

Debreceni Egyetem
Természettudományi és Technológiai Kar
Földtudományi Intézet



Két szaharai kondrit összehasonlító genetikai vizsgálata

OTDK-dolgozat

Küzmös Balázs

III. évf. Földtudomány BSc

Témavezetők:

Dr. Benkó Zsolt
tanszékvezető egyetemi docens
DE-TTK

Dr. Szabó Gergely
egyetemi docens
DE-TTK

Konzulens:
Dr. Molnár Kata
tudományos főmunkatárs
HUN-REN Atomki

A dolgozat lezárásának dátuma: 2025. január 5.

Debrecen, 2025

Tartalomjegyzék

Absztrakt	3
1. A meteoritok.....	4
2. A kondritok keletkezése, jelentőségük, a kutatás célja	5
3. Az osztályozás módszertana.....	7
3.1. Kondritcsoport.....	7
3.2. Petrológiai osztály	8
3.3. Sokkoltsági fok.....	9
3.4. Mállottsági fok	10
4. Vizsgálati módszerek	11
4.1. Polarizációs mikroszkópos vizsgálatok.....	12
4.2. Elektron mikroszonda (EPMA) vizsgálatok.....	12
4.3. Teljes kőzetkémiai analízis	13
5. Eredmények.....	13
5.1. Makroszkópos leírás.....	13
5.1.1. NWA1	13
5.1.2. NWA2	14
5.2. Polarizációs mikroszkópos leírás	14
5.2.1. NWA1	14
5.2.2. NWA2	16
5.3. A meteoritok kémiai összetétele az EPMA vizsgálatok alapján	18
5.3.1. NWA1	18
5.3.2. NWA2	21
5.4. Teljes kőzetkémiai elemzések	25
5.4.1. NWA1	25
5.4.2. NWA2	25
6. Diskusszió.....	28
6.1. Az NWA1 és NWA2 meteoritok osztályozása	28
6.1.1. NWA1	28
6.1.2. NWA2	31
6.2. NWA1 és NWA2 keletkezése, fejlődéstörténete.....	33
7. Köszönetnyilvánítás	36
8. Irodalomjegyzék.....	37

