минерали.
Figure 62. XRPD pattern of Sample 19 showing phase composition and semi-quantitative distribution of identified minerals.

Примерокот 19, анализиран со XRPD, покажува минералоски состав во кој доминира Лизардит 1М со 82,5%, каде што секундарниот минерал е кварц со 12,8%, додека зеолит SSZ-58 3,1% и последниот минерал претставен во овој примерок е тридимит со 1,5%, кој се појавил во траги. Доминацијата на Лизардит потврдува дека процесот на серпентинизација бил главниот фактор на промена што влијаел на ултрамафичниот протолит кој се развил на релативно ниски температури.

Присуството на кварц укажува на секундарна силициумска компонента, која е поврзана со процесите на силицификација, како и со циркулацијата на течности богати со Si во подоцнежните фази. Мали количини на зеолит и тридимит укажуваат дека хидротермалните фази во доцните фази и рекристализацијата

на силициумот ги одразуваат промените во хемијата на течностите за време на еволуцијата на системот.

Овој минералоски склоп укажува на полифазна еволутивна историја, во која доминантната серпентинизација била проследена со секундарни силикатни и хидротермални процеси.



Слика 63. Резултати од XRD за примерокот 20 кои ги илустрираат идентификуваните минерални фази и нивното релативно изобилство.

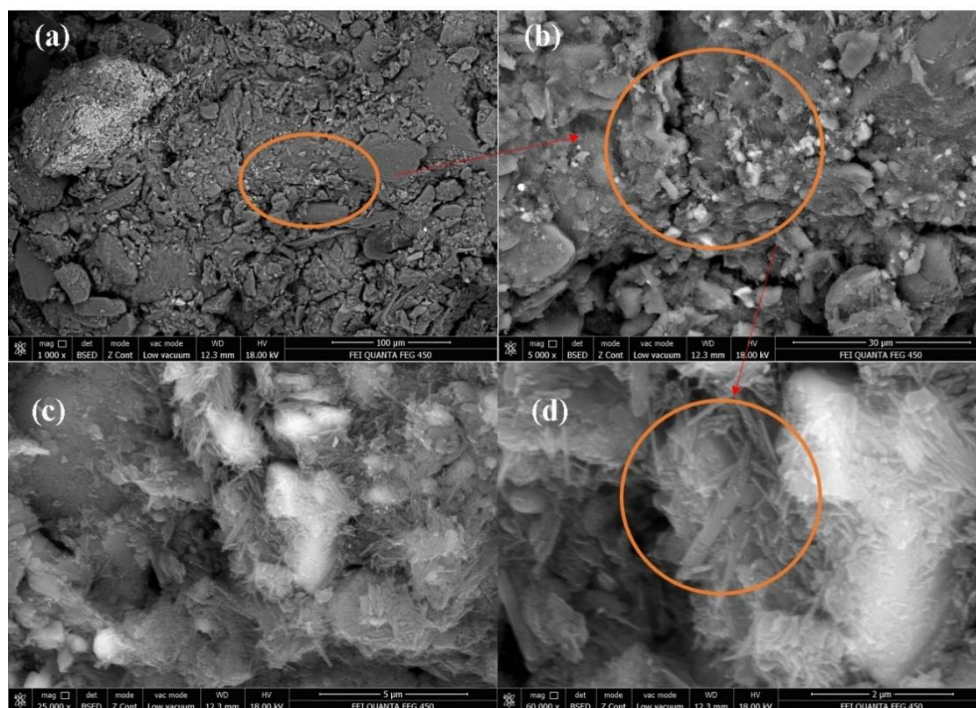
Figure 63. XRD results for Sample 20 illustrating the identified mineral phases and their relative abundances.

Примерокот 20, анализиран со XRPD, покажува хетероген минералоски состав доминиран од албит со 37,4%, проследен од диопсид со 28,8%, доломит со 23,2% и како помал минерал зеолит со 10,5%. Присуството на двата главни минерали албит и диопсид укажува на мафичен карбонатен силикат, потврдувајќи протолит и сосема поинаква средина од типичните ултрамафични серпентинити.

Присуството на диопсид укажува на кристализација под услови богати со Са и Mg, додека минералот доломит укажува на секундарни процеси на карбонизација поврзани со циркулацијата на течности богати со CO₂ за време на подоцнежните фази на хидротермалниот процес. Постоењето на зеолит укажува на дополнителна фаза на хидротермална промена под услови на ниска

температура, за време на која течностите се идентификувани како секундарни минерали во пори или зони на фрактури.

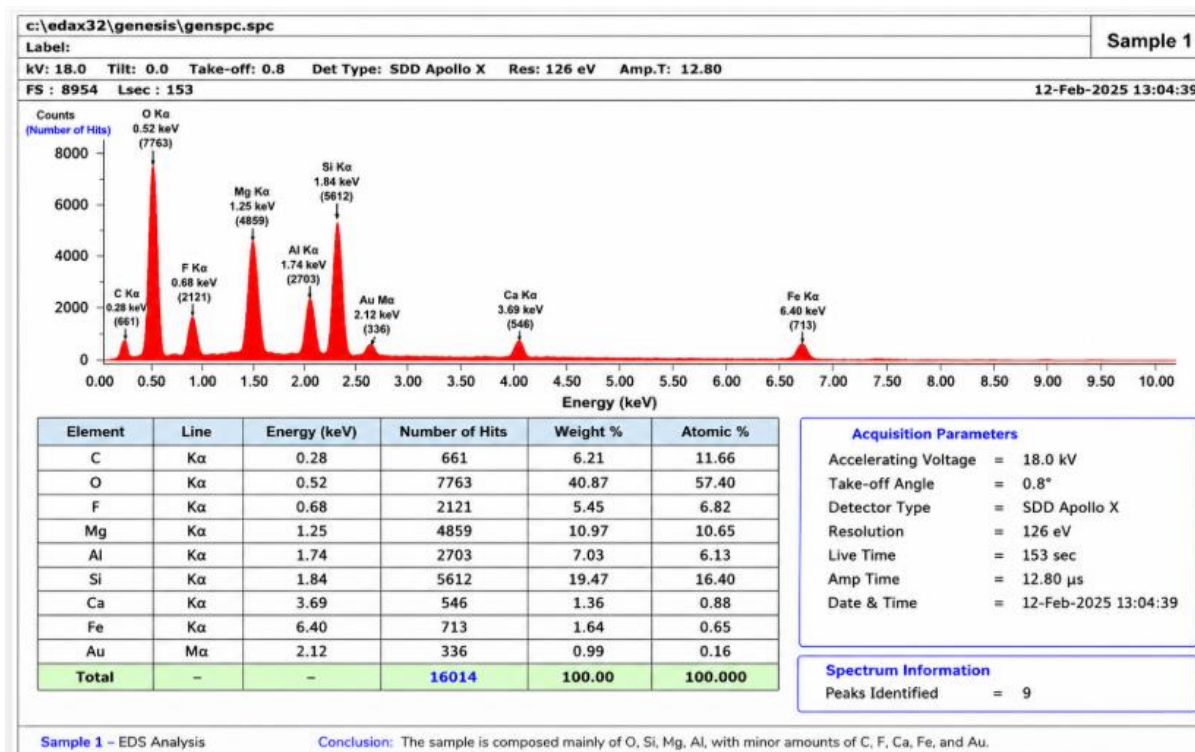
Оваа минералозна интеракција одразува полифазен процес што се случил во кој силикатните, карбонатните и хидротермалните процеси заеднички придонеле за сегашниот минерален состав. Генерално, Примерокот 20 претставува многу сложен минералозки систем, значително под влијание на метасоматската промена и карбонизацијата за време на неговата геохемиска еволуција.



Слика 64. SEM–EDX слики од примерокот 1 при различни зголемувања кои покажуваат микроструктурни карактеристики и минерална морфологија.
Figure 64. SEM–EDX images of Sample 1 at different magnifications showing microstructural features and mineral morphology.

Сликите од SEM прикажани на Слика 64 за Пример 1 се прикажани со прогресивно зголемување. На сликата (a) се забележува општ поглед на материјалот, каде што се идентификуваат честички со различни големини и форми, што ја одразува морфолошката хетерогеност на примерокот, како и минералните агрегати. На сликата (b), направена со поголемо зголемување од 30 µm, се откриваат области со покомпактни структури, заедно со други кои изгледаат попорозни или во изменети форми. Анализите со уште поголеми зголемувања, особено на 5 µm и 2 µm како што е прикажано на сликите (в) и (г), овозможуваат подетално толкување на површинската микроструктура на примерокот. На овие слики, можеме да разликуваме присуство на кристали со

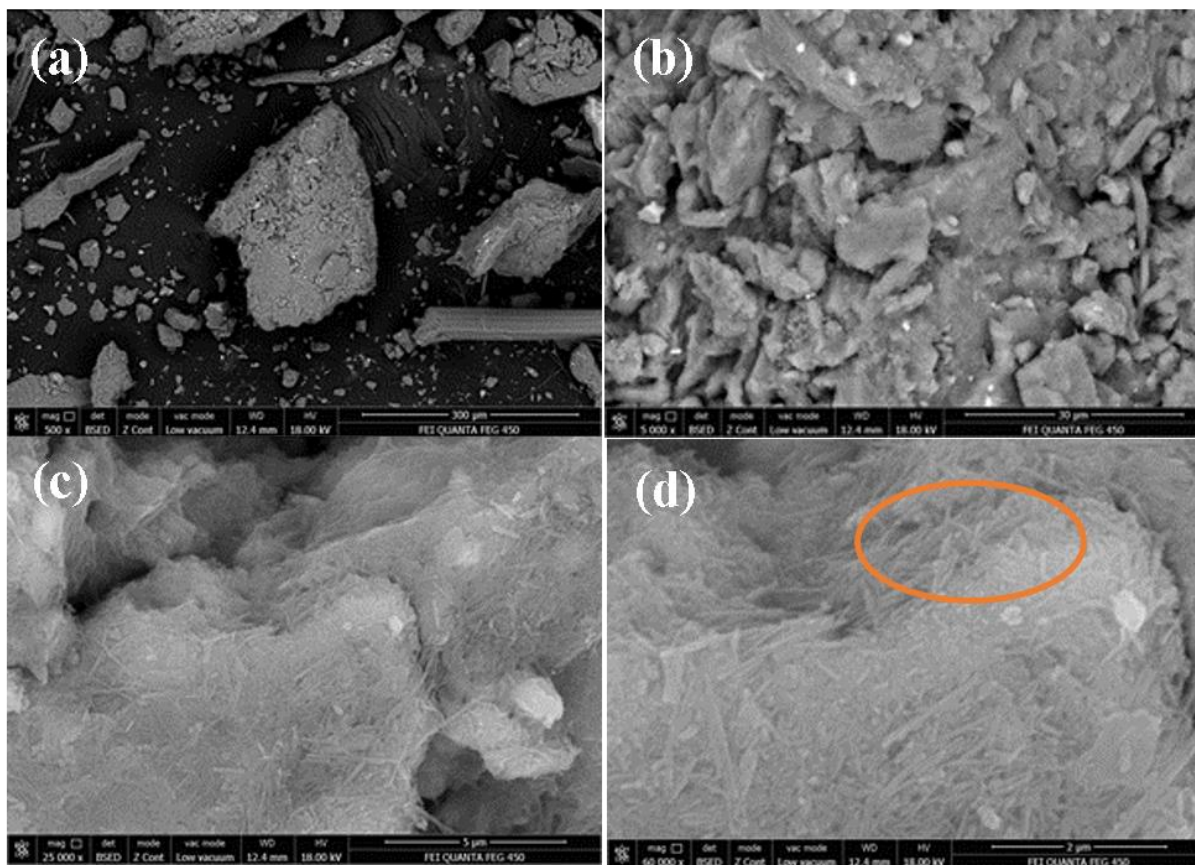
влакнести и зрачни морфологии, организирани во микрокристални снопови. Имено, на панелот (г), во рамките на означениот регион, се идентификуваат тенки и издолжени иламентозни структури, кои се карактеристични за фиброзните минерални фази.



Слика 65. Спектарот SEM–EDS од примерокот 1 покажува елементарен состав и карактеристични врвови.
Figure 65. SEM–EDS spectrum of Sample 1 showing elemental composition and characteristic peaks.

Слика 65 ги прикажува изразените врвови на силициум (Si) и магнезиум (Mg), што јасно укажува дека минералната матрица е богата со магнезиум силикати, типични за серпентинската група или ултрамафичните минерали изменети со секундарни процеси. Присуството на алуминиум (Al) сугерира придонеси од алумосиликатни фази, во некои случаи изоморфни супституции во кристалната решетка на серпентинските минерали. Послабите сигнали на калциум (Ca) и железо (Fe) укажуваат на елементи во трагови или дисперзирани секундарни фази, кои можат да бидат поврзани со карбонатни минерали, железни оксиди или производи на хидротермална промена. Сигналот за нискојаглеродно (C) злато (Au) кој е поврзан во речиси сите примероци доаѓа како јаглероден премаз

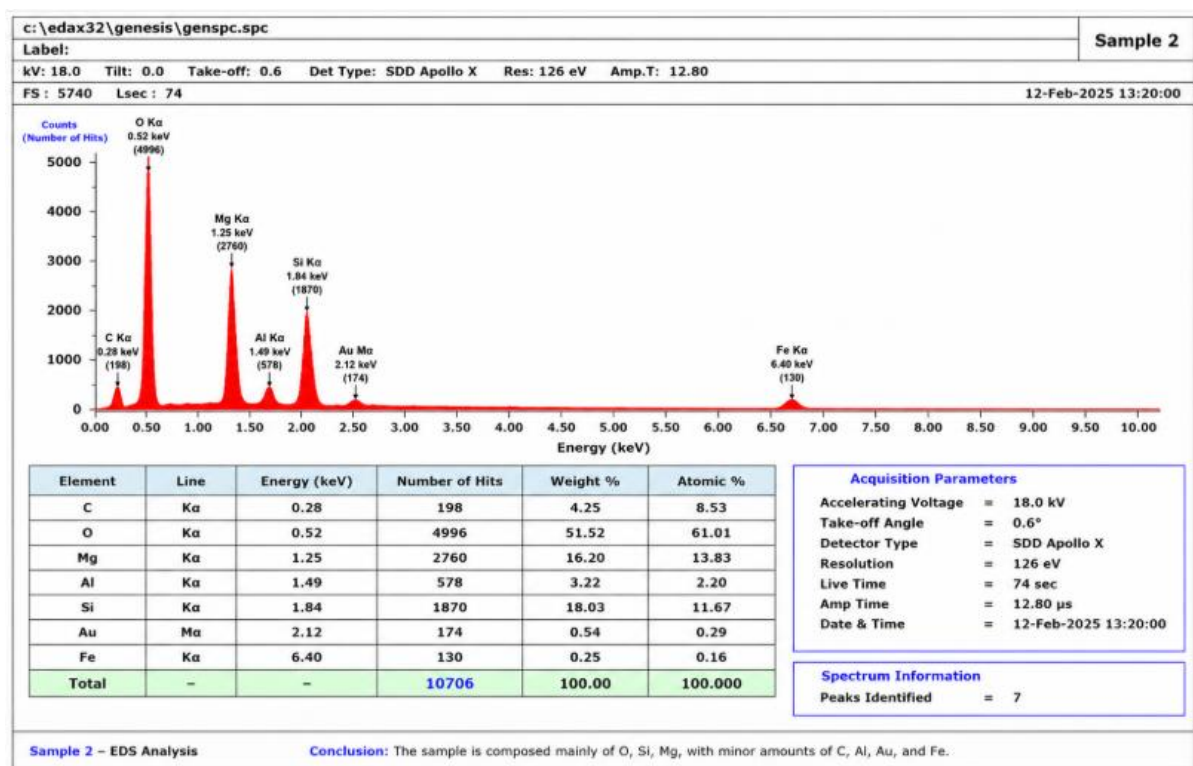
нанесен за спроводливост за време на SEM анализата или присуство на секундарни карбонатни фази.



Слика 66. SEM–EDX микрографи од примерокот 2 кои ја илустрираат текстуалната варијабилност и микроструктурните карактеристики при различни зголемувања.
Figure 66. SEM–EDX micrographs of Sample 2 illustrating textural variability and microstructural features at different magnifications.

Слика 66 прикажува SEM слики од Пример 2 кои покажуваат јасна морфолошка еволуција од макроскопската структура на агрегатот до микрокристална организација, што го одразува сложениот процес на процеси за време на минералошката промена. На сликата (а), зголемена за 500×, видлив е општиот изглед на примерокот, каде што морфологијата покажува материјал со скршена текстура и минерални агрегати составени од различни кристални фази. На сликата (б), со зголемена за 5000×, површинската структура станува повидлива и покажува грануларна ламеларна текстура која е составена од мали и рамни кристали распоредени во густе кластери. Ова укажува на процес на секундарна рекристализација за време на хидротермална промена, во кој случај минералите се формираат во меѓугрануларни простори, како и по должината на микрофрактури. На сликата (в), на 25.000×, јасно се идентификуваат влакнести

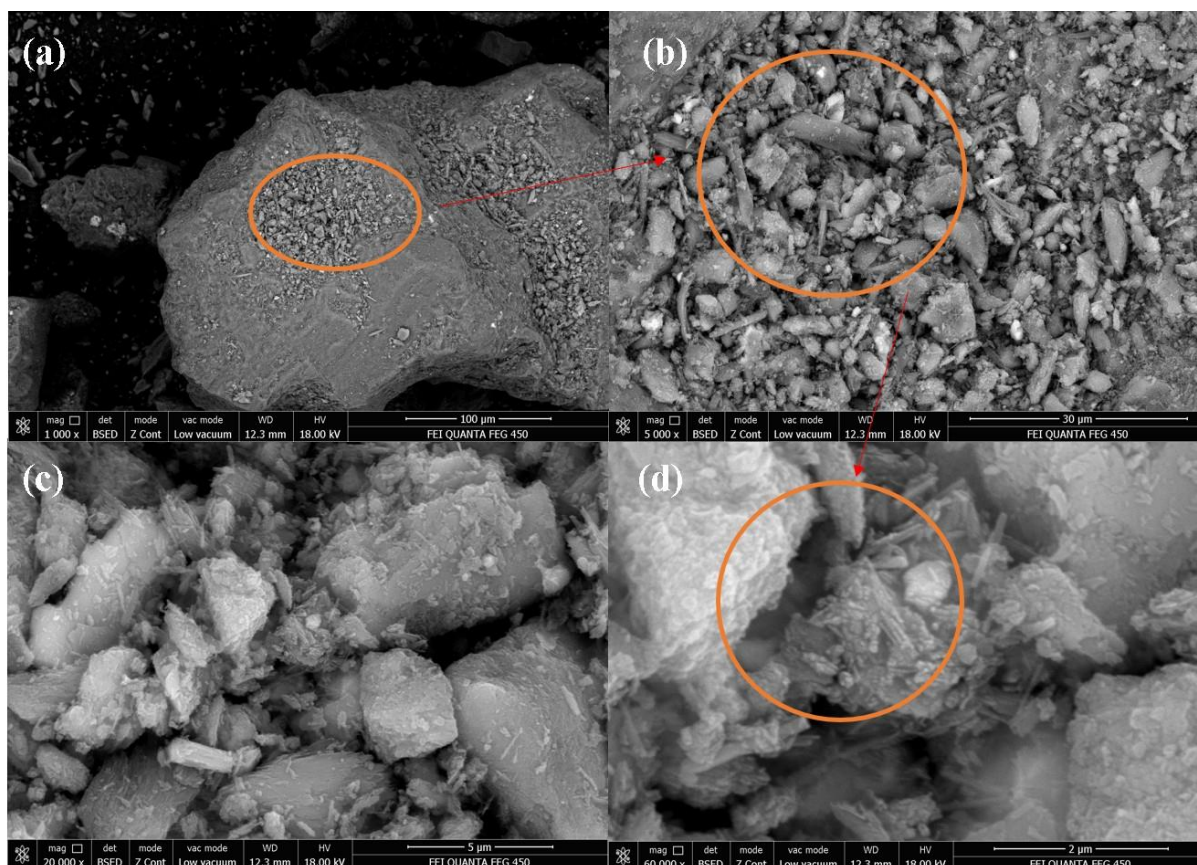
агрегати, што укажува на ориентиран раст на кристалите и напредна фаза на минералошка трансформација. Сликата (г), при многу големо зголемување од 60.000×, открива пофини микроморфолошки детали. Зголемената површина покажува фини, издолжени структури во паралелно распоредени влакнести форми, кои се карактеристични за минерали со азбестна структура. Накратко, Примерокот 2 поминал низ повеќестепени процеси на промена, во кои оригиналната текстура е модифицирана со хидратација, рекристализација и раст на влакнести минерални структури.



Слика 67. Спектарот на EDS од примерокот 2 кој ја истакнува елементарната дистрибуција и карактеристичните врвови.

Figure 67. EDS spectrum of Sample 2 highlighting elemental distribution and characteristic peaks.

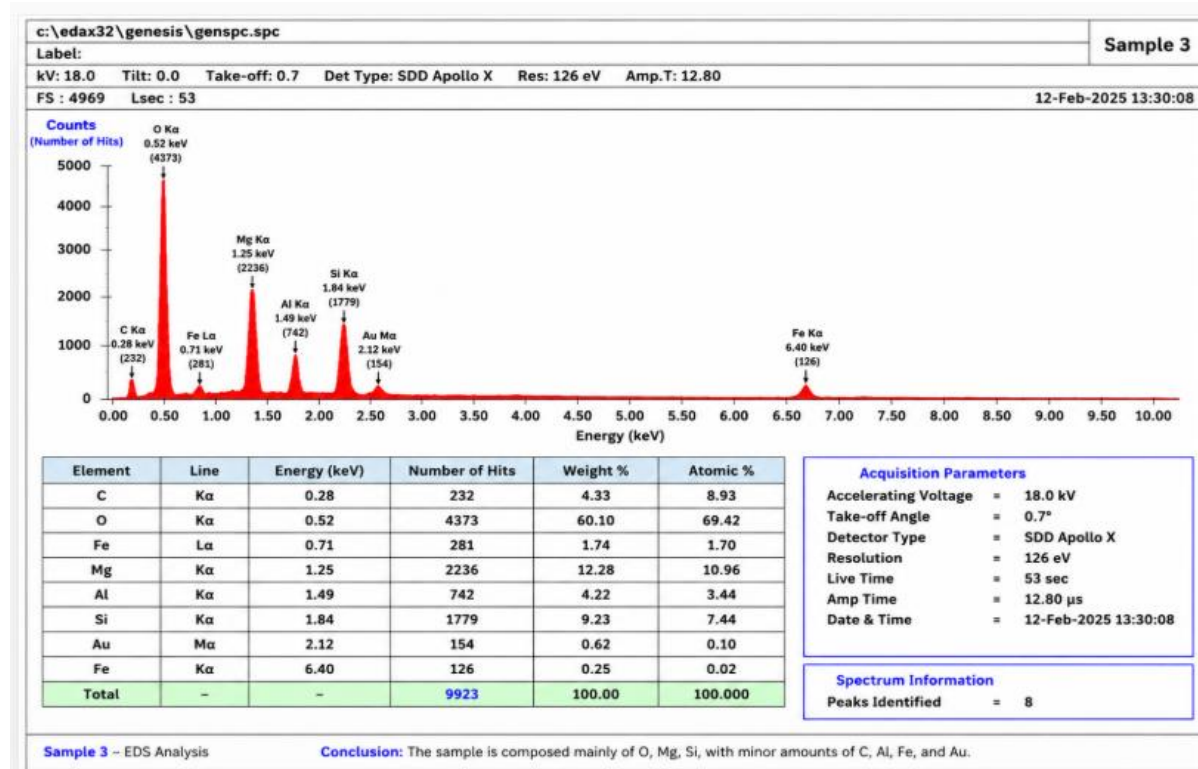
EDS спектарот снимен за Пример 2 го покажува елементарниот состав на сликата, кој е јасно доминиран од кислород (O), проследен со врв на магнезиум (Mg) и силициум (Si), потврдувајќи ја претежно магнезиум силикатната природа. Релативно нискиот интензитет на алуминиумот (Al) сугерира присуство на секундарни алумосиликатни фази или изоморфни супституции во кристалната структура на главните минерали. Слабиот сигнал на железото (Fe) покажува дека овој елемент е присутен само во мали количини, веројатно како трага од компонента добиена од дисперзирани оксидни фази. Генерално, овој спектар потврдува состав во кој доминираат силикатни и магнезиумски елементи, со ниски концентрации на тешки метални елементи, што претставува ултрамафичен или серпентинитен материјал изменет за време на примарните и секундарните фази.



Слика 68. SEM–EDX микрографи од Примерокот 3 кои прикажуваат хетерогени текстури и микроструктурни карактеристики на различни зголемувања.
Figure 68. SEM–EDX micrographs of Sample 3 showing heterogeneous textures and microstructural features across different magnifications.

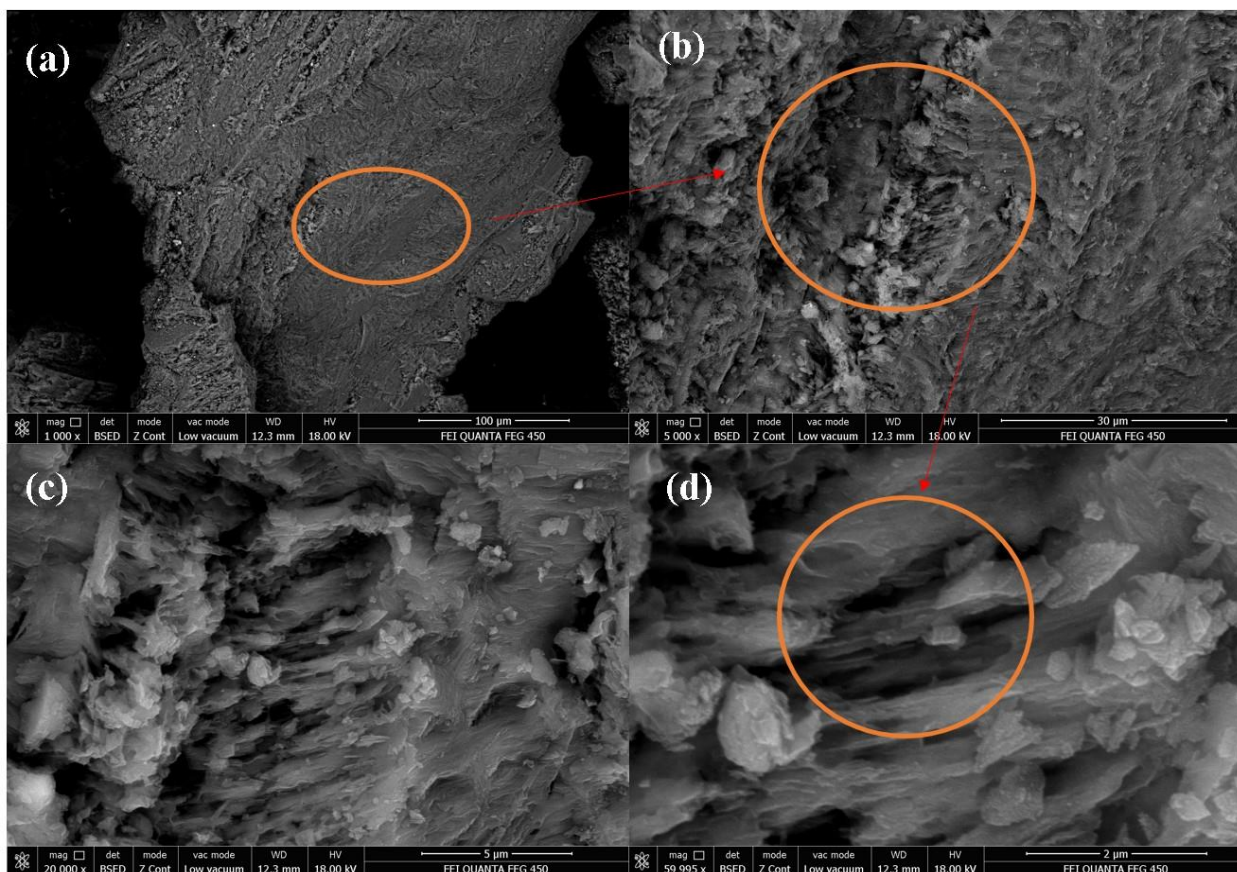
Слика 68 покажува дека Примерокот 3 покажува нехомогена структура која е полиморфна и претставува многу сложена слика на минералозна промена. На сликата (а), општите погледи се јасни и видливи каде што имаме области со нееднаква дистрибуција на секундарни честички кои се забележани низ целата површина. При зголемување (б) се забележува структурата на оваа област каде што се открива дека се состои од фини кристални агрегати со субаголна и ламеларна морфологија, групирани и густы. Овие карактеристики укажуваат на секундарна фаза на промена за време на хидротермалниот или процесот на серпентинизација. Фотографијата (в) ја открива грануларната структура на материјалот во која честичките се појавуваат на површината во повремени и неразлични меѓугрануларни контакти, што ја одразува прогресивната хемиска промена што се случила. При поголемо зголемување (г), во рамките на областа опкружена со портокалова боја, идентификуваме издолжени и рамни

микроструктури, кои се организирани во густ агрегати и во форма на кристални решетки контролирани од микропукнатински структури.



Слика 69. Спектарот на EDS од примерокот 3 кој го прикажува елементарниот состав и дистрибуцијата на интензитетот на откриените елементи.
Figure 69. EDS spectrum of Sample 3 showing elemental composition and intensity distribution of detected elements.

Слика 69 го прикажува EDS спектарот на Пример 3, кој го прикажува типичниот елементарен состав на изменет магнезиум силикатен материјал каде што доминацијата на кислород (O) достигнува врвови, проследено со високи интензитети на магнезиум (Mg) и силициум (Si), потврдува дека минералната матрица во овој примерок е главно составена од магнезиум силикатни фази. Умерениот интензитет на алуминиум (Al) укажува на присуство на секундарни фази на алумино силикатен кој е присутен во кристалните структури на серпентинските минерали. Присуството на железо (Fe) на ниски нивоа може да укажува дека имаме мало присуство на железо или доаѓа како процес на оксидација која е распределена на површината. Јаглеродот (C) и златото (Au) се поврзани со облогата која е нанесена на примерокот за употреба во SEM анализа и немаат геолошко значење.



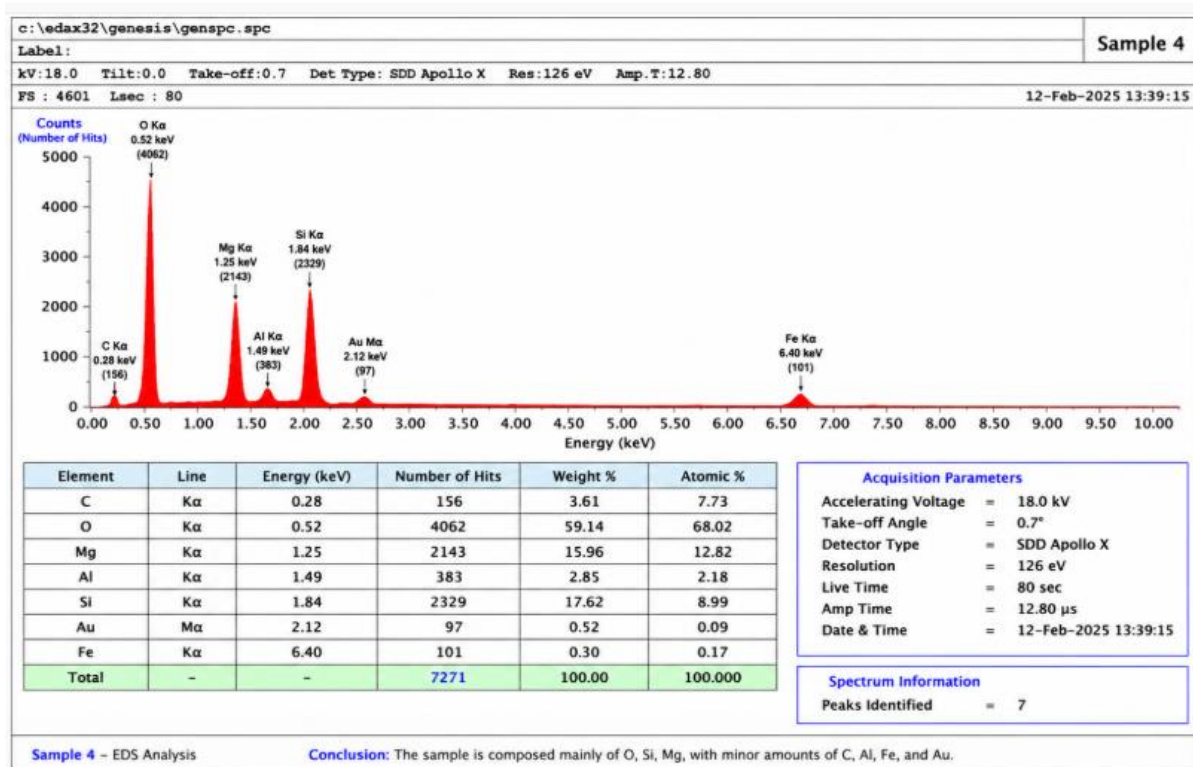
Слика 70. SEM–EDX микрографи од Примерокот 4 кои ги истакнуваат текстуалните карактеристики и микроструктурните варијации при различни зголемувања.
Figure 70. SEM–EDX micrographs of Sample 4 highlighting textural features and microstructural variations at different magnifications.

Сликите од SEM на Примерокот 4 покажуваат јасна текстуална еволуција од макроскопска структура до микроморфолошка организација на кристалите. На сликата (а) се забележува општиот изглед на фрагментот од карпата, покажувајќи компактна површина. При поголемо зголемување во панелот (б), се гледа дека оваа слика се состои од агрегати кои се густи во микрокристална форма со ламеларна и фиброзна морфологија, што укажува на секундарна рекристализација по должината на микрофрактури кои се појавиле.

Сликата (в) го покажува развојот на структури кои се ориентирани паралелно, што укажува на структурна контрола која влијаела на кристалната маса, додека панелот (г) ги прикажува издолжените елементи составени од влакнести плочи распоредени во снопови како агрегати.

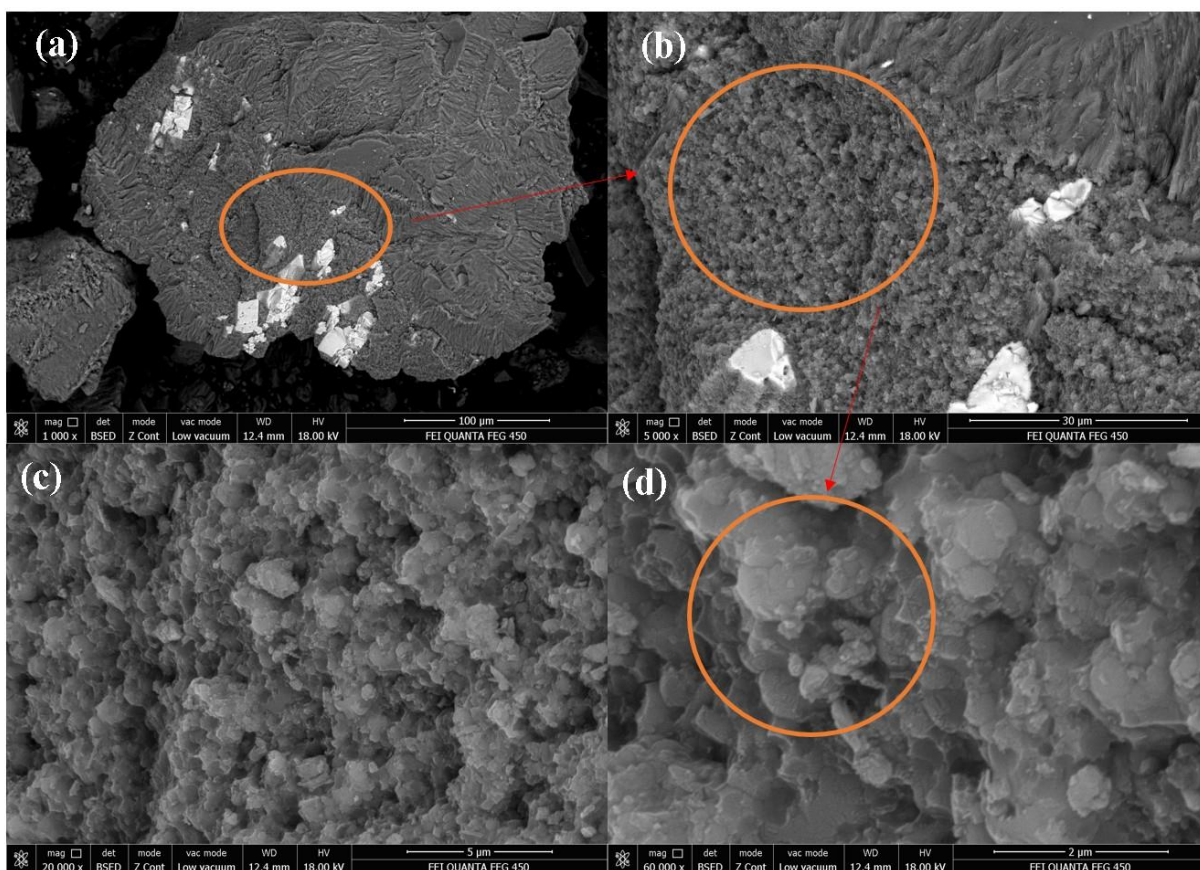
Овие структури се карактеристични за фиброзните и ламеларните фази на серпентинитите, кои обично се формираат за време на процесите на хидратација и хидротермалната промена, кои процеси можат да влијаат на

ултрамафичен протолит. Овие структури се карактеристични за фиброзните и ламеларните фази на серпентинитите, кои обично се формираат за време на процесите на хидратација и хидротермалната промена, кои процеси можат да влијаат на ултрамафичен протолит.



Слика 71. SEM-EDS елементарен состав на примерокот 4
Figure 71. SEM-EDS elemental composition of Sample 4.

EDS спектарот на примерокот 4 покажува елементарен состав доминиран од кислород (O), со силни врвови на магнезиум (Mg) и силициум (Si), потврдувајќи ја претежно магнезиум силикатна природа на материјалот. Присуството на слаб алуминиумски (Al) сигнал укажува на секундарни алумосиликатни фази или изоморфни супституции во кристалната структура, додека малиот сигнал од железо (Fe) одразува концентрации во траги. Сигналите од јаглерод (C) и злато (Au) се поврзани со спроводливите премази нанесени на примерокот за SEM анализа. Накратко, овој спектар, поткрепен со морфолошкото толкување, укажува дека примерокот претставува серпентинизиран ултрамафичен материјал со типичен состав на магнезиум силикат и без докази за значајна минерализација на металот.

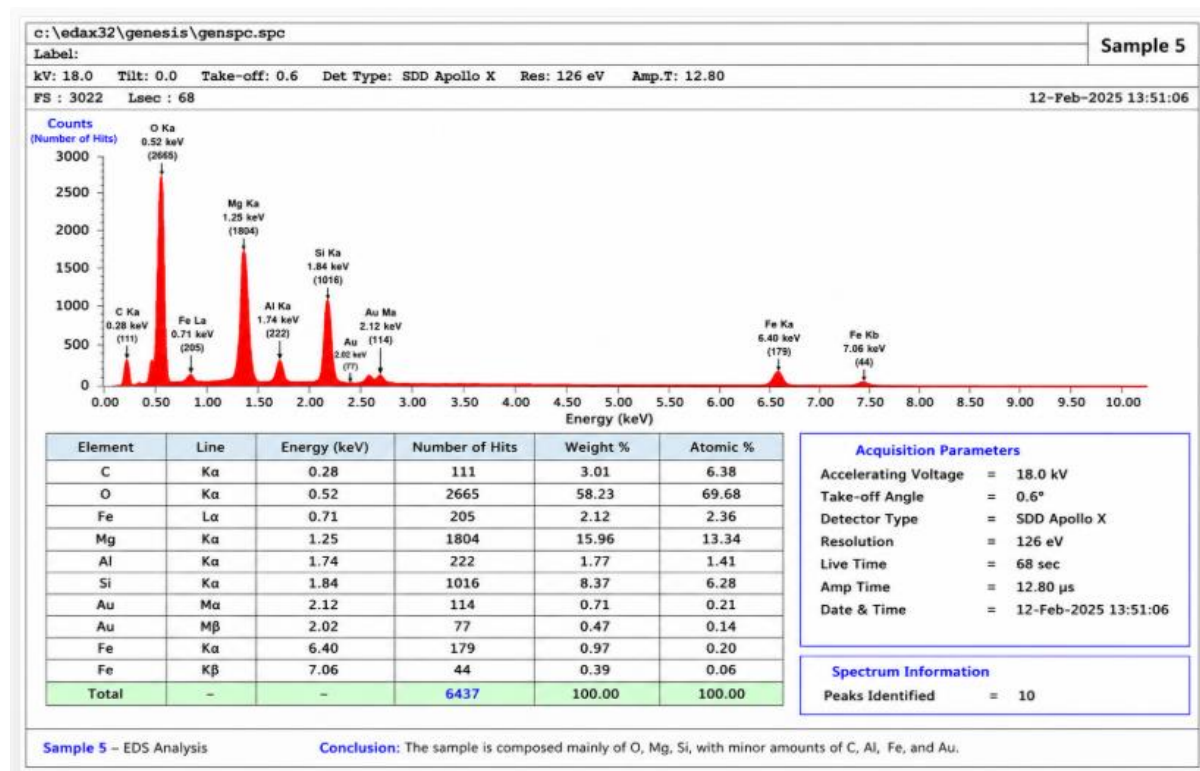


Слика 72. SEM–EDX микрографи од Примерокот 5 кои прикажуваат повеќефазни текстури и
 fino зрнести микроструктурни карактеристики со различни зголемувања.

Figure 72. SEM–EDX micrographs of Sample 5 depicting multiphase textures and fine-grained
 microstructural features at varying magnifications.

Примерокот 5 открива повеќефазна структура каде што неговото тело ја покажува својата хетерогеност што одразува интензивни процеси на минералозна алтерација. На сликата (а), при помало зголемување, може да се види фрактура на карпа со релативно компактна површина, каде што може да се разликуваат области, како и расфрлани секундарни наслаги, идентификувани како полесни и пофини агрегати во споредба со околната матрица. На сликата (б) каде што зголемувањето е поголемо, можеме да видиме дека оваа структура се состои од фини грануларни честички составени од микрокристали кои се густо спакувани и хаотично распоредени, што потврдува дека се случил целиот процес на рекристализација. Панелот (в) открива сфероидни до субглобуларни морфологии на микрокристални честички кои се типични својства на секундарната фаза формирана под хидротермални услови и за време на прогресивна хемиска алтерација. На панелот (г), во обележаниот регион, се забележуваат јасно видливи кристални честички со заоблени форми и многу

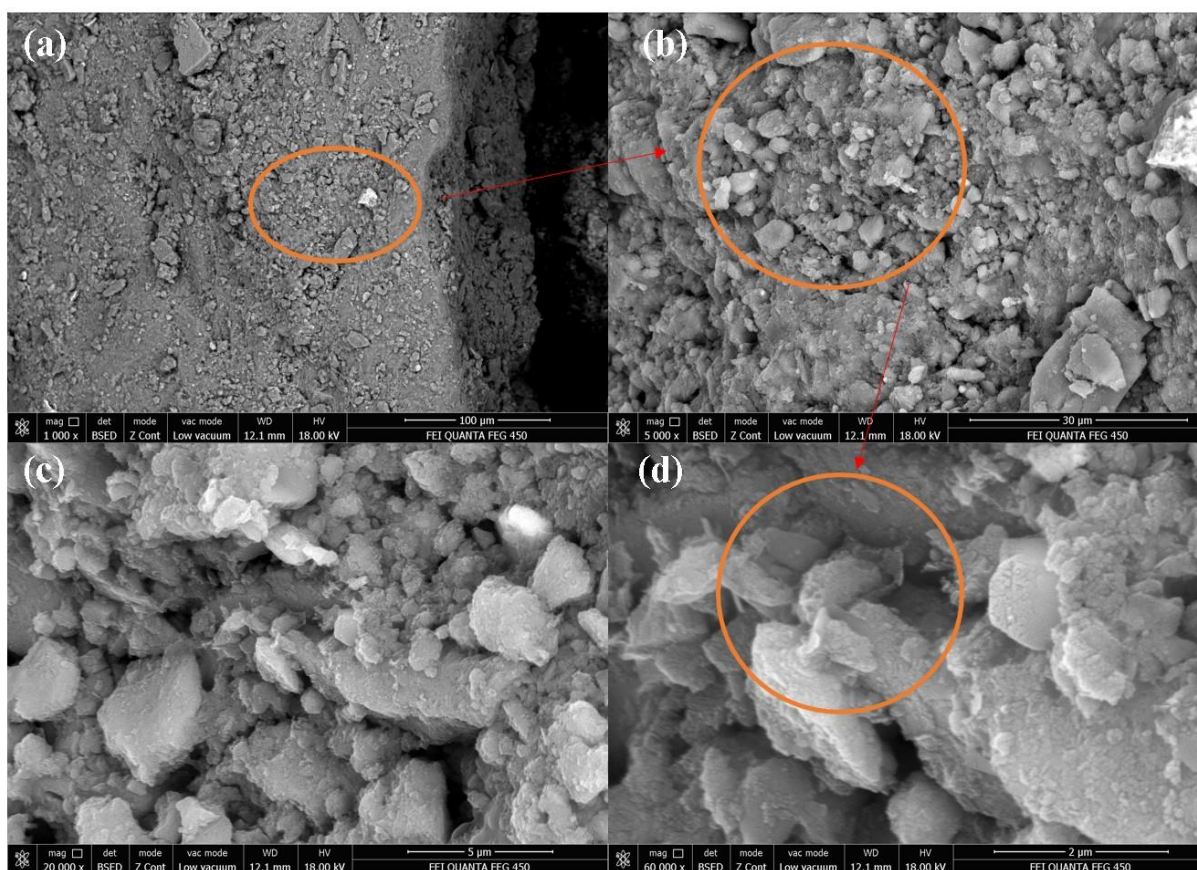
компактни структури, што укажува на раст на кристали контролиран од меѓугрануларни простори или микропразнини. Генерално, морфологијата на овој примерок, како што се гледа од SEM сликите, сугерира изменет материјал со секундарна микроструктурна развиена за време на процесите на рекристализација.



Слика 73. SEM-EDS спектар на примерок 5 кој го илустрира елементарниот состав и дистрибуцијата на откриените елементи.

Figure 73. SEM-EDS spectrum of Sample 5 illustrating elemental composition and distribution of detected elements.

EDS спектарот на примерокот 5 покажува елементарен состав доминиран од кислород (O), кој е придружен со големи врвови на магнезиум (Mg) и силициум (Si), што укажува дека примерокот е составен од магнезиум силикатни материјали. Оваа елементарна комбинација е карактеристична за серпентинските минерали или ултрамафичните карпи. Присуството на слаби сигнали од железо (Fe) сугерира концентрации во траги или некои секундарни фази на оксидација дисперзирани во примерокот, додека малиот алуминиумски (Al) сигнал укажува на ограничен придонес од алумосиликатните фази. Како и во другите примероци, јаглеродот (C) и златото (Au) обично се поврзуваат со спроводливи или заштитни премази нанесени за време на подготовката на аналитичкиот примерок.



Слика 74. SEM–EDX микрографи од Примерокот 6 кои илустрираат грануларни текстури и микроструктурна хетерогеност при повеќекратни зголемувања.

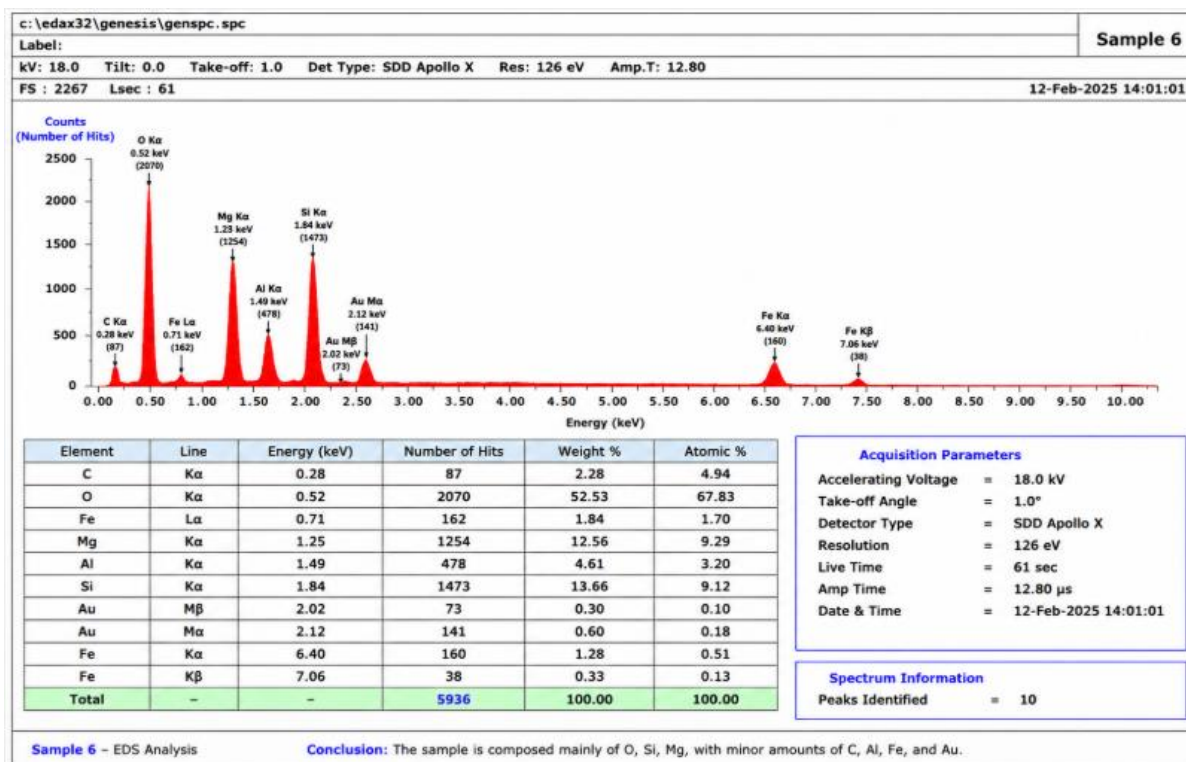
Figure 74. SEM–EDX micrographs of Sample 6 illustrating granular textures and microstructural heterogeneity at multiple magnifications.

Сликите од SEM на примерокот 6 покажуваат фрагментирани и микрокристални сегменти кои рефлектираат изменет материјал со хетерогена структура. На сликата (а) каде што зголемувањето е ниско, површината на фрагментот покажува нерамномерна дистрибуција на честички и микроагрегати, каде што обележаните области претставуваат сектор со поголема концентрација на секундарни производи. На сликата (б), каде што зголемувањето е зголемено, претставени се грануларни структури составени од мали субаголни и рамни кристали распоредени во густе кластери, што демонстрира рекристализација за време на процесот на алтерација.

Сликата (в) прикажува микрокристални агрегати во различни форми каде што контактите се нејасни и меѓугрануларни, карактеристични за материјали кои претрпеле хемиски и структурни трансформации. На сликата (г) се идентификуваат опкружената површина, ориентирани и плочести и ламеларни

кристали, разликувајќи ги кристалите контролирани од меѓугрануларни простори или микрофрактури.

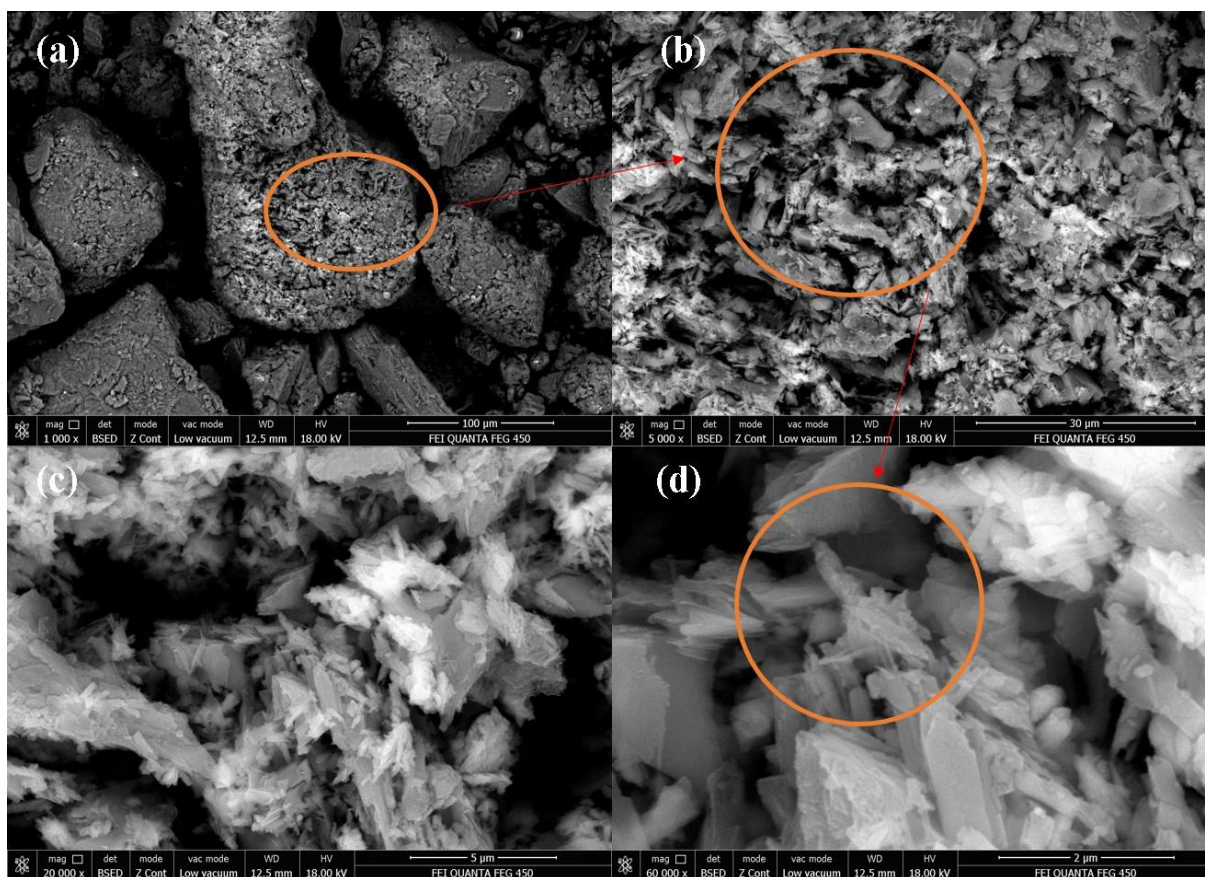
Општо земено, оваа морфологија во SEM ни покажува серпентинизиран материјал со изразен развој на секундарни микрокристални фази.



Слика 75. Спектарот на EDS од примерокот 6 кој го истакнува елементарниот состав и интензитетот на карактеристичните врвови.

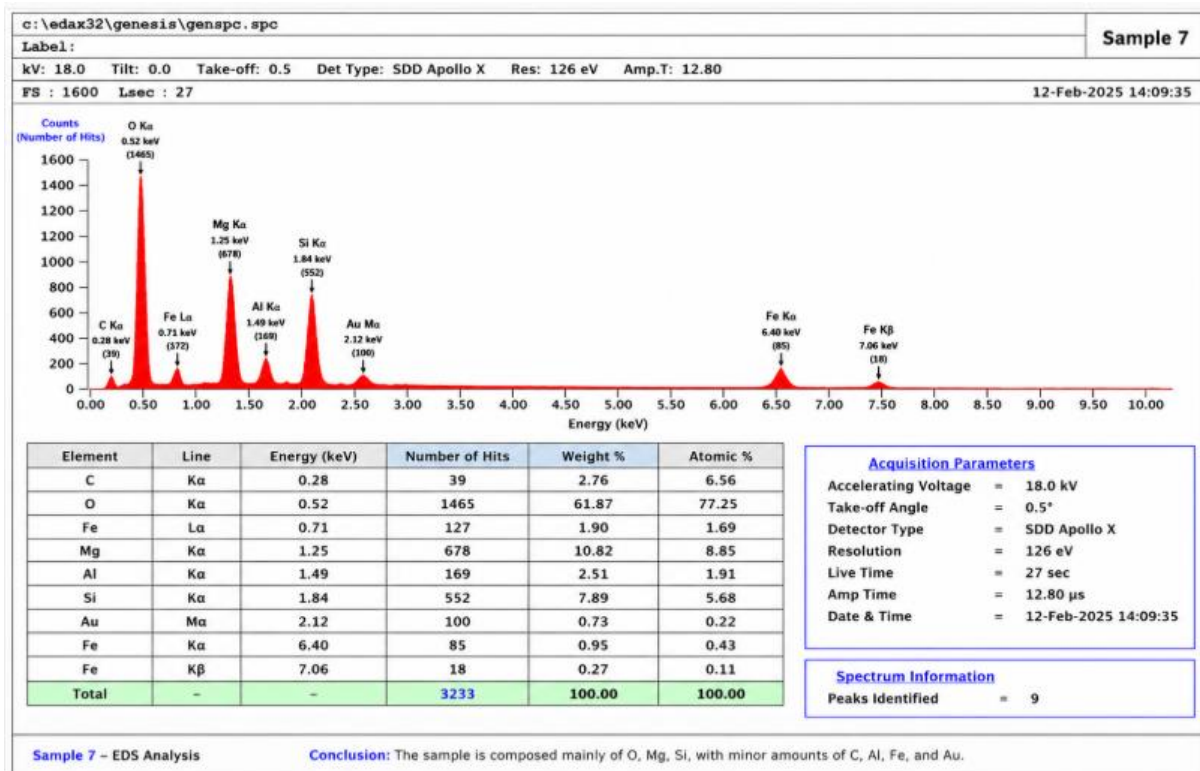
Figure 75. EDS spectrum of Sample 6 highlighting elemental composition and intensity of characteristic peaks.

EDS спектарот на овој примерок 6 е доминиран од кислород (O) и придружен со силни врвови на магнезиум (Mg) и силициум (Si), што укажува на типичен состав на магнезиум силикатни материјали. Слабите сигнали на железо (Fe) сугерираат дека постојат траги од овој елемент, можеби присутни како структурна компонента или како дисперзирани секундарни оксидни фази. Сигналот со низок интензитет на алуминиум (Al) укажува на индикатор за алумосиликатни фази. Накратко, елементарниот спектар ја поддржува морфолошката интерпретација и потврдува дека примерокот претставува ултрамафична арпа која е изменета со состав главно од магнезиум силикати и секундарни фази формирани за време на хидротермални процеси.



Слика 76. SEM–EDX микрографи од Примерокот 7 кои прикажуваат влакнести и ламеларни микроструктури на различни зголемувања.
Figure 76. SEM–EDX micrographs of Sample 7 showing fibrous and lamellar microstructures across different magnifications.

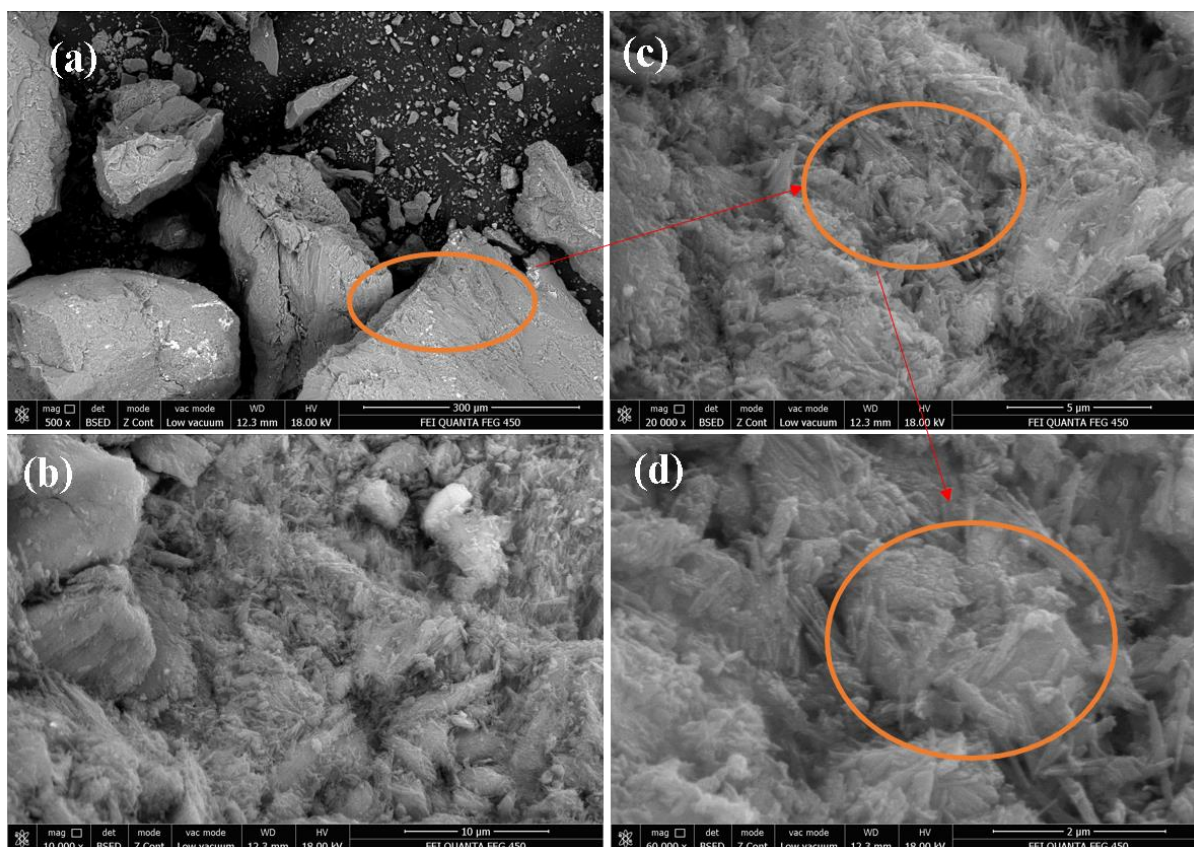
Сликите од SEM на примерокот 7 покажуваат високо развиена микрокристална и фибро-ламеларна структура кои се карактеристични за интензивно изменет материјал. На сликата (а), општиот поглед покажува фрагменти од карпа со груби површини покриени со секундарни агрегати, каде што означената област претставува сектор со висока концентрација на производи за рекристализација. При поголемо зголемување на сликата (б), оваа област се појавува како акумулација на мали кристали кои имаат неправилна ламеларна морфологија. Сликата (в) покажува присуство на фини влакнести и зрачни структури распоредени во снопови, типични за серпентински минерали. На сликата (г), во заокружената област, се забележуваат кристали со издолжени и паралелно ориентирани влакнести врвови, што укажува на раст на кристалите контролиран од микро-фрактуре. Генерално, морфологијата на SEM покажува материјал со полифазна структура и напреден развој на влакнести секундарни фази, карактеристичен за процесите на серпентинизација.



Слика 77. Спектарот на EDS од примерокот 7 кој го прикажува елементарниот состав и дистрибуцијата на откриените елементи.
Figure 77. EDS spectrum of Sample 7 showing elemental composition and distribution of detected elements.

Спектарот на EDS покажува елементарен состав во кој доминира кислород (O), со значителни количини на магнезиум (Mg) и силициум (Si), што потврдува дека примерокот има типичен состав на магнезиум силикат. Присуството на слаби сигнали од железо (Fe) сугерира концентрации во траги, што може да одразува и секундарни фази на оксидација.

Сигналите од јаглерод (C) и злато (Au) обично се поврзуваат со спроводливи премази и процедури за аналитичка подготовка што се користат за овој метод, затоа, присуството на овие елементи не е геохемиски значајно.



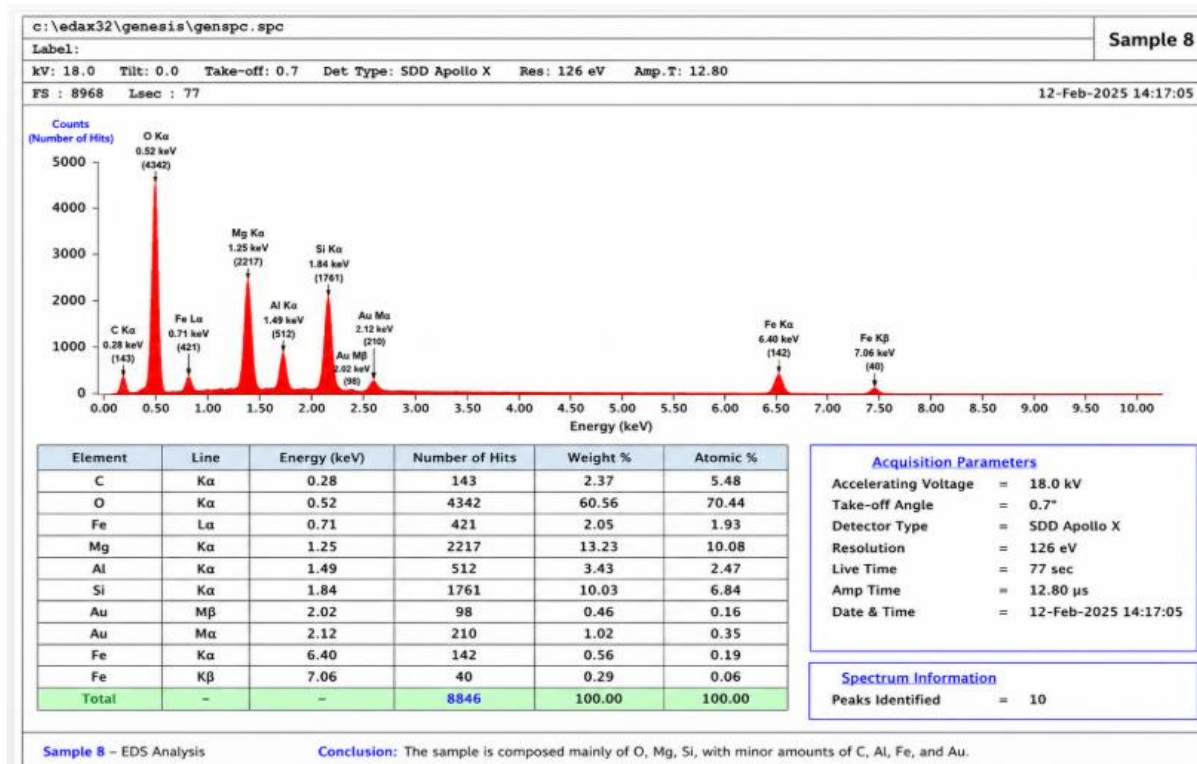
Слика 78. SEM–EDX микрографи од примерокот 8 кои илустрираат сложени повеќефазни текстури и влакнести микроструктури при зголемени зголемувања.
 Figure 78. SEM–EDX micrographs of Sample 8 illustrating complex multiphase textures and fibrous microstructures at increasing magnifications.

Сликите од SEM на Примерокот 8 покажуваат многу сложена и повеќефазна структура што ги одразува напредните процеси на минералошко менување. На сликата (а), при зголемување од 500×, општиот изглед на примерокот претставува хетерогена морфологија и дистрибуција на честички каде што големината е различна, што укажува на агрегатниот состав на материјалот.

На сликата (б), при зголемување од 10.000×, каде што се појавуваат области со густа микроструктурна структура кои се организирани во влакнести и ламеларни форми. При поголеми зголемувања на сликите (в) и (г) се забележуваат издолжени структури и снопови составени од влакнест материјал кои се ориентирани, типични за минерали кои покажуваат азбестни карактеристики.

Оваа микроморфолошка промена укажува дека влакнестите фази на Примерокот 8 можеби се формирале под различни физичкохемиски услови, каде

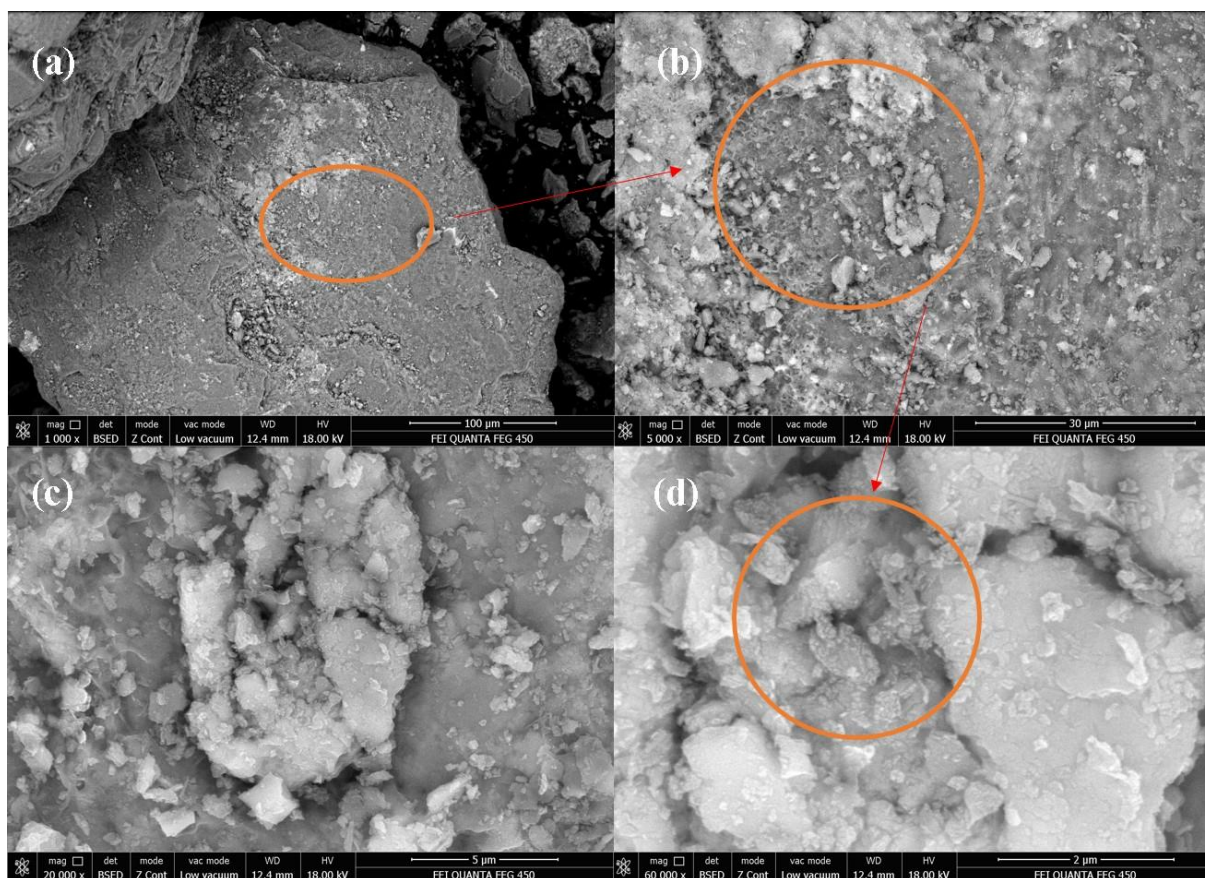
што промените во составот на масата на флуидот и променливата температура можеби биле главните контролни фактори.



Слика 79. ЕДС анализа на Примерокот 8 покажува елементарен состав и карактеристични енергетски врвови.

Figure 79. EDS analysis of Sample 8 showing elemental composition and characteristic energy peaks.

Во ЕДС спектарот на примерокот 8 доминира кислород (O), додека главните врвови на магнезиум (Mg) и силициум (Si) укажуваат на типичен состав на магнезиум силикатни минерали. Оваа елементарна интеракција е карактеристична за серпентинските минерали или производите на алтерација на ултрамафичните карпи.

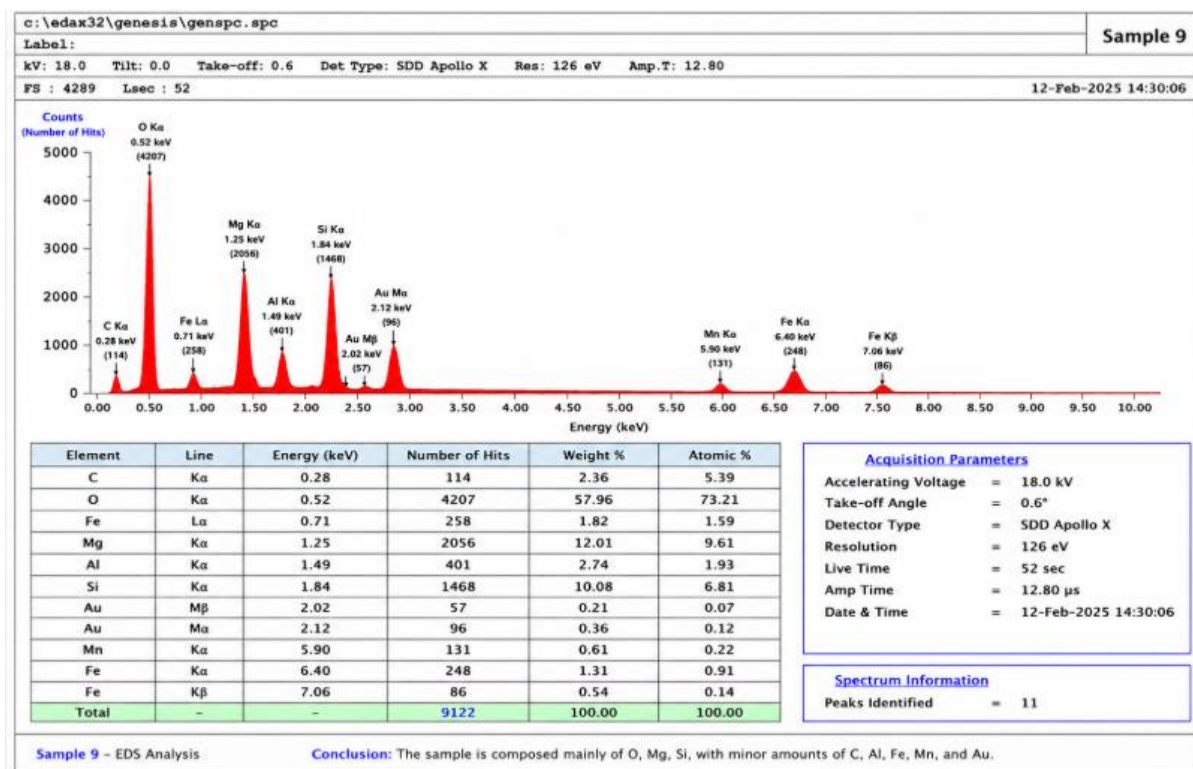


Слика 80. SEM–EDX микрографи од Примерокот 9 кои прикажуваат зрнести текстури и микрокристални агрегати со различни зголемувања.

Figure 80. SEM–EDX micrographs of Sample 9 showing granular textures and microcrystalline aggregates at different magnifications.

Сликите од SEM на примерокот 9 покажуваат хетерогена површинска структура во која се присутни секундарни микрокристални производи. На сликата (а), општиот поглед при помало зголемување покажува карпа со релативно компактна површина, каде што заоблената површина е идентификувана како сектор со висока концентрација на фини честички. При поголемо зголемување на сликата (б), оваа област прикажува грануларна структура со многу помали субаголни кристали расфрлани и густо спакувани низ целата матрица. Сликата (в) го открива развојот на микрокристални агрегати со неправилна морфологија и дифузни меѓугрануларни контакти меѓу агрегатите, потврдувајќи го процесот на секундарна рекристализација. На сликата (г), во означениот дел, се идентификуваат компактни агрегати со груба заоблена микрокристална структура, што укажува на набљудување на кристали во меѓугрануларните

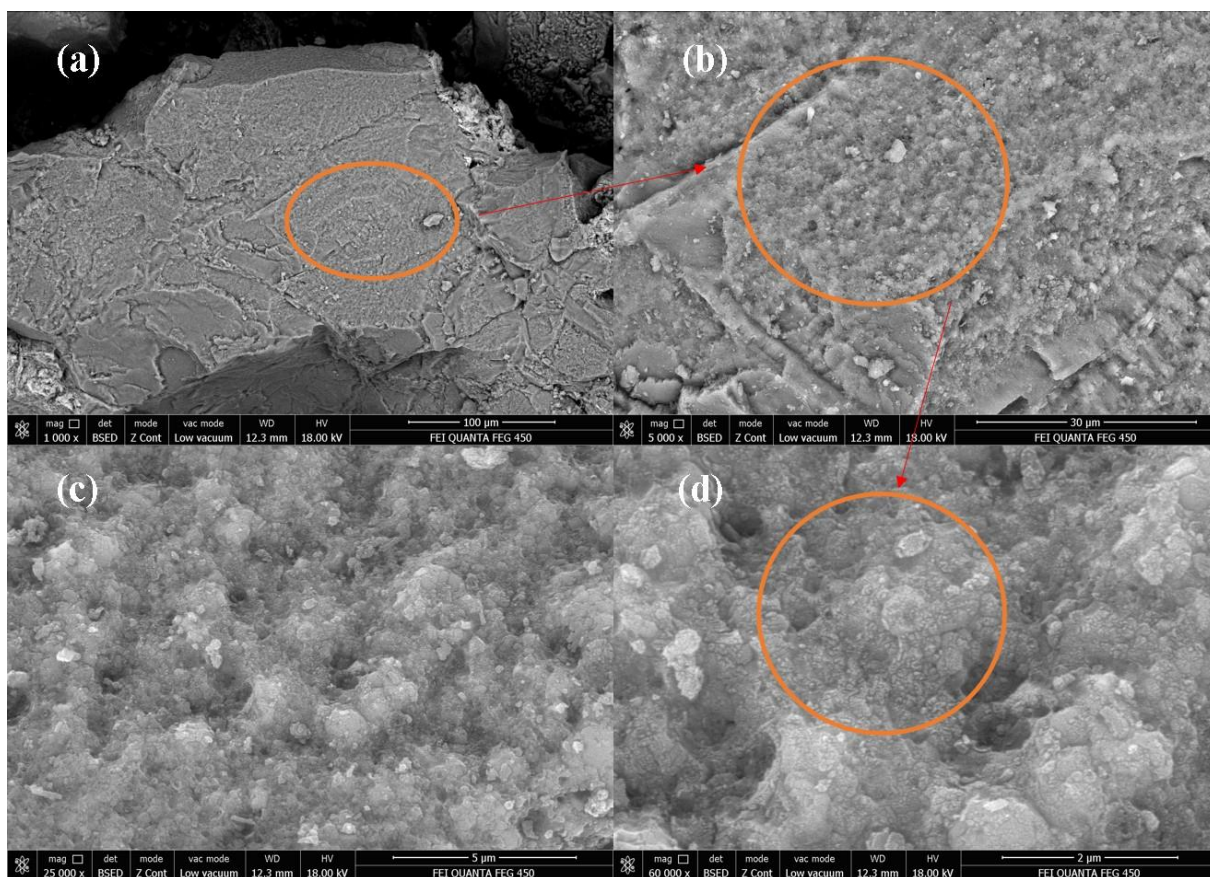
простори или површинските микропразнини за време на зголемувањето на сликата.



Слика 81. Спектарот на EDS од примерокот 9 кој го илустрира елементарниот состав и дистрибуцијата на откриените елементи.

Figure 81. EDS spectrum of Sample 9 illustrating elemental composition and the distribution of detected elements.

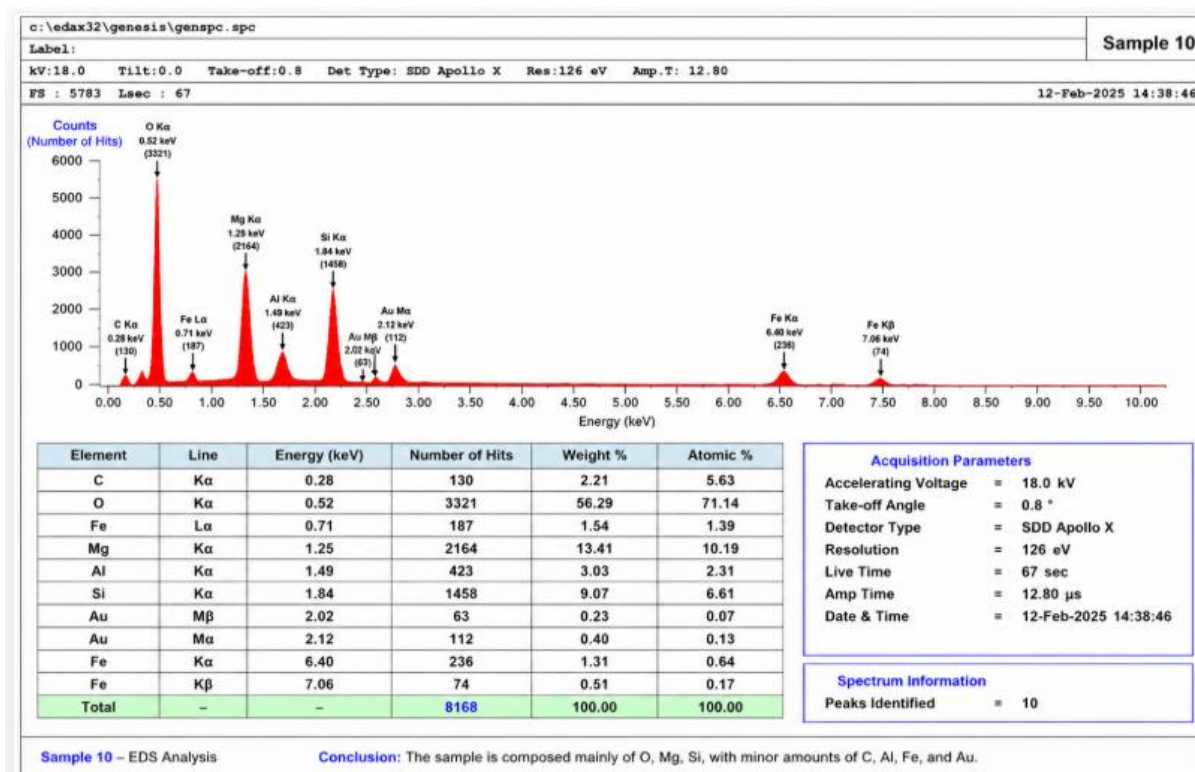
EDS спектарот покажува доминација на кислород (O), придружена со главни врвови на магнезиум (Mg) и силициум (Si), потврдувајќи типичен состав на магнезиум силикати. Оваа елементарна асоцијација е карактеристична за серпентинските минерали или производите на алтерација на ултрамафичните карпи. Присуството на манган (Mn) при низок интензитет укажува на елемент во трага кој може да биде поврзан со метасоматски процеси. Слабото присуство на алуминиум (Al) укажува на ограничен придонес од алумосиликатни фази, додека јаглеродот (C) обично е поврзан со површинска контаминација или спроводлив слој. Врвовите на злато (Au) се инструментални артефакти што произлегуваат од металната обвивка на примерокот и немаат геолошко значење.



Слика 82. SEM–EDX микрографи од примерокот 10 кои илустрираат хетерогени површински текстури и ситнозрнести микроструктури при повеќекратни зголемувања.
Figure 82. SEM–EDX micrographs of Sample 10 illustrating heterogeneous surface textures and fine-grained microstructures at multiple magnifications.

Снимките од SEM од примерокот 10, презентирани при прогресивни зголемувања (a-d), откриваат хетерогена структура и добро развиен микрорелјеф. На сликата (a), се забележува масивен фрагмент со скршена површина и микрокристална текстура, што укажува на компактна минерална матрица со фино дисперзирани фази. На сликата (b) заокружената област покажува грануларни агрегати со нееднаква дистрибуција, кои при поголеми зголемувања на сликите (c-d) се појавуваат како микрокристални и грануларни плочести структури, како и фини агрегати од испреплетени кристали.

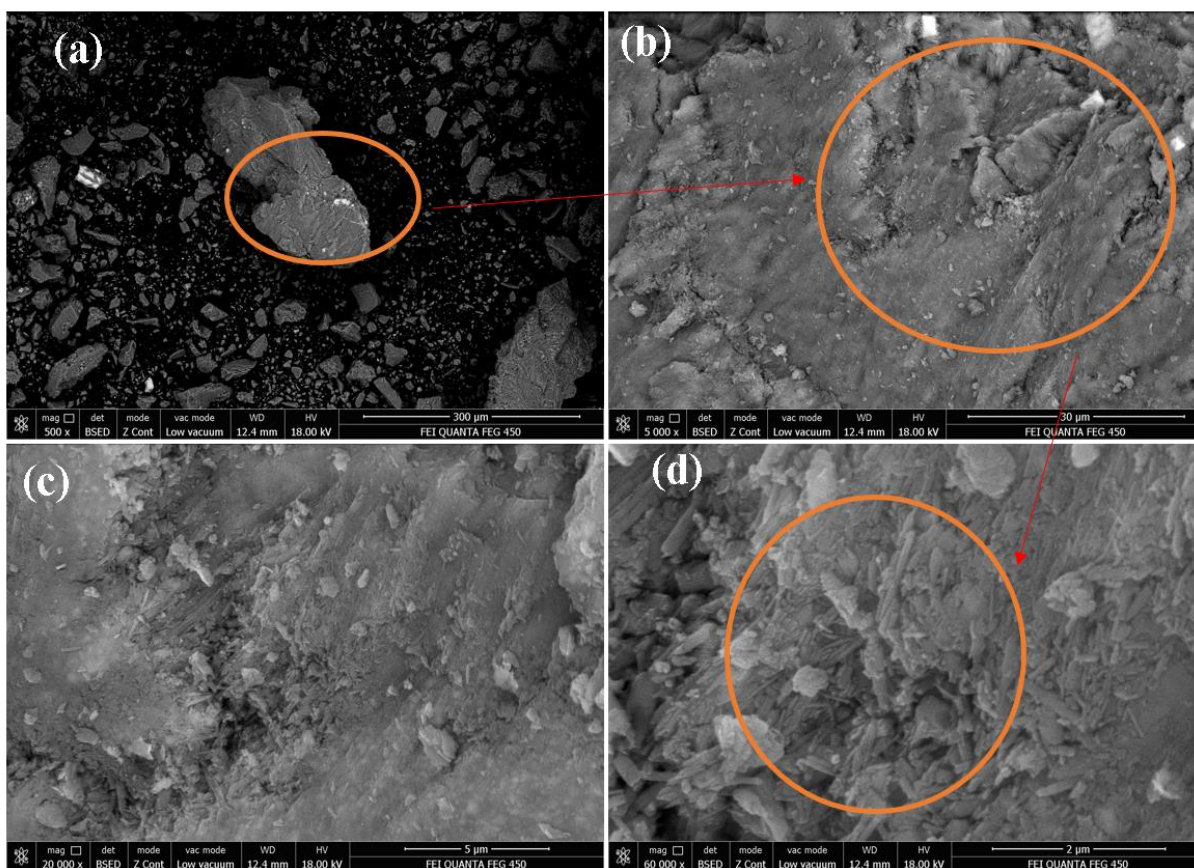
Овие карактеристики се типични за секундарни силикатни материјали формирани преку алтерација или хидротермални процеси, во кои примарните минерали се рансформираат во микрокристални агрегати со неправилни структури.



Слика 83. Спектарот на EDS од примерокот 10 кој го покажува елементарниот состав и карактеристичната врвна дистрибуција.

Figure 83. EDS spectrum of Sample 10 showing elemental composition and characteristic peak distribution.

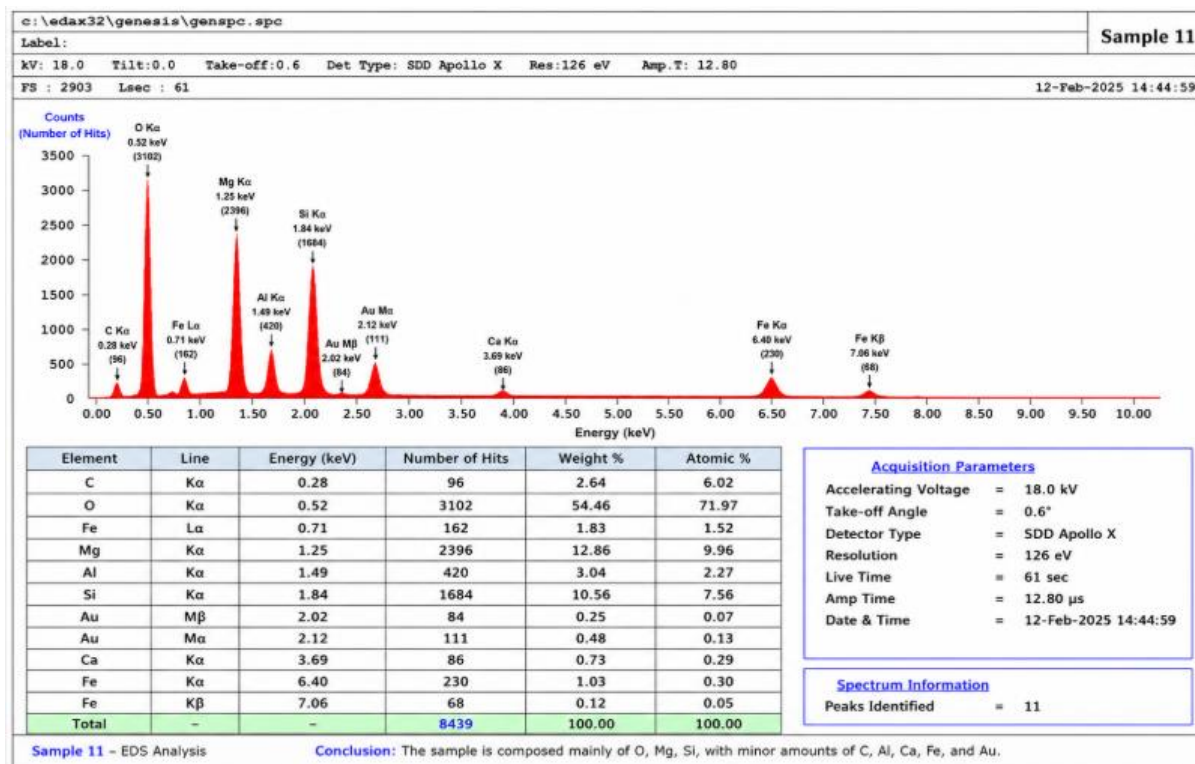
Слика 83 покажува дека спектарот на примерокот 10 претставува магнезиум силикатен материјал со микрокристална агрегатна микроструктура и хетерогена текстура, типична за производите на промена на серпентинизацијата или секундарните силикатни минерали. Фрагментираната и микро-ламеларна морфологија забележана во SEM добро одговара на елементарниот состав на Mg-Si-O идентификуван со EDS, што укажува на претежно серпентинска минерална фаза со секундарни фero-алуминосиликатни компоненти.



Слика 84. SEM слики од Примерокот 11 кои покажуваат микроструктура и текстуални карактеристики при различни зголемувања.
Figure 84. SEM images of Sample 11 showing microstructure and textural features at different magnifications.

Морфолошката структура на Примерокот 11 покажува типична хетерогена структура на силикатни материјали. Во приказот со мало зголемување (а), се забележуваат аголни и субаголни фрагменти со скршени површини и добро развиен микрорелјеф, што укажува на интензивни процеси на минералозна промена и распаѓање. Означената област на сликата (б) претставува микрокристална матрица која е составена од многу фини честички со интегрирани ламеларни агрегати. При поголеми зголемувања (в-г), каде што се видливи испреплетените влакнести и ламеларни структури, видливи се издолжени и рамни кристали кои формираат агрегати. Овие морфологии се карактеристични за минералите кои припаѓаат на серпентинската група и секундарните фази на хидриран силикат формирани за време на серпентинизацијата и хидротермалната промена. Заокружената област на сликата (г) покажува ориентирани агрегати во форма на фибрилар кои

морфолошки личат на структури слични на азбест, што укажува на кристализација под услови богати со течност и релативно ниски температури.

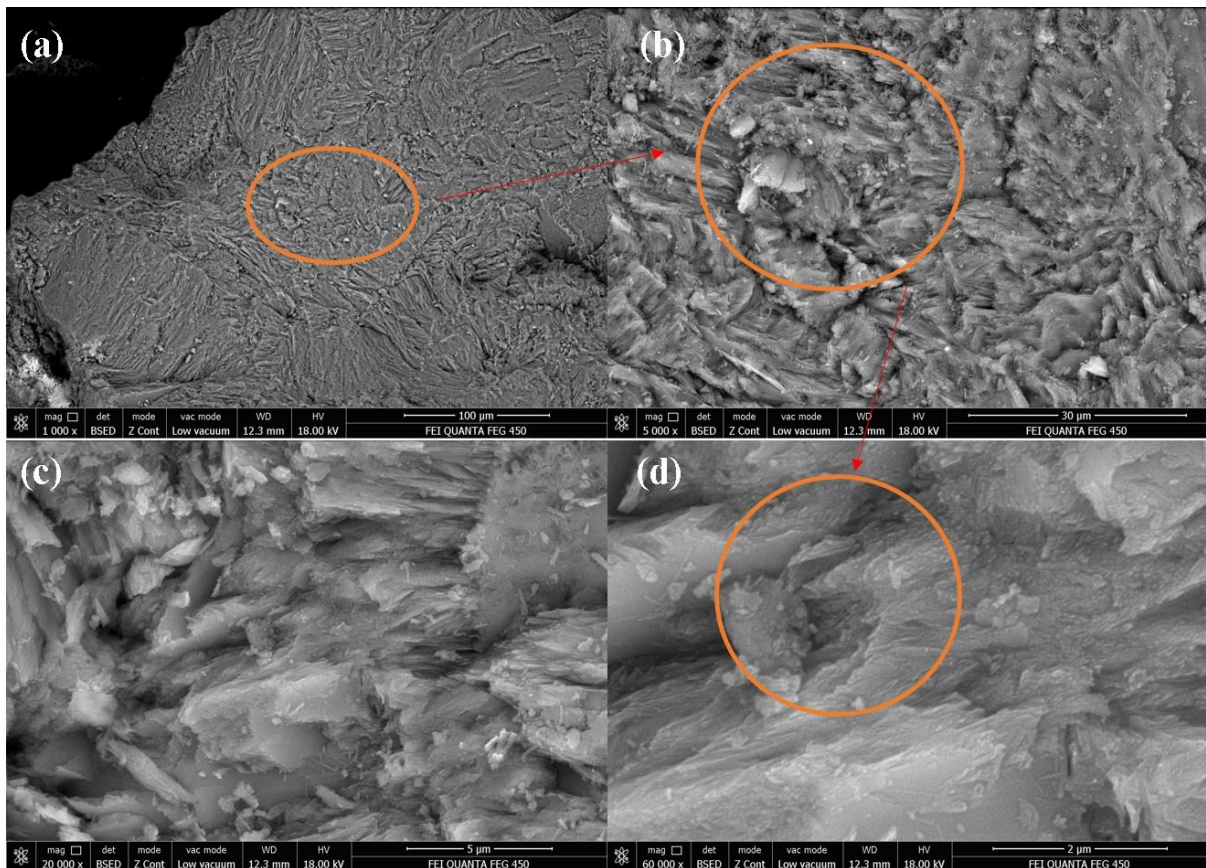


Слика 85. Спектарот на EDS од Примерокот 11 кој го илустрира елементарниот состав и врвната дистрибуција.

Figure 85. EDS spectrum of Sample 11 illustrating elemental composition and peak distribution.

Слика 85 покажува дека спектарот на примерокот 11 претставува типичен состав на ултрамафичен материјал изменет со серпентинитни процеси во кои имаме доминација на Mg-Fe силикати и секундарни алумосиликатни карбонатни фази.

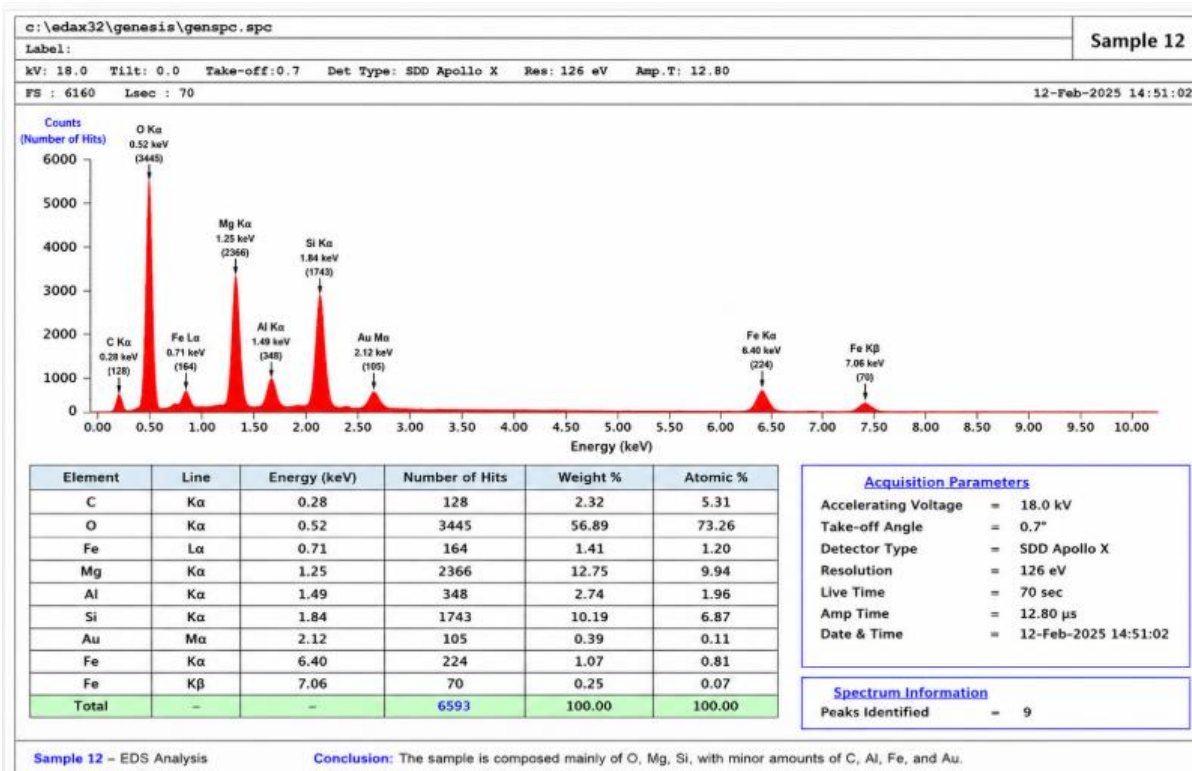
Присуството на Fe врвови при повисоки енергии (~ 6-7 keV) потврдува дека железото не е само елемент во трагови, туку вистинска структурна или минералошка компонента на примерокот.



Слика 86. SEM слики од примерокот 12 кои покажуваат микроструктура и ламеларно-vlakнесте текстури со различно зголемување.

Figure 86. SEM images of Sample 12 showing microstructure and lamellar–fibrous textures at varying magnifications.

Сликите од SEM на Примерокот 12 го покажуваат морфолошкиот состав и хетерогеноста што се движи од компактни и масивни површини до области на ламеларни агрегати и структури ориентирани кон влакна на микрометриска скала. При ниски зголемувања, се забележува фрагмент од карпа со микрофрактури и релјефни површини, додека повисоките зголемувања откриваат испреплетени кристални агрегати со делумно паралелна ориентација. Означените области на микрографијата покажуваат тенки, издолжени кристали кои се развиваат по структурните рамнини, што укажува на анизотропен раст на кристалите и секундарни процеси на алтерација. Оваа морфологија е претставена како конкретен и типичен пример за филосиликатни минерали формирани за време на хидротермални процеси на ултрамафични карпи, каде што хидратацијата и рекристализацијата создаваат карактеристични ламеларни vlakнесте структури.

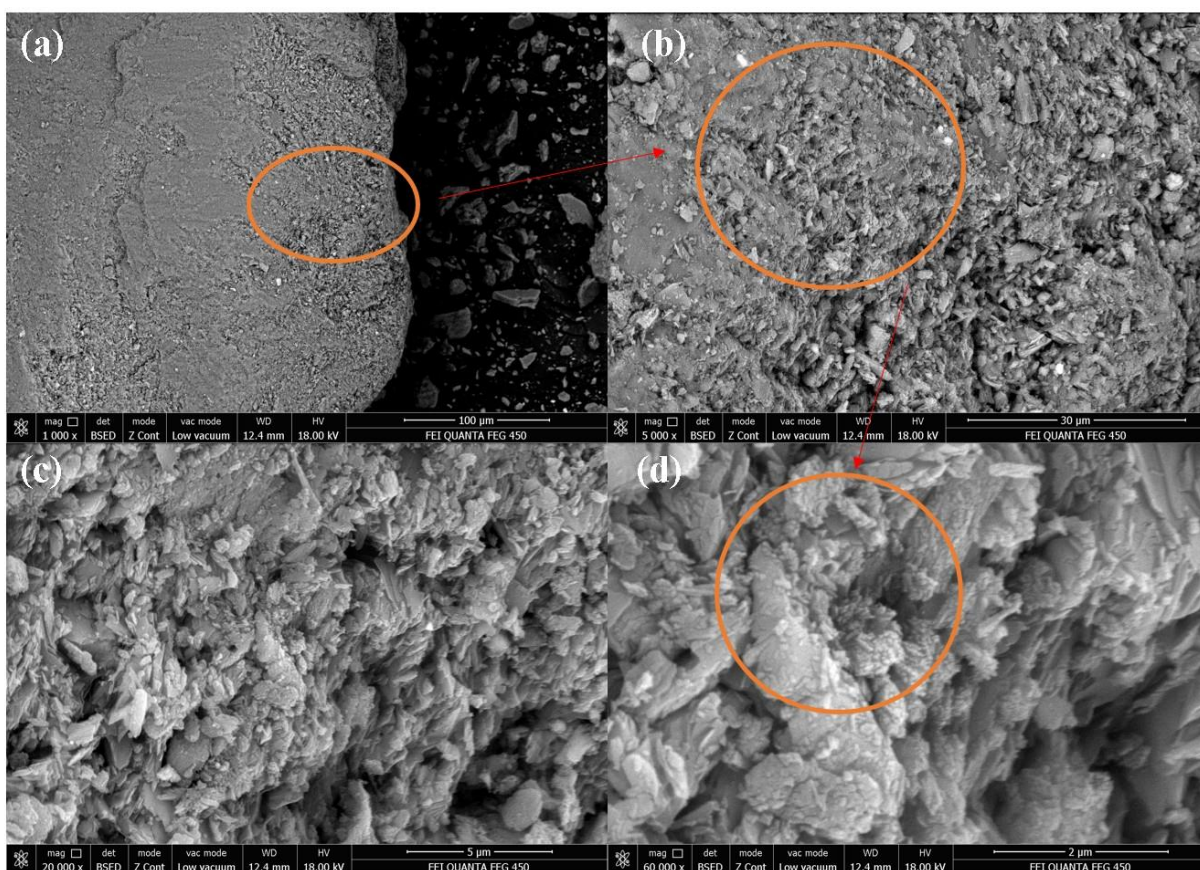


Слика 87. Спектарот на EDS од примерокот 12 кој го покажува елементарниот состав и карактеристичните врвови.

Figure 87. EDS spectrum of Sample 12 showing elemental composition and characteristic peaks.

Слика 87 го прикажува спектарот на примерокот 12 што претставува типичен состав на изменет ултрамафичен материјал во кој доминираат Mg-Fe силикати и помали секундарни фази.

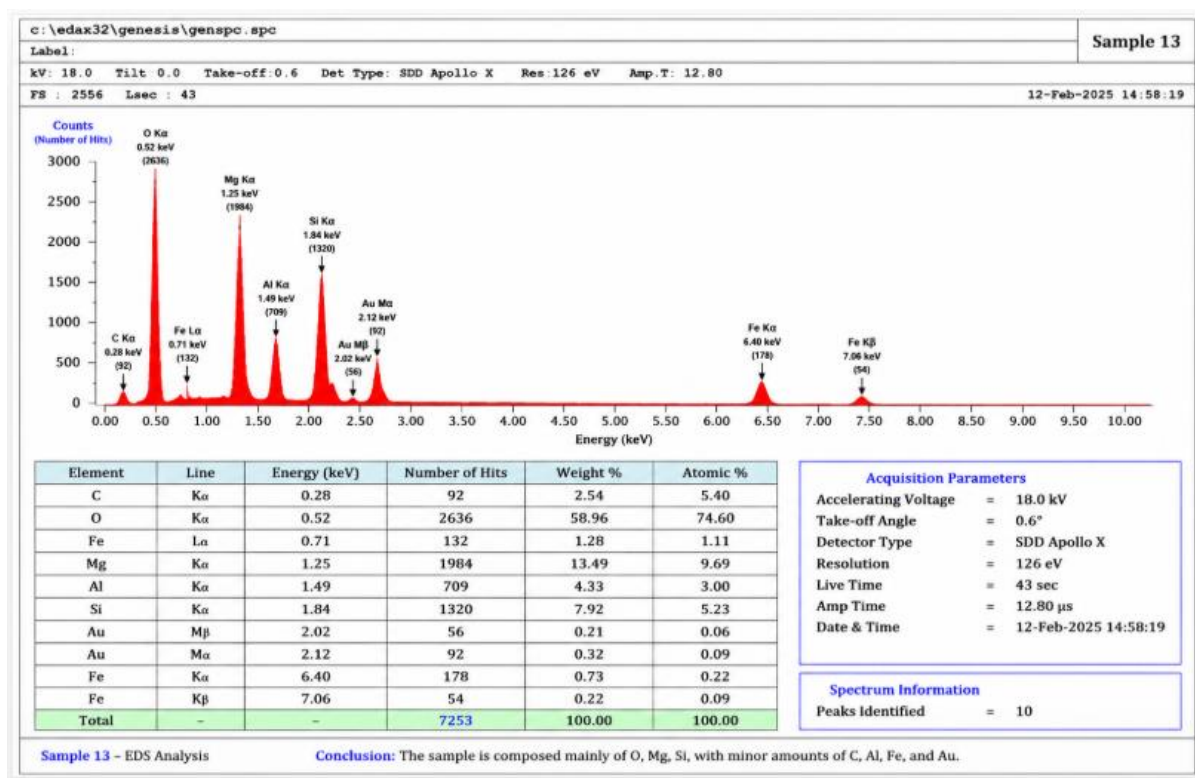
Присуството на Fe врвови во примерокот потврдува дека не станува збор само за присуство во траги во примерокот, туку за вистинска минералозна компонента на примерокот што се појавила за време на анализата.



Слика 88. SEM слики од примерокот 13 кои ја илустрираат микроструктурата и текстуалната варијабилност при различни зголемувања.

Figure 88. SEM images of Sample 13 illustrating microstructure and textural variability at different magnifications.

Снимките од SEM на примерокот 13 покажуваат јасна структура и морфолошки варијации во различни области. Од општите погледи на сликата (а), се забележува компактна карпа со скршена површина и добро развиен микрорелјеф, што укажува на промена за време на серпентинизацијата. Заокружената област и зголемувањето (б) покажуваат акумулирана количина на фини честички со позаоблени форми и микрогрануларни агрегати, што укажува на втората фаза на кристализација. При поголеми зголемувања на сликите (в-г), се разликуваат влакнести ламеларни структури, кои се ориентирани паралелно и типични за слоевити силикатни минерали како што се лизардит и хризотил. Присуството на овие микроструктури ги потврдува процесите на минералошка трансформација и доцна фаза на кристализација кај овие микрофрактури.



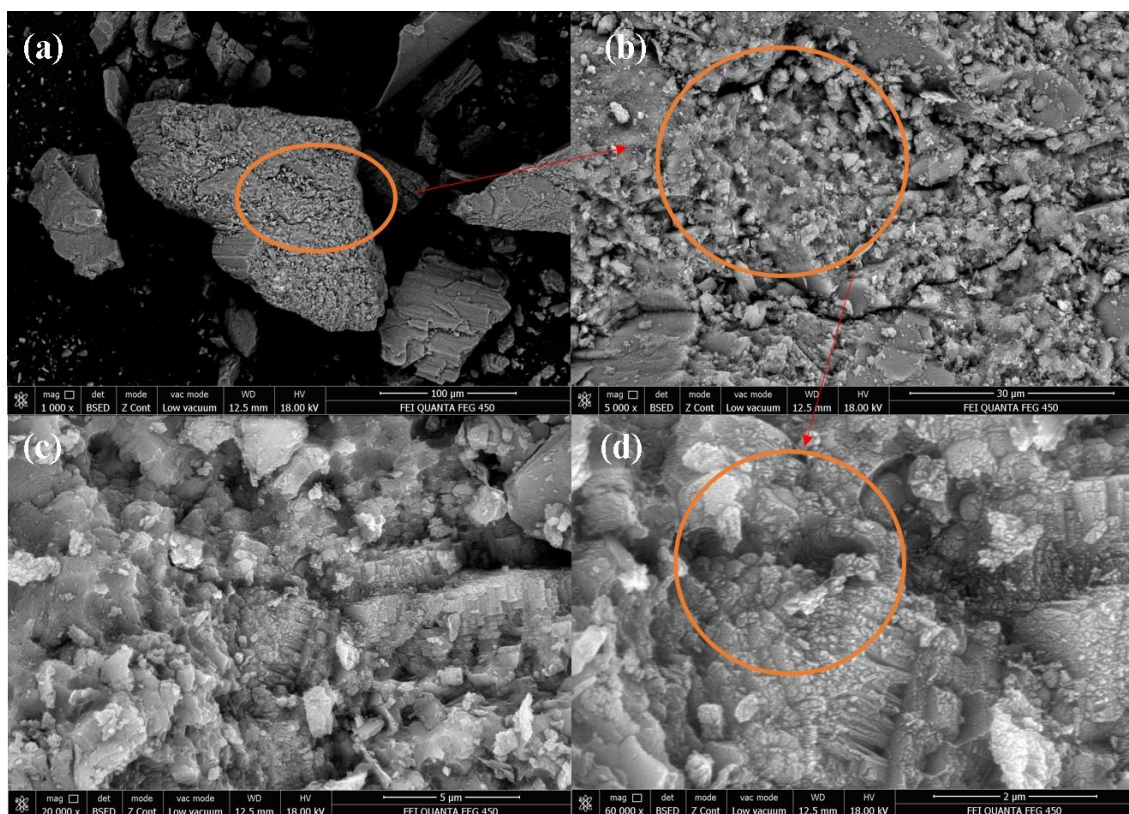
Слика 89. Спектарот на EDS од примерокот 13 кој ја истакнува елементарната дистрибуција и релативните врвни интензитети.

Figure 89. EDS spectrum of Sample 13 highlighting elemental distribution and relative peak intensities.

Слика 89 покажува дека спектарот на овој примерок претставува типичен состав на ултрамафичен материјал кој е значително изменет и сега е доминиран од Mg-Fe силикати со ограничени секундарни фази.

O, Mg, Si - карактеристика на магнезиум силикати типични за минерали од серпентинската група како што се лизардит и хрисотил.

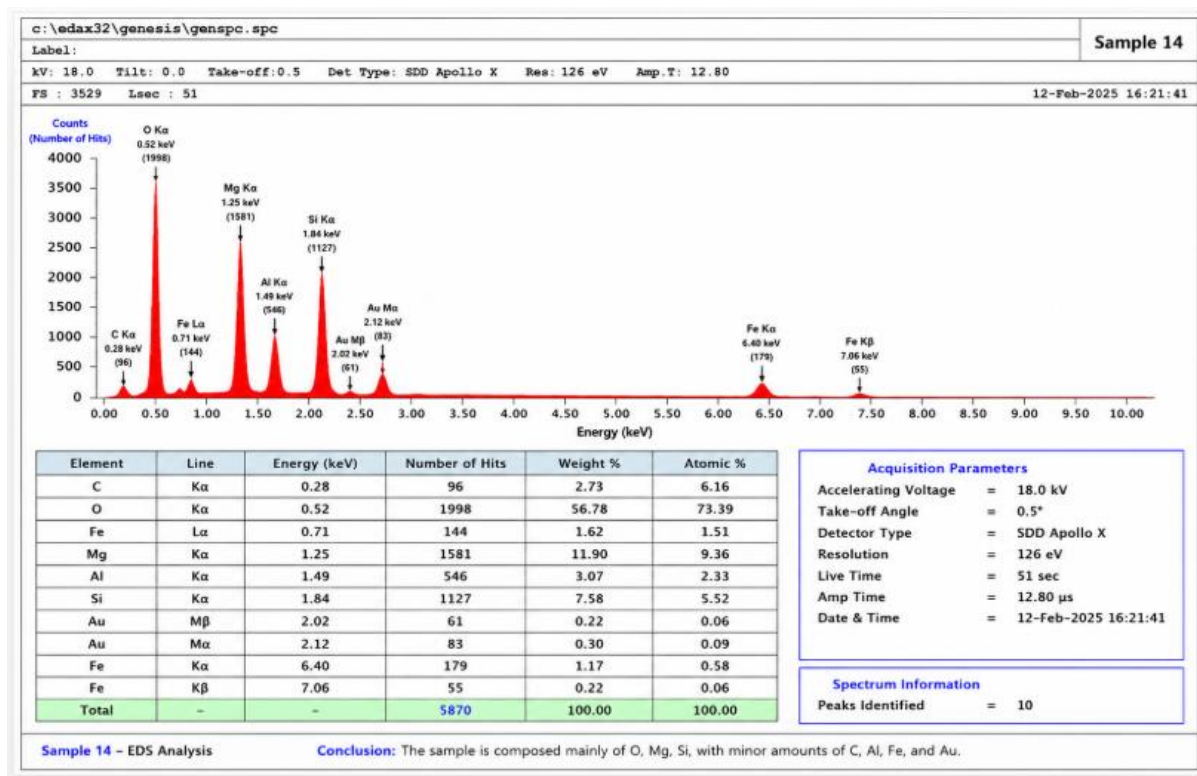
Fe - присутен во значителни количини, што укажува дека железото е структурна компонента која е присутна преку изоморфна супституција или дури и како дисперзирани оксидни фази. Al - укажува на ограничено присуство на секундарни алумосиликатни фази.



Слика 90. SEM слики од примерокот 14 кои покажуваат микрокристална текстура и хетерогена морфологија низ зголемувањата.

Figure 90. SEM images of Sample 14 showing microcrystalline texture and heterogeneous morphology across magnifications.

Сликите од SEM од примерокот 14 покажуваат материјал кој има хетерогена структура и добро развиена микрокристална текстура. При мало зголемување (а), се забележуваат груби фрактури каде што површините се неправилни каде што честичките се фини и ја покриваат примарната матрица. Сликата (б) открива флокулентна грануларна текстура која се состои од микрокристални агрегати кои се нерамномерно распоредени. Додека на сликите (в-г) се претставени ламеларни и фибрилари структури кои се делумно ориентирани со секундарни силикатни фази кои се кристализирани во микрофрактури и пори. Овие морфологии укажуваат дека се занимаваме со напредни процеси на хидротермална алтерација или серпентинизација, во кои примарните минерали се заменуваат со фини влакнести агрегати, што го поддржува силното присуство на хризотил.



Слика 91. Спектарот на EDS од примерокот 14 кој го илустрира елементарниот состав и шемата за дистрибуција на врвот.

Figure 91. EDS spectrum of Sample 14 illustrating elemental composition and peak distribution pattern.

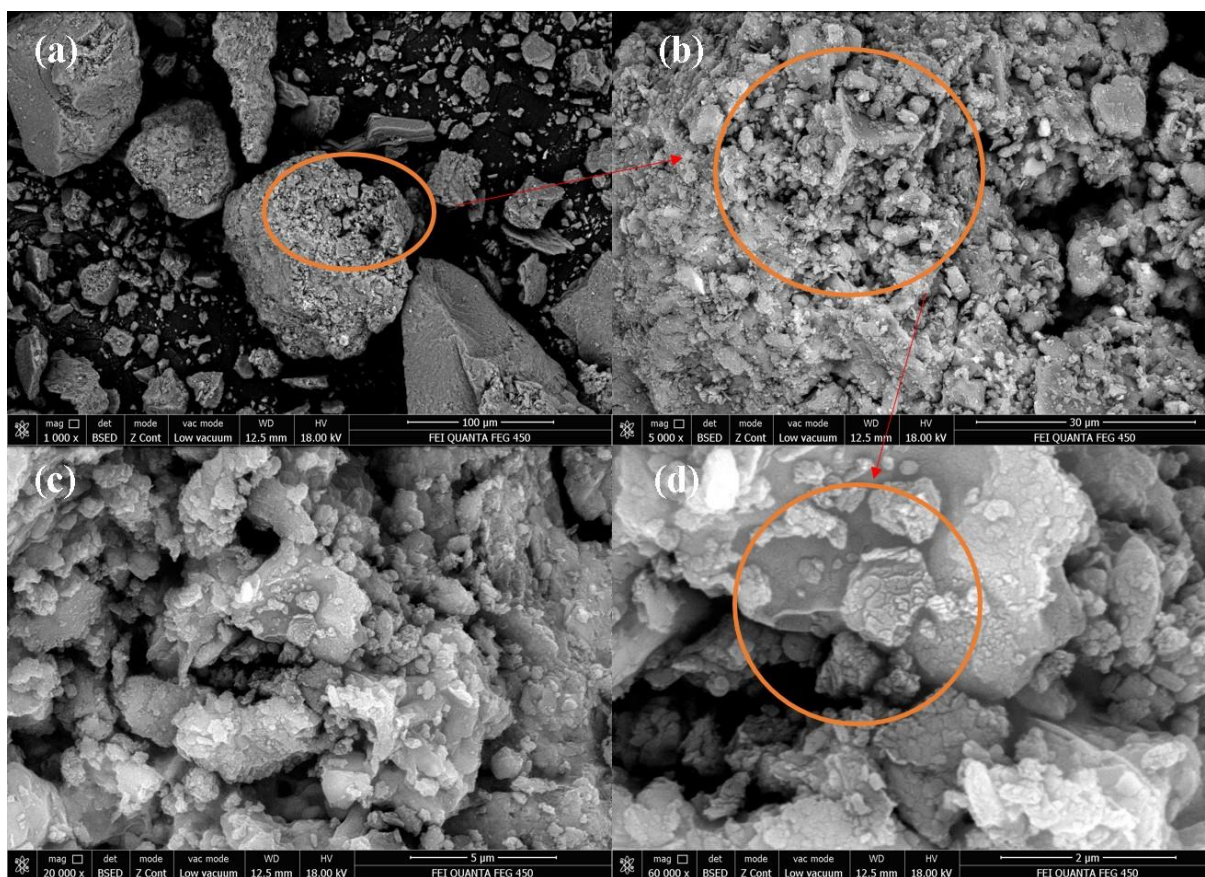
Спектарот на примерокот 14 претставува типичен состав на ултрамафичен материјал во кој доминираат силикатни елементи како што се Mg-Fe со ограничени секундарни фази. Сликите од EDS спектарот ја покажуваат доминацијата на главните елементи како што се:

O, Mg, Si - карактеристика на магнезиум силикати типични за минерали кои припаѓаат на серпентинската група и производи на алтерација на ултрамафичните карпи.

Fe - присутен во значителни количини, што укажува дека железото е вистинска минералозна компонента.

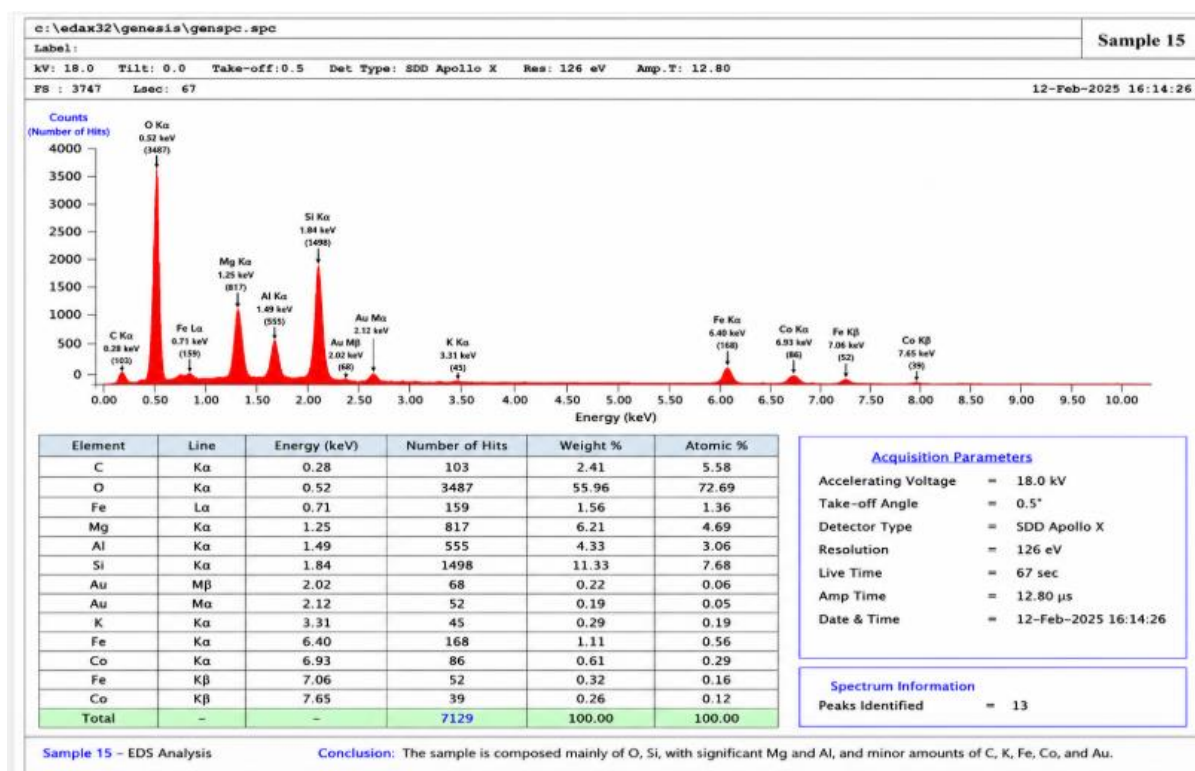
Al - укажува на ограничено присуство на секундарни алумосиликатни фази.

C - обично се поврзува со спроводливата јаглородна обвивка нанесена за време на подготовката на SEM примерокот, додека Au потекнува од спроводливата обвивка на примерокот и нема геохемиско значење.



Слика 92. SEM слики од примерокот 15 кои прикажуваат агрегати на честички и микроструктурни карактеристики при повеќекратни зголемувања.
Figure 92. SEM images of Sample 15 showing particle aggregates and microstructural features at multiple magnifications.

SEM микрографиите на примерокот 15 покажуваат многу хетерогена структура со агрегати од честички распоредени низ фрагментираната карпа. При зголемување (а) се забележуваат фрагменти кои имаат аголни форми, како и нерамномерно обликувани површини, претставувајќи материјал кој можеби претрпел и механичка деформација поради тектонски процеси. Означената област во (б) покажува микрокристална акумулација со фина грануларна структура, во која кристалите изгледаат густо спакувани и делумно цементирани. При поголеми зголемувања (в-г), на местото каде што е подвлечен студискиот дел, може да се разликуваат микронски агрегати со ламеларна морфологија и микрокристална структура, кои можат да се идентификуваат како производи на секундарна кристализација на влакна што содржат азбест.



Слика 93. Спектарот на EDS од примерокот 15 кој го прикажува елементарниот состав и дистрибуцијата на елементите во трагови.

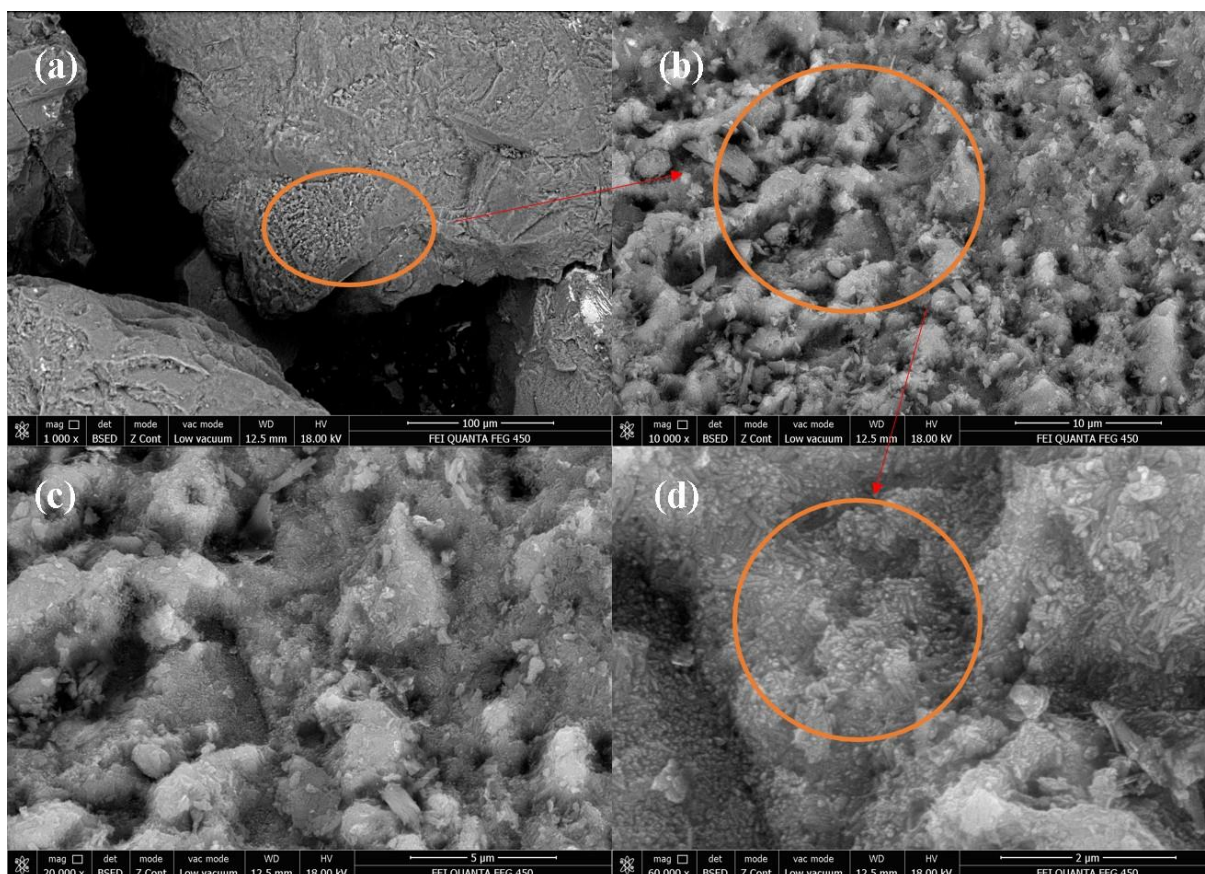
Figure 93. EDS spectrum of Sample 15 showing elemental composition and trace element distribution.

Спектарот на примерокот 15 претставува типичен ултрамафичен состав во кој доминираат Mg-Fe силикати со присуство на некои секундарни елементи во трагови.

O, Mg, Si - главни елементи карактеристични за магнезиум силикатите типични за минералите што припаѓаат на серпентинската група и производи на алтерација на ултрамафичните карпи.

K - се јавува како секундарна фаза со калиум силикати или процесот на алтерација на глина.

C - обично се поврзува со спроводливата јаглеродна обвивка нанесена за време на подготовката на SEM примерокот, додека Au потекнува од спроводливата распрскувачка обвивка.



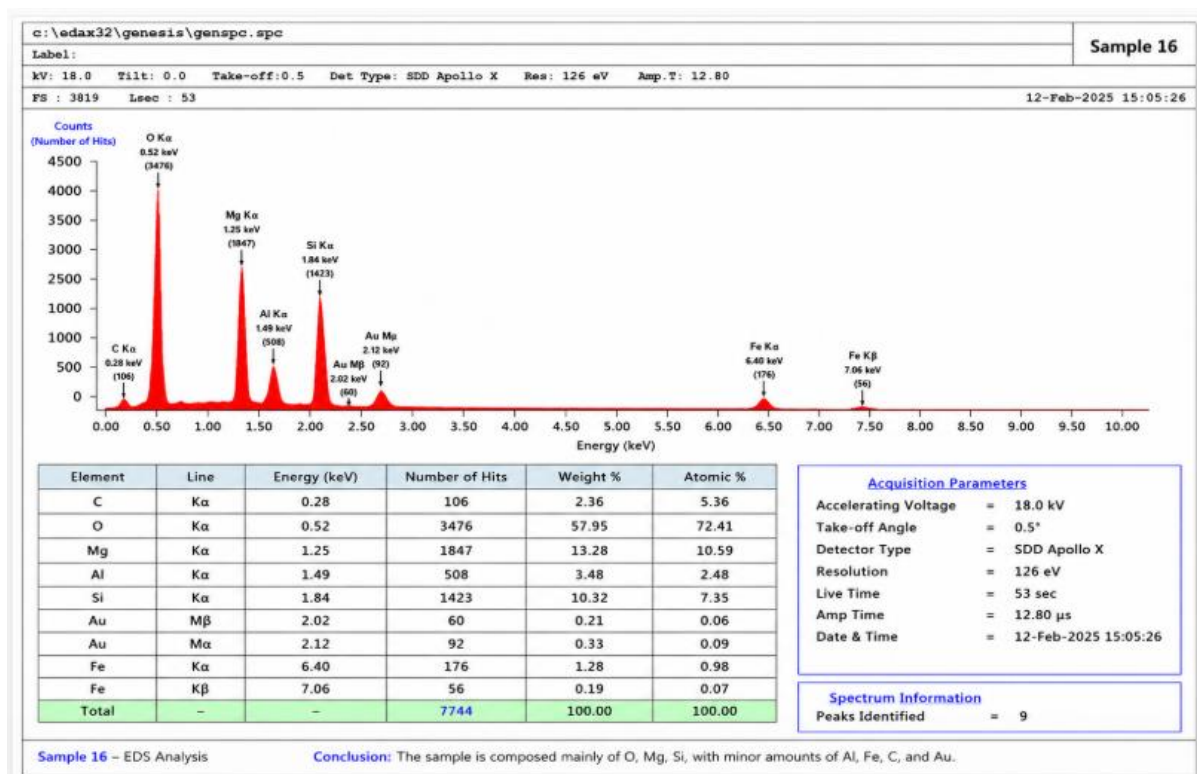
Слика 94. SEM слики од примерокот 16 кои илустрираат хетерогена микроструктура и агрегат текстури при различни зголемувања.

Figure 94. SEM images of Sample 16 illustrating heterogeneous microstructure and aggregate textures at different magnifications.

Снимките од SEM на примерокот 16 од направените слики и прогресивните зголемувања покажуваат дека примерокот се карактеризира со многу хетерогена матрица со груба текстура и микрокристални агрегати распоредени низ целата површина. При зголемувањето на сликата (а), може да се разликуваат фрагменти со неправилна форма каде што се присутни локализирани области со поголема густина на честички, што претставува литолошка и минералозна хетерогеност.

Поголемите зголемувања на сликите (б-г) откриваат мали влакнести структури со ориентирани ламеларни карактеристики, кои се типични за производи на серпентинизација или хидрирани силикатни минерали. Областа заокружена на сликите покажува добро развиена микроструктура и состав од фини субмикронски агрегати кои имаат измешани влакнести и ламеларни кристални морфологии.

Севкупно, морфологијата забележана во овој примерок е целосно во согласност со силикатни материјали богати со Mg кои покажуваат ламеларен фиброзен текстурен развој.



Слика 95. Спектарот на EDS од примерокот 16 што го истакнува елементарниот состав и дистрибуцијата на максималниот интензитет.

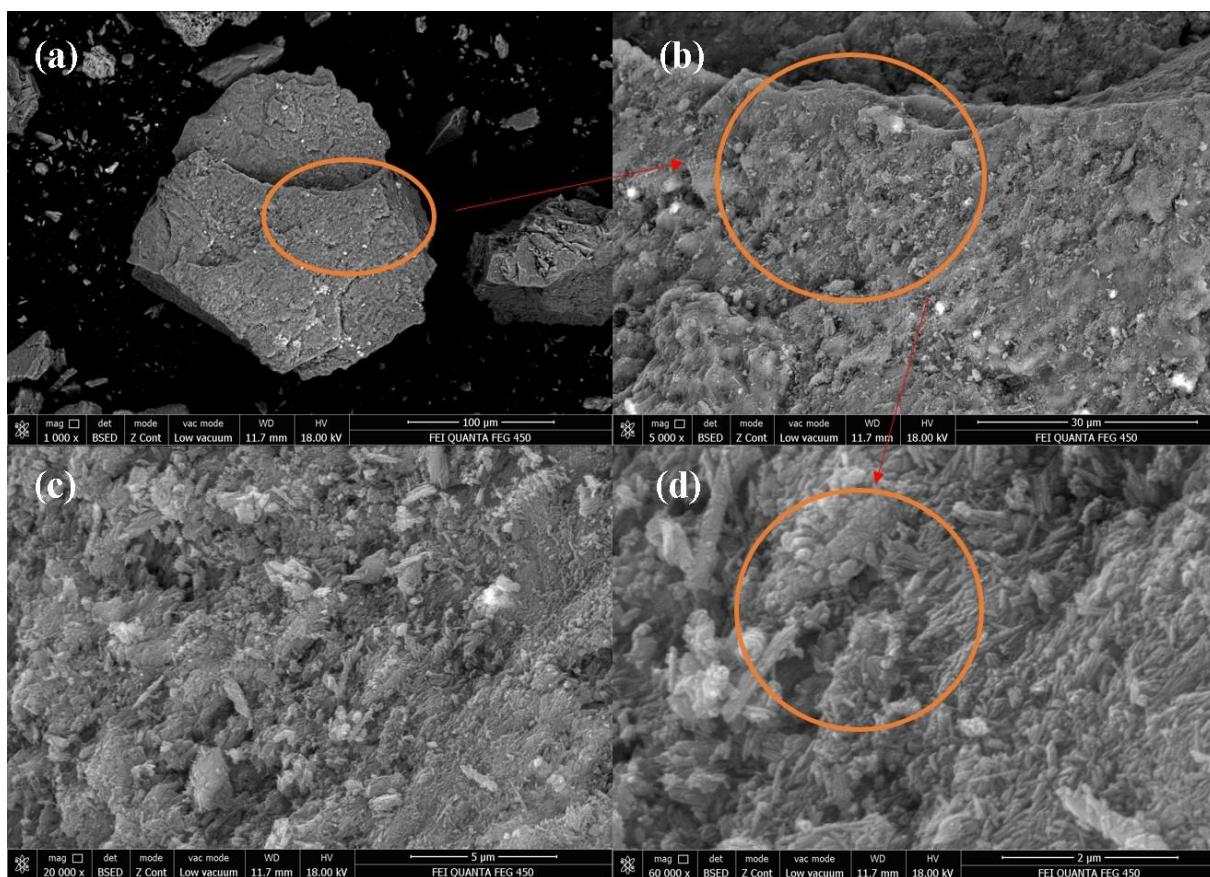
Figure 95. EDS spectrum of Sample 16 highlighting elemental composition and peak intensity distribution.

Прикажаниот спектар на примерокот 16 претставува типичен состав на ултрамафична карпа која претрпела хидротермални процеси на алтерација и во која доминираат магнезиум силикати.

O, Mg, Si - карактеристични за магнезиум силикатите се минерали кои припаѓаат на серпентинската група.

Fe - Присуството на Fe при повисоки енергии (~ 6-7 keV) потврдува дека железото не е само елемент во трагови, туку структурна компонента на материјалот.

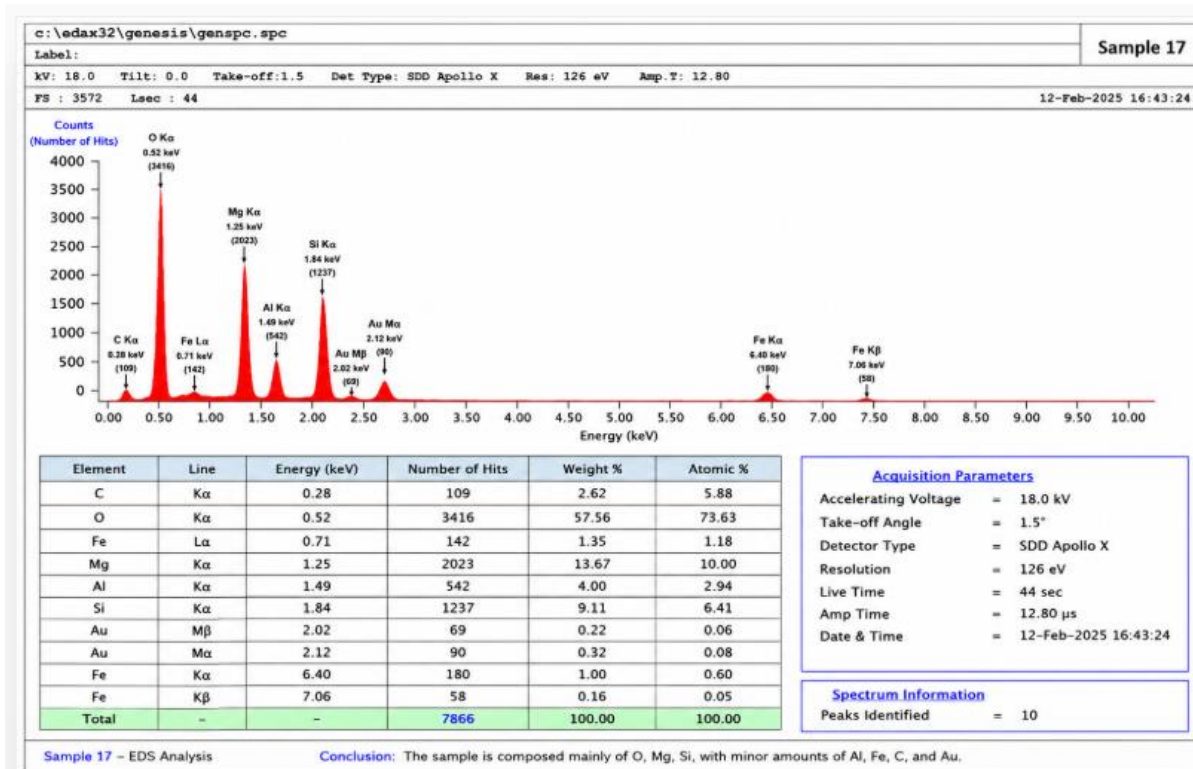
Al - укажува на ограничено присуство на секундарни алумосиликатни фази.



Слика 96. SEM слики од примерокот 17 кои прикажуваат микроструктурни карактеристики и текстуални варијации низ зголемувањата.
Figure 96. SEM images of Sample 17 showing microstructural features and textural variations across magnifications.

Снимките од SEM на примерокот 17 со прогресивно зголемување покажуваат дека примерокот се состои од аголни фрагменти од карпа со груби површини и хетерогени текстури. Во општиот поглед на сликата (a), гледаме присуство на компактни агрегати каде што се појавуваат површински фрактури и расфрлани микрокристални зони, додека поголемите зголемувања на сликата (б-г) откриваат многу финозрнести структури и ламеларни агрегати на серпентински минерали, каде што матрицата претставува микрокристална густина што варира од призматични до грануларни форми.

Заокружените области покажуваат развој на плочести структури и микрогрануларни агрегати, кои се типични во фазите што ги предизвикале процесите на алтерација на силикат, особено кога се работи со минерали од серпентинската група како што се лизардитот и форстеритот.



Слика 97. Спектарот на EDS од примерокот 17 кој го илустрира елементарниот состав и релативната врвна дистрибуција.

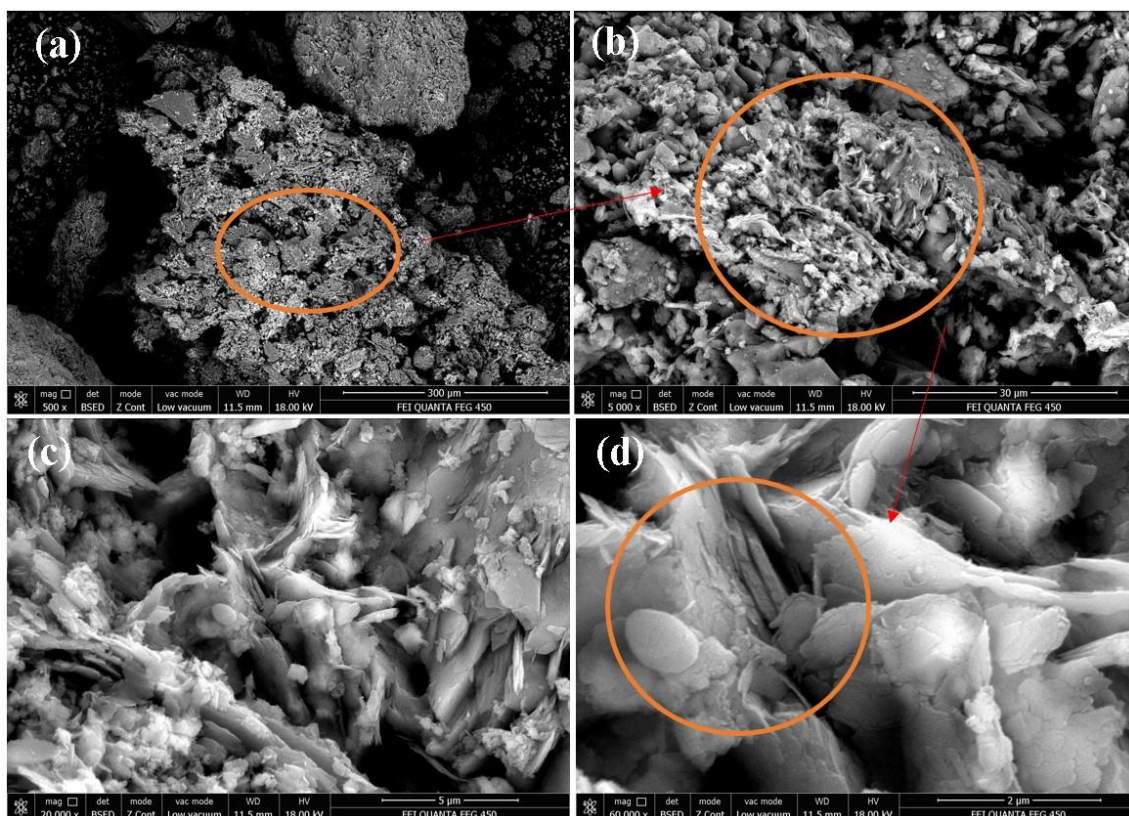
Figure 97. EDS spectrum of Sample 17 illustrating elemental composition and relative peak distribution.

Спектарот на Примерокот 17 претставува типичен состав на изменета ултрамафична карпа во која доминираат Mg-Fe силикати.

O, Mg, Si - карактеристика на магнезиум силикати типични за минерали кои припаѓаат на серпентинската група, како и производи на секундарна алтерација кои ги сочинуваат ултрамафичните карпи.

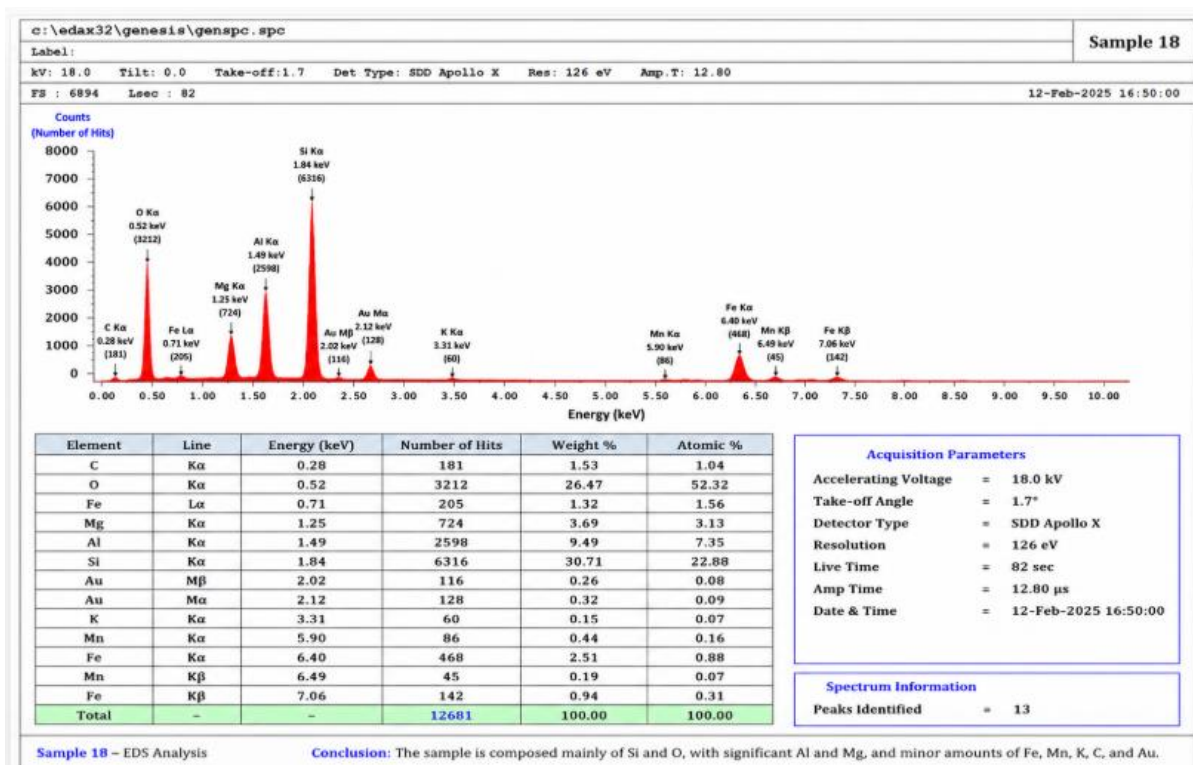
Fe - со своето значително присуство во примерокот ни покажува дека железото е вистинска минералозна компонента присутна од процесите на оксидација.

Севкупно, спектарот ја поддржува интерпретацијата дека примерокот претставува серпентинизиран ултрамафичен материјал со производи кои се резултат на секундарна алтерација кои имаат минералоски состав во кој доминираат магнезиум силикати.



Слика 98. Сликите на SEM од Примерокот 18 кои прикажуваат хетерогена текстура и агрегати слични на плочи при различни зголемувања.
Figure 98. SEM images of Sample 18 showing heterogeneous texture and plate-like aggregates at different magnifications.

Снимките од SEM на Примерокот 18 покажуваат хетерогена структура со агрегати од честички дисперзирани низ матрицата што има компактност како што се гледа на сликите (a-b). При поголеми зголемувања на сликите (c-d), се забележуваат ламеларни, како и плочести структури, ориентирани на субпаралелен начин и поврзани со неправилни микрокристални фрагменти. Заокружената област покажува развој на агрегати и кристали со силно плочесто врзување, што укажува на секундарен раст на кристалите или трансформации на алтерација. Во овој примерок, се забележуваат неазбестиформни влакна каде што морфологијата е доминирана од ламеларни и грануларни структури карактеристични за изменети силикатни минерали или седиментни фази на песок и глина од флиш тип, наместо фиброзна кристализација како што се гледа во претходните примероци.



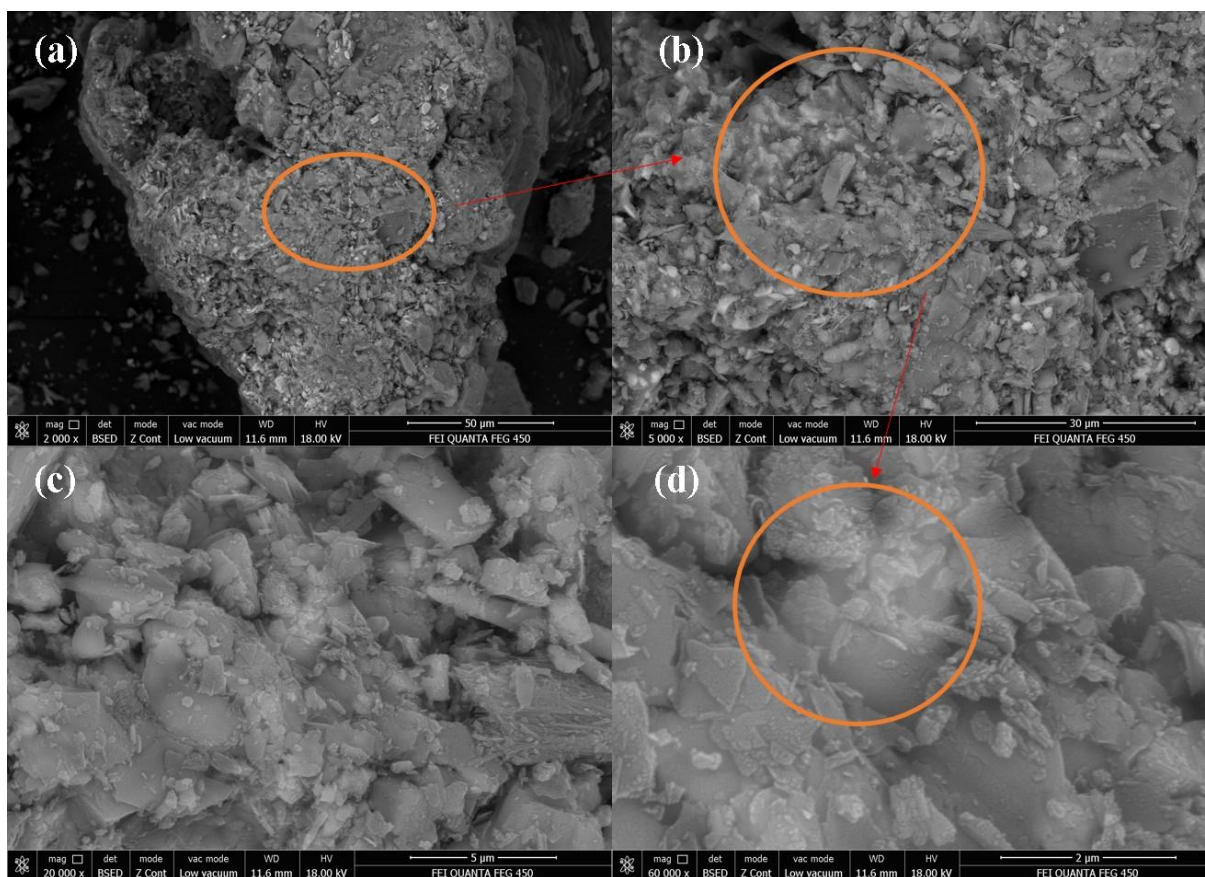
Слика 99. Спектарот на EDS од примерокот 18 кој илустрира елементарен состав и сигнали за мали елементи во трагови

Figure 99. EDS spectrum of Sample 18 illustrating elemental composition and minor trace element signals.

EDS спектарот на примерокот 18 покажува комплексен елементарен состав што одразува изменет материјал со претежно силикатна природа и присуство на секундарни елементи. Доминацијата на врвовите на кислород (O) и силициум (Si) потврдува минерална матрица богата со силикатни фази, додека присуството на магнезиум (Mg) и железо (Fe) укажува на феромагнезиски компоненти типични за материјали од ултрамафичко потекло или нивни производи на алтерација.

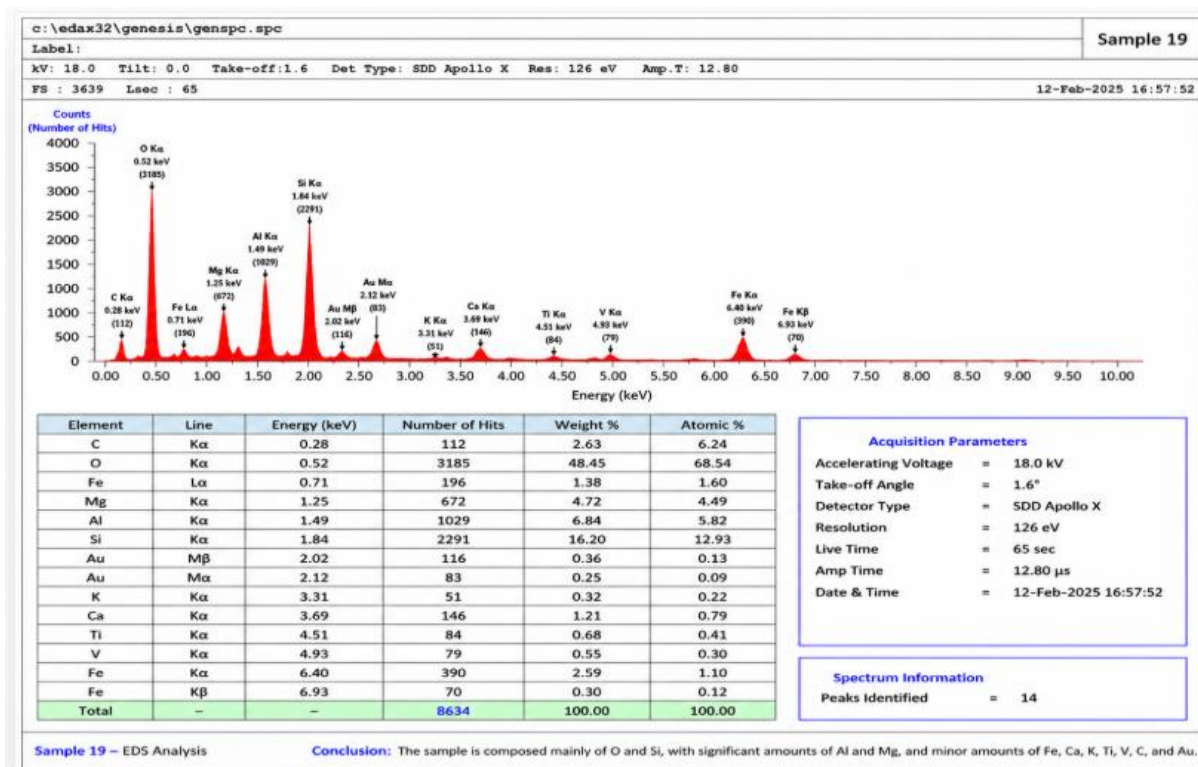
Fe - се појавува со забележлив интензитет, вклучувајќи карактеристични врвови во енергетскиот опсег од приближно 6-7 keV, потврдувајќи дека железото е вистинска структурна компонента.

Al претставува придонес од алумосиликатни фази, додека K сугерира присуство на секундарни калиум силикатни минерали или производи на алтерација на глина. Присуството на Mn на ниски нивоа обично е поврзано со оксидни фази или метали во раги во матрицата.



Слика 100. SEM слики од Примерокот 19 кои прикажуваат агрегати на честички и микроструктурни варијации при повеќекратни зголемувања.
Figure 100. SEM images of Sample 19 showing particle aggregates and microstructural variation at multiple magnifications.

Примерокот 19, на сликата (a) покажува многу хетероген агрегат по големина на честички и морфологија, каде што главните фрагменти се претставени на груби површини и области со микропорозност. Означената област покажува сектор со пофина и пофрагментирана текстура во споредба со околната матрица. При поголемо зголемување (б), оваа област претставува амалгамација на микрогрануларни фракции со нееднаква дистрибуција и форми кои се движат од субаголни до плочести. Сликите (в) и (г) покажуваат комплексна микроструктура составена од ламеларни агрегати и фини фрагменти кои формираат густы и делумно ориентирани структури, типични за процесите на алтерација и секундарна минерализација. Отсуството на долги и добро дефинирани влакна сугерира дека структурата е доминирана од кристални агрегати, а не од добро развиени влакнести морфологии.



Слика 101. Спектарот на EDS од примерокот 19 кој го прикажува елементарниот состав и дистрибуцијата на главните и елементите во трагови.

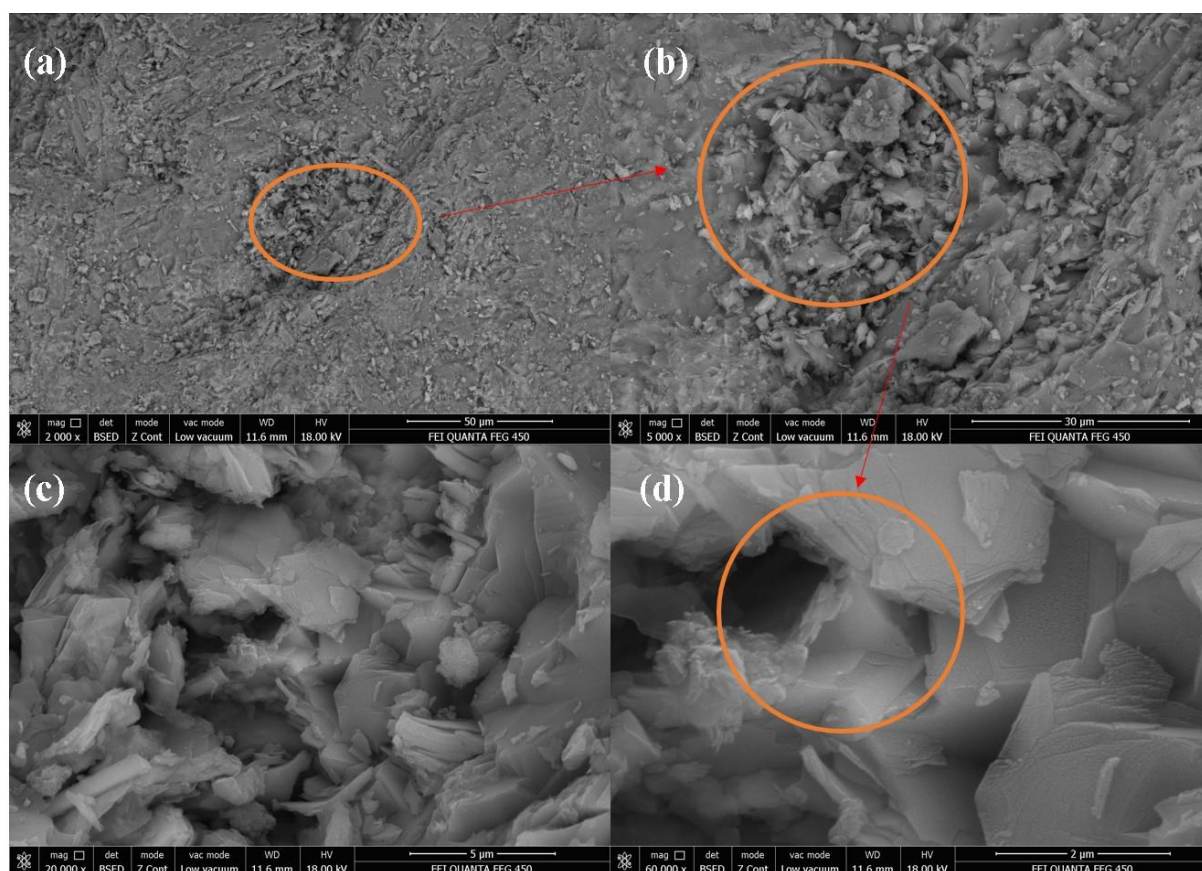
Figure 101. EDS spectrum of Sample 19 showing elemental composition and distribution of major and trace elements.

EDS спектарот на примерокот 19 покажува разновиден елементарен состав што рефлектира природно изменет материјал, кој е главно силикатен, а исто така се состои од оксидни фази и елементи во трагови. Доминацијата на кислород (O) и силициум (Si) потврдува матрица богата со силикатни минерали, додека присуството на магнезиум (Mg) и железо (Fe) укажува на феромагнетни компоненти од ултрамафично потекло.

Fe- се појавува со забележлив интензитет, кој вклучува карактеристичен врв во енергетскиот опсег од приближно 6-7 keV, потврдувајќи дека железото е клучен составен елемент во структурата.

Al- укажува на присуство на алумосиликатни фази, додека Ca може да потекнува од секундарни карбонатни или калциум силикатни фази. K- е поврзан со секундарни глинени минерали. Додека појавата на Ti и V на ниски нивоа не се појавува бидејќи елементите во трагови обично се поврзуваат со отпорни оксидни фази.

Сигналите С и Аu се елементите што беа користени за подготовка на примерокот за лабораториска употреба каков што е (јаглеродни и златни обвивки) и затоа во ниту еден примерок не беше доделено геохемиско значење.

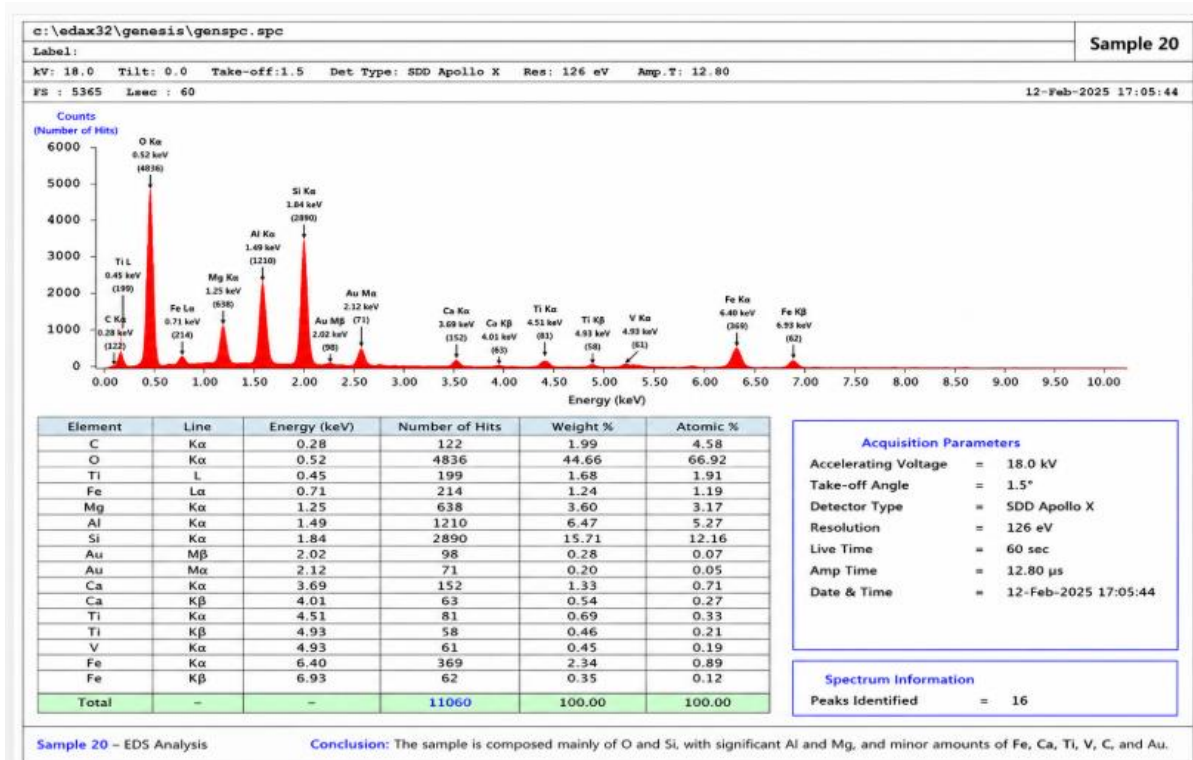


Слика 102. SEM слики од примерокот 20 кои илустрираат хетерогена повеќефазна текстура и ламеларно-грануларни микроструктури со различни зголемувања.

Figure 102. SEM images of Sample 20 illustrating heterogeneous multiphase texture and lamellar-granular microstructures at different magnifications.

SEM микрографиите на примерокот 20 покажуваат хетерогена и повеќефазна структура со грануларна ламеларна распределба на примерокот. При зголемување на сликата (а), се забележуваат фрагменти каде што облиците се субаголни и со нерамни површини, што укажува на механичко кршење кое претрпело секундарни тектонски процеси. Заокружената област на сликата (б) претставува микрокристални агрегати со морфологија на плочи, како и некои субфиброзни делови, кои при поголеми зголемувања на сликите (в-г) покажуваат добро дефинирани ламеларни структури и испреплетени микропорозности. Овие карактеристики се појавуваат во хидрираните силикатни фази и производите на хидротермална алтерација, во кои кристалите се развиваат во форма на кратки влакна. Нивната организација во компактни агрегати сугерира

секундарен раст на кристалите по должината на микрофрактури или реакциски површини.



Слика 103. Спектарот на EDS од примерокот 20 кој го покажува елементарниот состав и дистрибуцијата на главните и помалите елементи.
Figure 103. EDS spectrum of Sample 20 showing elemental composition and distribution of major and minor elements.

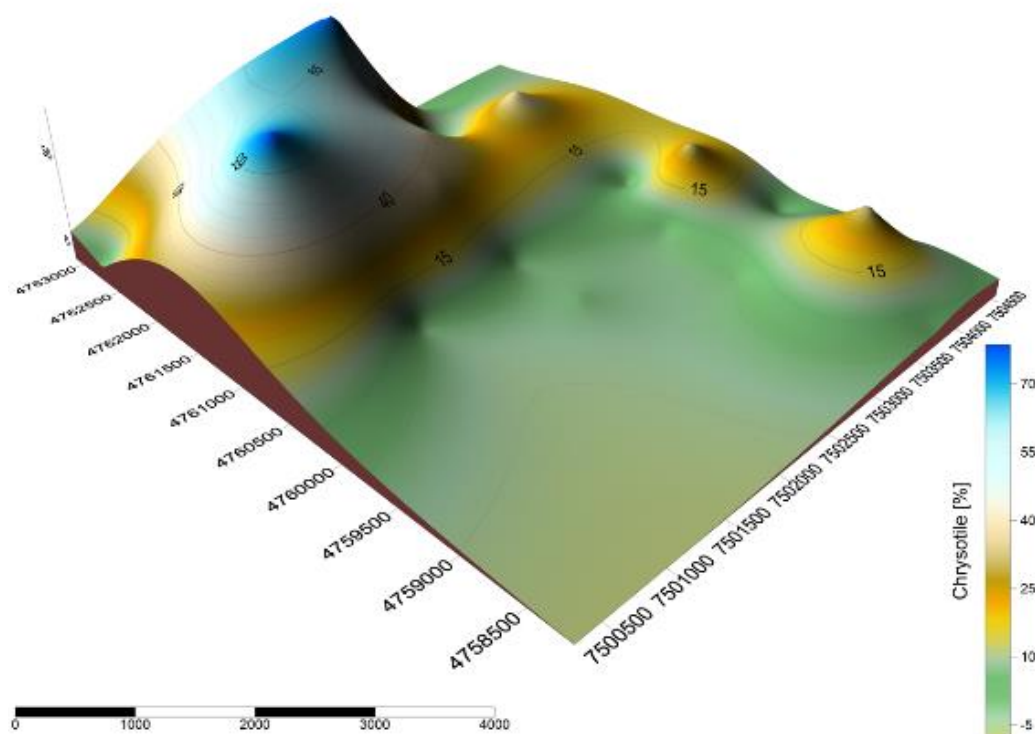
EDS спектарот на примерокот 20 претставува комплексен елементарен состав што рефлектира изменет материјал со претежно силикатна природа каде што оксидните фази се појавуваат како елементи во трагови. Доминацијата на кислород (O) и силициум (Si) потврдува дека се работи за минерална матрица богата со силикатни фази, додека присуството на магнезиум (Mg) и железо (Fe) потврдува дека тие се феромагнезиски компоненти кои се типични компоненти на материјали од ултрамафично потекло или нивни производи на промена.

Al-укажува на присуство на алумосиликатни фази, додека Ca сугерира секундарни карбонатни фази или калциум силикат.

Детекцијата на Ti и V на ниски нивоа укажува дека имаме елементи во трагови кои обично се поврзуваат со отпорни оксидни фази.

5.7. Просторна дистрибуција на минералошките фази во регионот Бајгора

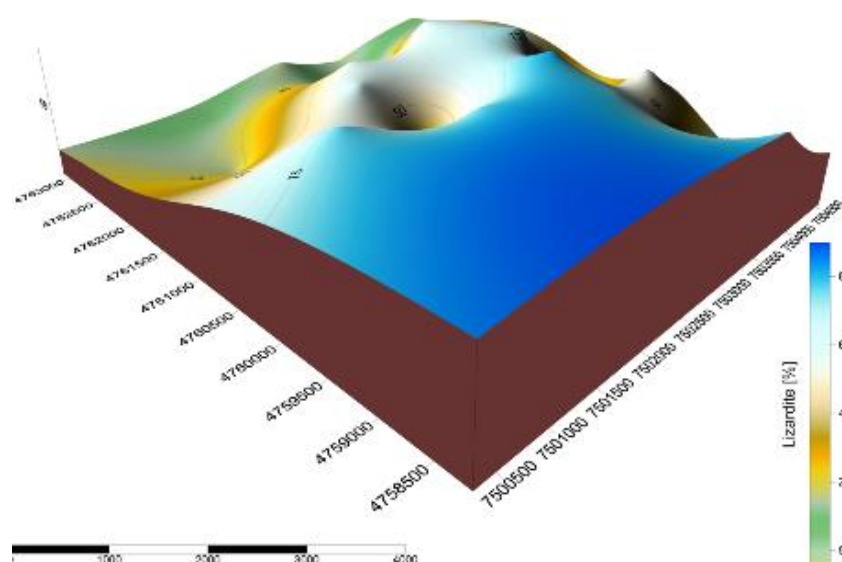
Просторна анализа на распределбата на минералните фази од серпентинската група беше извршена со софтверот Golden Software Surfer, каде што го користевме методот на Кригингова интерполација за да ја визуелизираме просторната варијабилност на минералните концентрации низ целата област на проучување. Интерполираните површини претставуваат релативни шеми на концентрација извлечени од геореференцираните места за земање примероци и даваат увид во влијанието на литолошката хетерогеност и структурните контроли врз распределбата на минералите. Тридимензионалните просторни шеми ја илустрираат изразената просторна диференцијација помеѓу анализираните минерални фази.



Слика 104. 3Д карта на просторна дистрибуција на Хризотил
Figure 104. 3D spatial distribution map of Chrysotile

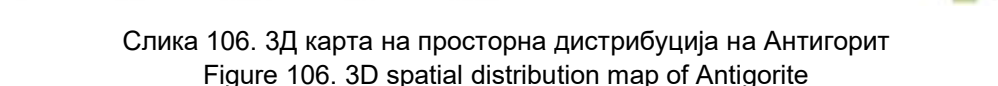
Хризотилот, кој е минерална фаза што предизвикува најголема загриженост за животната средина поради неговата азбестна природа, е забележан само во ограничен број примероци и генерално во умерени концентрации. Неговата дистрибуција е ограничена и дисконтинуирана, што укажува на негово формирање во локализирани структурни услови, како што се фрактурни системи и литолошки контакти, кои се места што го фаворизираат развојот и зачувувањето на влакнести минерали.

3D повеќеточкестиот модел е карактеристичен за азбестната минерализација контролирана од микрофрактурни мрежи. Највисоките концентрации ги дефинираат областите каде што серпентинизацијата била поинтензивна и придружена со зголемени концентрации на влакнести во структурните празнини.



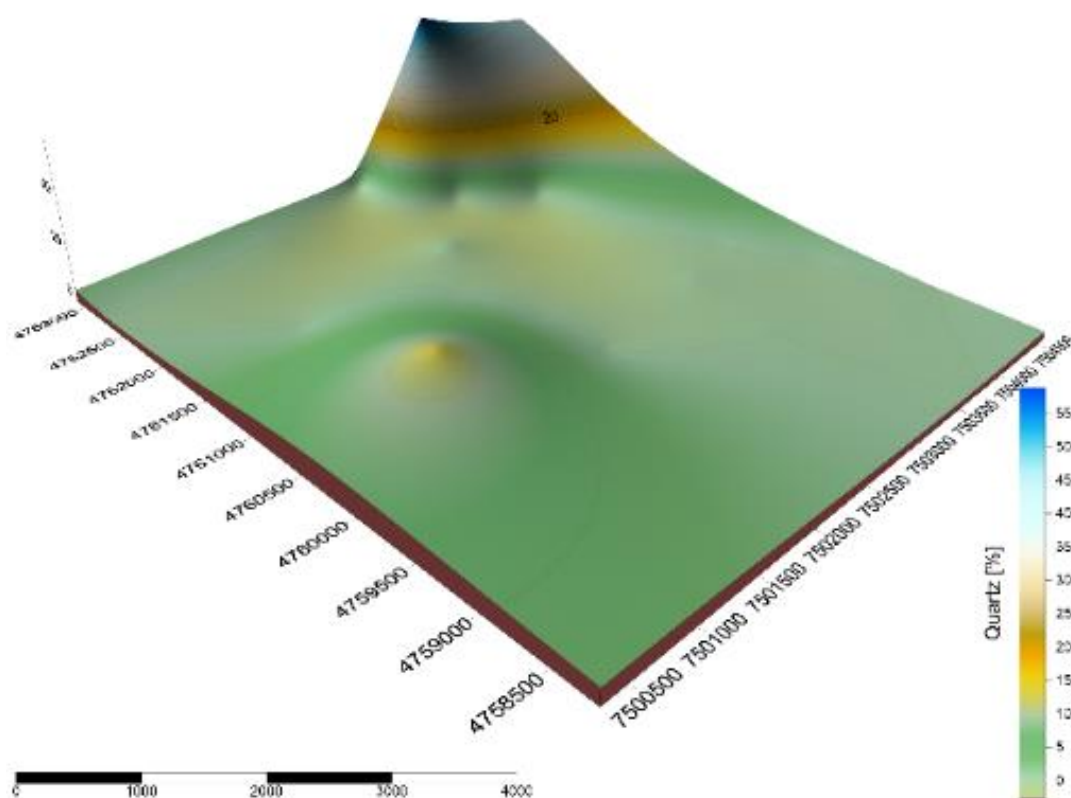
Слика 105. 3Д карта на просторна дистрибуција на Лизардит
Figure 105. 3D spatial distribution map of Lizardite

3D моделот на целокупната дистрибуција на минералот лизардит покажува широк просторен модел што е во согласност со индивидуалните политипови на други минерализации. Повисоки концентрации се наоѓаат во централните и североисточните делови од проучуваната област, што укажува дека лизардит ја претставува доминантната серпентинска фаза формирана во услови на широко распространета серпентинизација на ниски температури и низок



Шемата на дистрибуција показува изолацион максимум со брз радијацион

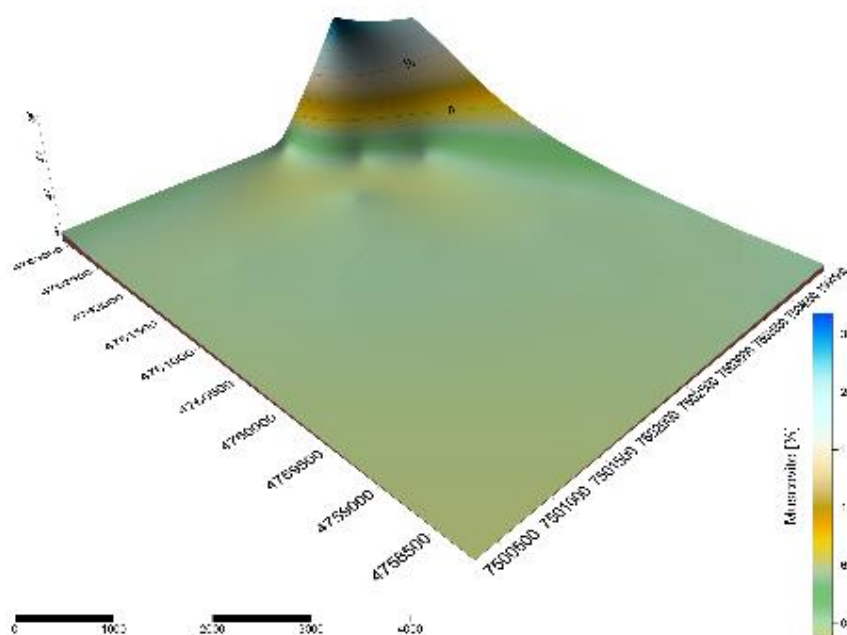
што се фрактури или зони на тектонска деформација, каде што факторите на температурата и притисокот ја фаворизирале стабилноста и создавањето на Антигоритот во однос на другите серпентинитни полиморфи.



Слика 107. 3Д карта на просторна дистрибуција на Кварц
Figure 107. 3D spatial distribution map of Quartz

3D моделот на дистрибуцијата на кварцните минерали покажува хетероген просторен модел карактеризиран со локализиран максимум изразен во централниот и јужниот сектор на проучуваната област, кој е опкружен со градиенти кои покажуваат брзо намалување кон периферијата. Оваа површинска морфологија потврдува силна структурна и геохемиска контрола врз силикатната фаза, каде што горната зона се толкува како фокален центар на хидротермална силицификација или секундарна рекристализација на силикатните минерали. Високиот интензитет на локалниот изглед и во

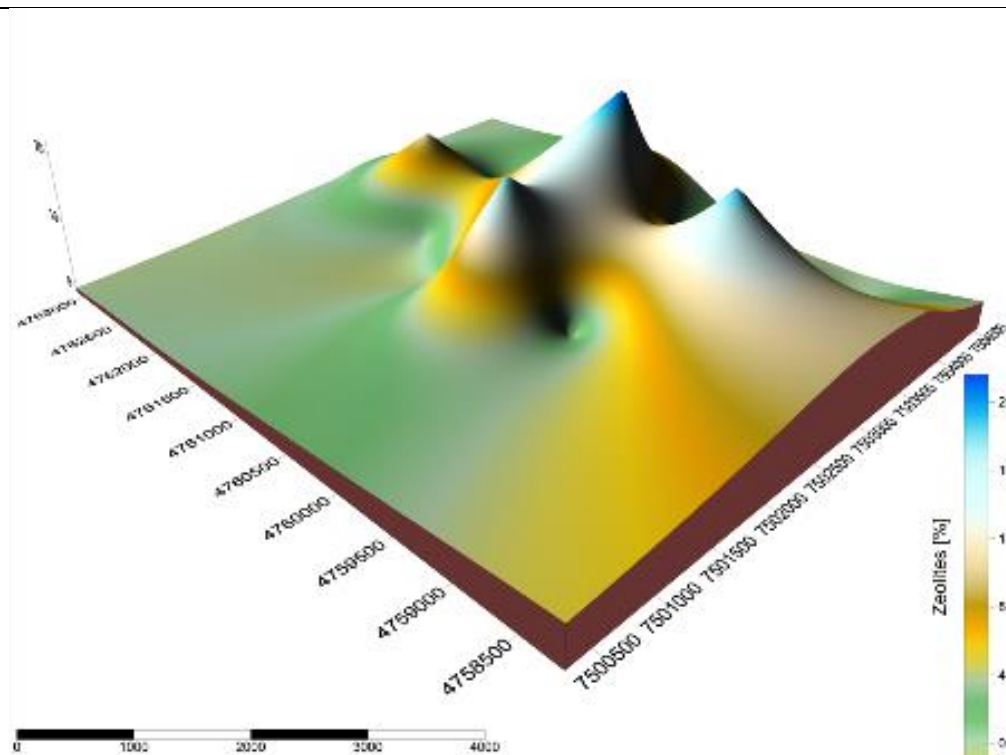
комбинација со дифузна радијална дистрибуција, укажуваат на миграција на течни маси богати со Si долж микрофрактури или тектонски контакти. Оваа просторна дистрибуција е целосно во согласност со структурно контролираните хидротермални системи, во кои промените во концентрацијата ги одразуваат промените во пропустливоста, притисокот на флуидот и термодинамичките услови за време на фазите на алтерација.



Слика 108. 3Д карта на просторна дистрибуција на Алумосиликати
Figure 108. 3D spatial distribution map of Aluminosilicate

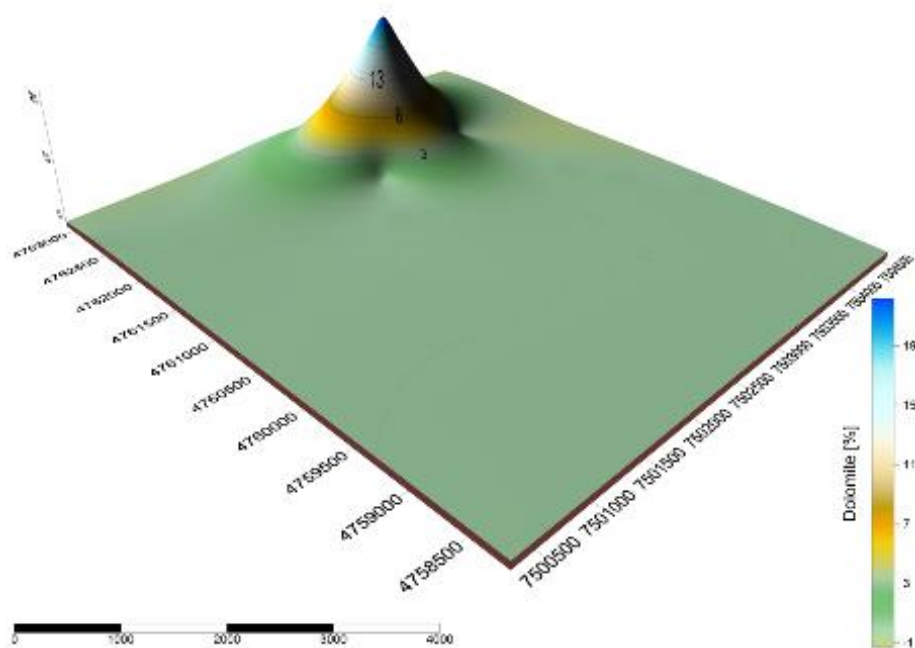
3D моделот покажува релативно хомогена просторна распределба на алумосиликатната фаза, карактеризирана со еден максимум со умерена амплитуда и благи градиенти кои постепено се намалуваат низ остатокот од проучуваната област. Оваа површинска морфологија го потврдува недостатокот на силно структурно зонирање, што укажува на систем на промена со низок до умерен интензитет, во кој хидротермалните процеси биле просторно ограничени. Осамениот врв, толкуван како точка на концентрација на локализирана локација во североисточниот сектор на областа, можеби се појавил како ограничен извор на течност во оваа област. Релативната униформност на остатокот од моделот поддржува стабилен геохемиски режим

и умерени термодинамички услови за време на формирањето, типични за промена развиена под услови на ниска температура и ограничена циркулација на течности.



Слика 109. 3Д карта на просторна дистрибуција на зеолити
Figure 109. 3D spatial distribution map of Zeolites

Присуството на зеолит во истражуваниот регион покажува хетероген просторен модел со неколку максимуми во неколку различни локални области, изразени како изолирани врвови со висока амплитуда одделени со области со ниски до умерени концентрации. Оваа морфологија тврди дека формирањето на зеолит не било единствен регионален процес, туку било контролирано од локални литолошки и структурни фактори. Присуството на овие повеќекратни врвови се толкува како присуство на области каде што циркулацијата на хидротермалните флуиди била поинтензивна, реагирајќи со процесот на кристализација на зеолитските минерали во порите што се наоѓале во таа област, како и микрофрактури или попропустливи сектори на карпата.



Слика 110. 3Д карта на просторна дистрибуција на Доломити
Figure 110. 3D spatial distribution map of Dolomites

Појавата на доломит е откриена во една зона на концентрација и опкружена со дифузен модел на дистрибуција. Овој изглед е карактеристичен за минерал формиран во секундарната фаза на локализираниот процес на карбонизација поврзан со инфилтрација на течности богати со CO_2 долж микро-фрактури. Присуството на доломит во ограничена зона сугерира локализирани метасоматски реакции помеѓу течната фаза и карбонатните компоненти во ултрамафичните карпи домаќини.

5.8. Дискусија за резултатите

Резултатите од оваа студија покажуваат дека појавата на минерали слични на азбест, кои се формирале за време на првата фаза на серпентинизација, како и силикатните минерали од втората фаза идентификувани во областа Бајгора, се потврдува дека главно биле контролирани од структурни и хидротермални фактори, што одразува зона на минерализација типична за серпентинизирани ултрамафични терани. Доминантниот изглед на хризотил во некои примероци долж фрактури и литолошки контакти потврдува дека минерализацијата не е производ на униформна фаза на кристализација, туку е резултат на процеси каде што масата на течноста е пренесена и е концентрирана во зоните на деформација. Овој модел е во согласност со структурните толкувања на глобалните серпентинизирани наоѓалишта, каде што процесот на развој на влакнести минерали е директно поврзан со тектонската еволуција на регионот.

Верификацијата и потврдата на фиброзната морфологија и составот на Mg-Si-O со XRPD и SEM-EDS анализи, поткрепени со петрографски набљудувања (Тенок пресек), ја демонстрираат веродостојноста на минералошката идентификација и ја зајакнуваат генетската интерпретација на серпентинизираниите фази. Под оптичка микроскопија, карактеристичните текстури како што се оливинските псевдоморфи, серпентинските текстури, врз основа на фиброзни ориентации и текстурни односи помеѓу примарните и секундарните фази потврдуваат дека се случил процес на серпентинизација и нивна структурна еволуција. Разликите во фазите на развој помеѓу лизардит, антигорит и хризотил укажуваат на прогресивна еволуција на процесот на серпентинизација што се случил под различни термодинамички услови, одразувајќи ги локалните промени во температурата, притисокот и активноста на флуидите за време на геолошката историја на областа. Оваа минералошка и текстурна варијабилност укажува дека системот не бил статичен, туку резултат на серија метаморфни, хидротермални фази на трансформација кои истовремено се евидентираат во хемискиот состав, кристалната морфологија и петрографската микроструктура.

Присуството на толку висок просторен процес на хетерогеност во сите минерални фази дистрибуирани во фрактури и фрагментална порозност,

особено за минералот хрисотил, потврдува дека неговата минерализација е локализирана и контролирана од структурите. Како последица на целиот овој процес, проценката на опасност не може да се базира на регионални просеци на дистрибуција, туку треба да се фокусира на детална геолошка и структурна микрозонација. Областите во близина на изложени активни фрактури претставуваат области со најголем потенцијал за ослободување на влакнеста маса, особено кога се присутни антропогени фактори како што се ерозија, градежни активности, сечење на терен или рударски операции.

Од еколошка перспектива, оваа студија потврдува дека самото присуство на азбест во карпите не претставува автоматски еколошка или здравствена опасност, туку потенцијална опасност, додека вистинската опасност е одредена од условите на изложеност, мобилизација и транспорт на влакната во околната средина. Оваа концептуална разлика е од суштинско значење за толкувањето на тврдењата на високо ниво и за нивната имплементација во планирањето на користењето на земјиштето и управувањето со животната средина во проучуваната област.

Во поширок научен контекст, областа Бајгора претставува природен систем и модел на локација за проучување на интеракциите помеѓу тектонските, минералошките и геоеколошките процеси во ултрамафичните терени. Интеграцијата на аналитички, петрографски и геостатистички методи во оваа студија ја покажува важноста на мултидисциплинарен пристап кон толкувањето и минерализацијата на азбестните форми и нивната проценка врз основа на еколошките импликации што тие можат да ги имаат.

6. ЗАКЛУЧОЦИ И ПРЕПОРАКИ

6.1. Заклучоци

Резултатите од оваа студија потврдуваат дека областа Бајгора претставува типична ултрамафична геолошка средина развиена во рамките на сегмент изграден од сложени структури на офиолитскиот појас поврзан со вардарската област, каде што литолошките, структурните и метаморфните конфигурации создале поволни услови за формирање и зачувување на азбестната минерализација. Доминацијата на серпентинизирани ултрамафични карпи, како и присуството на добро развиени фрактурни системи, директно ја контролирале миграцијата на хидротермалната флуидна маса и процесите на развиена минерална кристализација, играјќи клучна улога во просторната распределба на серпентинските фази и локализацијата на фиброзната минерализација.

Хрисотилот е идентификуван како главна и најопасна азбестна фаза во оваа област, лоцирана главно по тектонските структури како што се фрактури, зони на смолкнување и литолошки контакти, што јасно укажува на структурна контрола врз процесот на минерализација. Неговата дистрибуција беше хетерогена, карактеризирана со фрагментиран модел, што укажува дека минерализацијата е локализирана и зависи од микрогеолошките услови, а не претставува униформен регионален феномен. Овој модел на дистрибуција сугерира дека областите со повисоки концентрации на азбестни влакна се совпаѓаат со сектори со поинтензивна тектонска деформација и поголема пропустливост за циркулација на флуиди. Минералешките и микроморфолошките анализи извршени со употреба на XRPD и SEM-EDS техники постојано го потврдуваат идентитетот на серпентинските фази, нивната карактеристична фиброзна морфологија и доминантниот Mg-Si-O хемиски систем, со сигурност потврдувајќи ја азбестната природа на влакната и јасно разликувајќи ги главните серпентински полиморфи. Петрографските податоци ги поткрепуваат овие резултати со откривање на типични текстури на прогресивна серпентинизација, вклучувајќи мрежни структури, псевдоморфи и преферирани минерални ориентации кои ја документираат постепената трансформација на примарните ултрамафични минерали како што се оливинот и пироксените во секундарни серпентински фази. Процесот на минерализација е тесно поврзан со

прогресивната хидротермална серпентинизација што се случила под релативно ниски до умерени услови на температура и притисок и била поврзана со тектонска деформација и циркулација на течности богати со Mg и Si.

6.2. Препораки

Врз основа на добиените минералошки, петрографски и просторни аналитички резултати, се препорачува идните истражувања во регионот Бајгора во ултрамафични терени да се базираат на националните стратегии за животна средина, користејќи напредни аналитички техники за подобро разбирање на дистрибуцијата на минерали што содржат азбест на површини поголеми од површината опфатена со оваа студија. Зголемувањето на густината на земање примероци, особено во периферните и структурно сложените области, ќе ја подобри точноста на просторната интерполација и ќе ја намали неизвесноста во предикативните модели. Понатаму, тродимензионалното геолошко моделирање што ги интегрира структурните податоци, литолошките контакти и минералошките распределби ќе ги подобри генетските толкувања и ќе овозможи попрецизно одредување на дистрибуцијата на минерализацијата. Исто така, се препорачуваат регионални компаративни студии во други ултрамафични појаси за да се воспостават пошироки генетски корелации и да се усовршат моделите на минерализација поврзани со серпентинизацијата.

Препораки за користење и планирање на земјиштето

Резултатите од оваа студија ја покажуваат важноста на интегрирањето на податоците поврзани со опасностите во планирањето доколку се планира користење на земјиштето и развој на инфраструктурата во областа на проучување. Се препорачува мапите на опасности генерирани од базата на податоци добиени од минералошки и геостатистички анализи да бидат вклучени во регионалното просторно планирање и процедурите за проценка на влијанието врз животната средина. На сите градежни, ископувачки и сечечки активности на патишта во ултрамафични терени во оваа област треба да им претходат детални геолошки проценки со цел да се спречи непотребно изложување на карпи што содржат азбест. Треба да се воспостават заштитни тампон зони и јасно да се означат околу местата со високи концентрации на влакнести минерали и треба да се спроведат специфични упатства за

регулирање на користењето на земјиштето во овие и слични области. Вклучувањето на геолошките зонирања на опасностите во општинските и националните стратегии за планирање значително би ја намалило можноста за неконтролирана изложеност.

Институционални и регулаторни препораки

На институционално ниво, силно се препорачува да се воспостави национална база на податоци за појава на природен азбест (NOA). База на податоци што треба да интегрира геолошки, минералошки, еколошки и просторни информации, поддржувајќи ги процесите на донесување одлуки во подобро управување со животната средина, развој на инфраструктурата и заштита на животната средина, што директно би влијаело на јавното здравје. Во сите лаборатории треба да се имплементираат стандардизирани аналитички протоколи за идентификација и известување за минерален азбест, со што ќе се обезбеди конзистентност, репродуктивност и споредливост на резултатите.

Треба да се развијат програми за обука за градење на човечки капацитети и технички персонал, инспектори за животна средина и општински власти за подобрување на знаењето за литологиите што содржат азбест и спроведување на превентивни мерки. Интердисциплинарната соработка помеѓу геолошките истражувања, агенциите за животна средина, универзитетите и јавните здравствени установи е од суштинско значење за ефикасно следење и намалување на опасност.

Препораки за идни насоки за истражување

Идните истражувања што се занимаваат со ова прашање треба да се фокусираат на мултидисциплинарни истражувања што комбинираат структурна геологија, минералологија, геохемија на животната средина и моделирање на атмосферскиот транспорт за да се квантифицира мобилноста на влакната и патиштата на изложеност. Изотопските и студиите за вклучување на флуиди можат да обезбедат дополнителен увид во физичко-хемиските услови што лежат во основата на формата и начинот на формирање на минерали, додека геомеханичките анализи можат да ја разјаснат врската помеѓу деформацијата на карпите и потенцијалот за ослободување на влакна. Проширувањето на

истражувањето треба да вклучи и хидрогеохемиски истражувања, што исто така би било многу вредно при проценката дали азбестните влакна можат да се транспортираат преку подземни води или површински водни системи, со оглед на тоа што целиот воден систем на регионот за потребите на луѓето и животните се снабдува од природни ресурси. Базата на податоци интегрирана со претходните податоци ќе биде подобрена и значително ќе ја зголеми предвидливата моќ и сигурноста на оценките на опасност.

7. ЛИТЕРАТУРА

2003/18/EC. (2023). Commission Directive 2003/18/EC of 27 March 2003 amending Council Directive 83/477/EEC on the protection of workers from the risks related to exposure to asbestos at work. Official Journal of the European Union.

Alastair Robertson, M. S. (2002). Mesozoic–Tertiary evolution of Albania in its regional Eastern Mediterranean context. . *Tectonophysics*, 197-254.

Aleksandar Ilic, F. N. (2005). Late Paleozoic–Mesozoic tectonics of the Dinarides revisited: Implications from 40 Ar/ 39 Ar dating of detrital white micas. *Geology*.

Alessandra Ceci, G. C. (2025). Microstructural and XRD Investigations on Zn After Plastic Deformation, .

Alfredo Argani, A. (2018). Subduction Evolution of the Dinarides and the Cretaceous Orogeny in the Eastern Alps. *Hints From a New Paleotectonic Interpretation*.

Alloway, B. J. (2013). Sources of Heavy Metals and Metalloids in Soils. . *Heavy Metals in Soils*.

Areej Adra, A. (2022). Hydrogeochemical characteristics of groundwater in the Bassit ophiolitic area, northwestern Syria. . *Journal of Geoscience and Environment Protection*.

Asvesta, A. (2025). Geochemistry and Petrogenesis of Permo–Triassic Silicic Volcanic Rocks from the Circum-Rhodope Belt in the Vardar/Axios Zone, Northern Greece: An Example of a Post-Collision Extensional Tectonic Setting in the Tethyan Realm. *Geoscience*.

B. G. Dayanand, S. S. (2023). Geochemical Orientation Study of Stream Sediment Samples in the Southern Part of Nuggihalli Schist Belt: Ore Mineral Phases and Their Implications on the Bedrock Potential for Ores. *Open Journal of Geology*.

Bahri Sinani, B. B. (2025). Distribution of Naturally Occurring Asbestos in the Mitrovica Region: Geochemical and Mineralogical Characterization. . *Geosciences*.

Bank, W. (2020). *Kosovo Systematic Country Diagnostic Update*. DC: Washington.

Bloise, A. C. (2016). Naturally occurring asbestos (NOA) in rock and soil and relation with human activities. *Italian Journal of Geosciences*.

- Burbank, D. W. (2013). Tectonic Geomorphology. *Environmental & Engineering Geoscience*.
- Caterina Rinaudo, D. G. (2003). Characterization of chrysotile, antigorite and lizardite by FT-RAMAN spectroscopy. . *The Canadian Mineralogist*.
- Chan-Soo Park, H.-S. S. (2016). Trace element analysis of whole-rock glass beads of geological reference materials by Nd:YAG UV 213 nm LA-ICP-MS. . *Journal of Analytical Science*.
- Chinner, G. A. (1196). Serpentinites. Records of Tectonic and Petrological History. *Cambridge University Press*.
- Elezaj. (2008). *Geology of Kosovo*. Prishtina: Faculty of Mining and Metallurgy.
- Evans, B. W. (2010). The Serpentinite Multisystem Revisited, Chrysotile Is Metastable. *International Geology Review*.
- G.M Stampfli, G. B. (2002). A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary Science*.
- Geoffrey S. Plumlee. (2007). The medical geochemistry of dusts, soils, and other Earth materials. . *Treatise on Geochemistry*.
- Geological, I. f. (1984). *Study of Asbestos in Kosovo*. . Prishtina.: Institute for Geological and Geophysical Research.
- George 'mathias K. R. Montgomery David, H. P. (2016). Geomorphic classifacation of rivers and streams. *Tools in Fluvial Geomorphology*.
- Georges Martial Ndzana, G. M. (2021). Studying the application and advances of diffusive gradients in thin films techniques (DGTs) to constrain mobility and bioavailability of heavy metals in soils. Green and Sustainable Chemistry. *Journal of Geoscience*.
- Gergely Zoltán Macher, A. T. (2025). Examining the Environmental Ramifications of Asbestos Fiber Movement Through the Water–Soil Continuum:. . *Int. J. Environ. Res. Public Health*.

- Goldstein, J. I. (2003). Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. *Springer*.
- Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for Natural Resource Evaluation. Technometrics, . *Oxford University Press*.
- Gualtieri, A. (2012). Mineral fibre-based building materials and their health hazards. . *Toxicity of Building Materials*.
- Gültekin Topuz, Ö. F. (2013). Jurassic ophiolite formation and emplacement as backstop to a subduction-accretion complex in NE Turkey and relation to the Balkan ophiolites. . *American Journal of Science*.
- Harper, M. (2008). Naturally occurring asbestos. . *Journal of Environmental Monitoring*.
- Harrison, E. B.-W. (2009). Serpentine Geoecology of Western North America: Geology, Soils, and VegetationGeology, Soils, and Vegetation. . *Oxford University Press*.
- Humans, I. W. (2012). Arsenic, Metals, Fibres and Dusts. . *International Agency for Research on Cancer*.
- Islam, M. (2016). Environmental Study on a Coastal River of Bangladesh with Reference to Irrigation Water Quality Assessment: A Case Study on Shailmari River, Khulna. . *Journal of Geoscience and Environment Protection*.
- Julien Roux, J. C.-Y.-Y.-R. (2019). A new bi-frequency soil smart sensing moisture and salinity for connected sustainable agriculture. *Journal of Sensor Technology*.
- Karalis, S. (2014). Assessment of the Relationships among Catchments' Morphometric Parameters and Hydrologic Indices. *International Journal of Geosciences*.
- Karamat Ali, R. M. (2017). Morphometric analysis of Gilgit River Basin in mountainous region of Gilgit-Baltistan Province, northern Pakistan. *Journal of Geoscience and Environment Protection*.

- Karamata, S. (2006). The geological development of the Balkan Peninsula related to the approach, collision and compression of Gondwanan and Eurasian units. *Google Scholar*.
- Kepuska, H. (1984). *Climatic and geographic characteristics of the Bajgora region. Mitrovica: Regional Geographical Study*. Mitrovica: University of Mitrovica.
- Klein, C. &. (2007). *The Manual of Mineral Science* (23rd ed.). John Wiley & Sons.
- Kosovo, S. A. (1982). *Electronic system for the management of archival materials*. Prishtina. Kosovo,: State Archive of Kosovo.
- Long, K. R. (2010). *The principal rare earth elements deposits of the United States: A summary of domestic deposits and a global perspective*. U.S. Geological Survey. .
- Małgorzata Krówczyńska, B. Z. (2019). Modelling the Spatial Distribution of Asbestos-Cement Products in Poland with the Use of the Random Forest Algorithm. *Sustainability*.
- Margono, C. J. (1999). Malcolm, Noel. Kosovo: A Short History. New York: New York University Press, 1998. . *Journal of Conflict Studies*.
- Meholli, B. (2014). *Ophiolitic Magmatism and New Magmatism in the Bajgora Region, Mineral Resources Associated*. . Tirana: Polytechnic University of Tirana.
- Mellini, M. (2013). *Structure and microstructure of serpentine minerals*. Pisa-Italy: European Mineralogical Union Note (Capter 5).
- Mukasa-Tebandeke, I. Z. (2015). The elemental, mineralogical, IR, DTA and XRD analyses characterized clays and clay minerals of Central and Eastern Uganda. . *Advances in Materials Physics and Chemistry*.
- MDP (2020) - Evaluation report of the Municipal Development Plan (MDP) of South Mitrovica. *Plan 2020-2028*.
- Nicholson, W. J. (2001). The carcinogenicity of chrysotile asbestos. . *Ind Health*.
- Orenstein, M. R. (2000). Environmental asbestos exposure and mesothelioma. Current Opinion in Pulmonary Medicine. *Pulmonary Medicine*.

- Pauline Merrot, P. F.-M.-M. (2011). Bioavailability of chromium, nickel, iron and manganese in relation to their speciation in coastal sediments downstream of ultramafic catchments: A case study in New Caledonia. . . *Applied Geochemistry*.
- Peter Downs, D. B. (2011). Geomorphology in environmental management. . *Oxford Academic Journals*.
- Philippe Freyssinet, A. S. (2000). Geochemical mass balance and weathering rates of ultramafic schists in Amazonia. . *Chemical Geology*.
- Rafael S. Barboza, R. V. (2014). Air Basins of Rio de Janeiro State, Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*.
- Risto Stojanov, R. (1997). Alpine plutono-magmatism and metamorphism in the south-eastern parts of the Vardar Zone and the Serbo-Macedonian Massif. In Magmatism, metamorphism and metallogeny of the Vardar Zone and the Serbo-Macedonian Massif.
- Robertson, A. H. (2002). Overview of the genesis and emplacement of Mesozoic ophiolites in the Eastern Mediterranean Tethyan region.
- Roger LeB. Hooke, R. L. (2000). On the history of humans as geomorphic agents. *GeoScienceWorld*. .
- Ross, M. &. (2001). Occurrence, production and uses of asbestos. . *Canadian Mineralogist*.
- Schmid, S. M. (2008). The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: Correlation and evolution of tectonic units. . *Swiss Journal of Geosciences*.
- Sinani, B. (2026). Environmental geological assessment of naturally occurring asbestos based on mineralogical and spatial analysis: The Bajgora-Mitrovicë Area, Kosovo. . *Min. miner. depos*.
- Stefan M. Schmid. (2020). Tectonic units of the Alpine collision zone between Eastern Alps and western Turkey. *Elsevier*.
- Stéphane Guillot, S. (2013). Serpentinites: Essential roles in geodynamics, arc volcanism, sustainable development, and the origin of life. *Elements*.

- Team, U. N. (2023). *Kosovo Team Annual Results Report*. . Prishtina: United Nations.
- Virta, R. L. (2002). *Asbestos: Geology, Mineralogy, Mining, and Uses*. U.S. Geological Survey.
- Wilk.E., K. Z. (2019). Modelling the Spatial Distribution of Asbestos-Cement Products in Poland with the Use of the Random Forest Algorithm. *Sustainability*.
- Yildirim Dilek, H. F. (2011, (3-4): 387–411). Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *GSA Bulletin*.
- Ziegler, G. S. (2007). The Medical Geochemistry of Dusts, Soils, and Other Earth Materials. *Treatise on Geochemistry*.