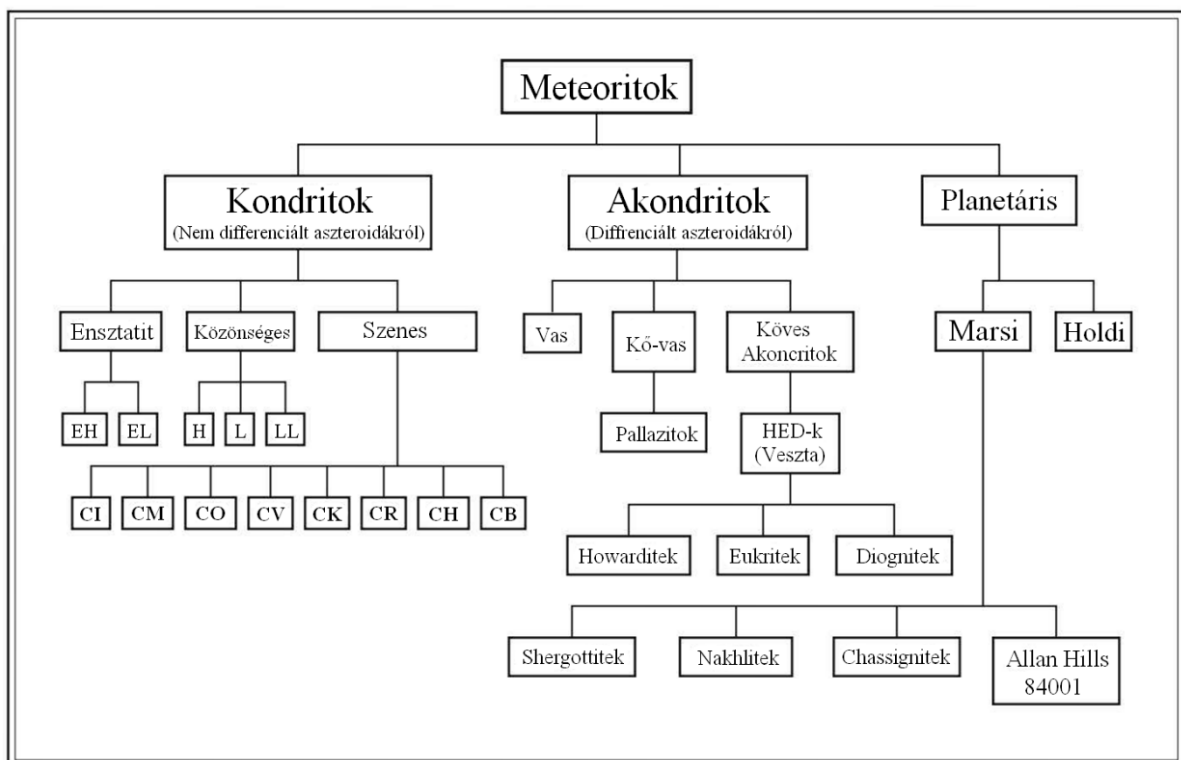
Absztrakt

Kutatásom során témavezetőm által rendelkezésemre bocsátott két, szaharai eredetű meteoritot vizsgáltam meg petrográfiai, ásványtani és geokémiai szempontból. Célom az osztályozatlan NWA1 és NWA2 munkanevű kőmeteoritokkal azok elhelyezése a meteoritok rendszerében és keletkezésük körülményeinek minél pontosabb megismerése volt. Polarizációs mikroszkóppal végzett petrográfiai vizsgálatok alapján mindkét meteoritban sikerült kondrumokat és az őket körülvevő alapanyagot elkülönítenem, tehát a meteoritok a kőmeteoritokon belül a kondritokhoz tartoznak. A kondrumok döntően olivint és rombos piroxént, az alapanyag olivint, orto-, és klinopiroxént, Fe-Ni ötvözetet, valamint plagioklászot tartalmaztak. A mintákat sűrűn átmetsző erekben Fe-oxidok-hidroxidok jelennek meg. Az olivinben szabálytalan és planáris törések kisfokú sokkmetamorfózisra utalnak. A kondrumok nagy mérete és méreteloszlása a kis méretű kondrumok felemésződésére utal. Mikroszondás vizsgálatok alapján mindkét meteoritban az olivin forsterites (NWA1: $\text{Fa}_{18,4}$ és NWA2: $\text{Fa}_{24,7}$) az ortopiroxének pedig ensztatitos (NWA1: $\text{Fs}_{16,8}$ és NWA2: $\text{Fs}_{21,6}$) összetételűek. A plagioklászok mindkét mintában oligoklászos (NWA1: $\text{An}_{10,7}\text{Ab}_{83,3}\text{Or}_6$ és NWA2: $\text{An}_{10,7}\text{Ab}_{82,3}\text{Or}_6$) összetételűek. A minták ritkaföldfém koncentrációja nagyon alacsony ($\Sigma\text{RFF}_{\text{NWA1}}$: 4,82 ppm és $\Sigma\text{RFF}_{\text{NWA2}}$: 5,55 ppm), eloszlásuk a könnyű ritkaföldfémek nagyon enyhe dúsulását mutatja. A petrográfiai és geokémiai jellemzők alapján az NWA1 meteorit egy magas vastartalmú, viszonylag nagy fokú termális kiegyenlítettséget tükröző, gyengén sokkolt, gyengén mállott közönséges H-kondrit. Az NWA2 meteorit egy alacsony vastartalmú, nagy fokú termális kiegyenlítettséget tükröző, gyengén sokkolt, közepesen mállott közönséges L-kondrit, ám ezen besorolás bizonyosságát ellentmondó kőzetkémiai adatok nehezítik, melyek tisztázásához további vizsgálatokra van szükség. Ezt követően a felsorolt tulajdonságok alapján névvel láttam el a meteoritokat. Az így kapott nevek: NWA1: *H5S3W2*, valamint NWA2: *L(?)6S3W3*. Szülő égitestjük hasonló, a bolygóképződés korai stádiumában megrekedt nem differenciálódott planetezimális lehetett. Földi tartózkodási idejük a mállottsági állapotuk alapján NWA1: 5 000 – 15 000 év, NWA2: 15 000 – 30 000 év között lehet.

1. A meteoritok

A meteoritok olyan Földre (vagy más bolygóra, holdra, aszteroidára...) érkezett extraterresztrikus kőzetek, melyek másik szülő égitesten keletkeztek és becsapódásukkor nem semmisültek meg. Származási helyük kis híján bármely Naprendszeren belüli szilárd felszínnel rendelkező égitest lehet. Három fő típust különböztetünk meg: a főként szilikátásványokból felépülő kő, a részben szilikátokból, részben vas-nikkel ötvözetből álló kő-vas és a vas-nikkel által dominált vasmeteoritokat. A felépítő anyagokon kívül a meteoritok meghatározó tulajdonsága a szülő égitestjük termális állapota, amely szerint elkülöníthetünk differenciált, és nem differenciált aszteroidákat (1. ábra).

A legtöbb meteorit a földi légkörbe lépése során felizzik és megsemmisül, ám a szerencsés mérettel és röppályával rendelkező darabok szárazföldre érnek, ahol aztán akár évezredekkel később begyűjtésre kerülnek és tudományos intézetekbe jutnak. A meteoritok fontos eszközei a Naprendszer megértésének; időkapszulaként zárták magukba a keletkezési körülményeikre és az azt követő évmilliókra jellemző állapotokat, melyek tanulmányozásával fényt deríthetünk a Föld és a Naprendszer többi bolygójának keletkezésére és fejlődéstörténetére, az azokat alakító és formáló külső és belső folyamatokra.



1. ábra A meteoritok osztályozása szülő égitestjeik alapján, GREGORY (2020) alapján

2. A kondritok keletkezése, jelentőségük, a kutatás célja

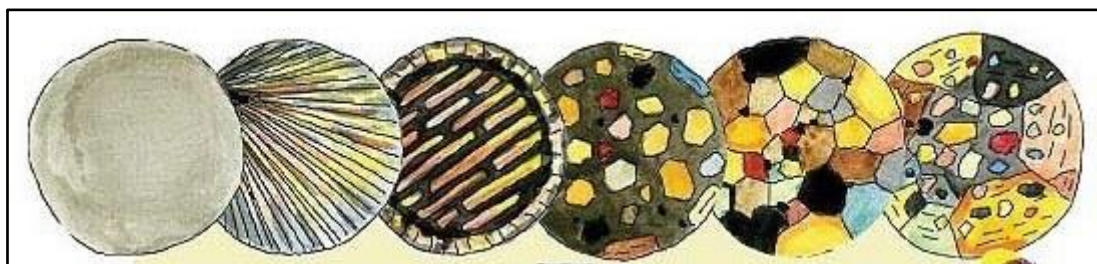
A kondritok olyan kőmeteoritok, melyek a Naprendszer fejlődéstörténetének korai szakaszából (4,6 milliárd év) származnak és amelyeket a szülő égitest kicsiny mérete miatt nem érintett számottevő olvadás és differenciálódás. Ezen behatások elmaradásának eredményeképp a kondritokban javarészt megőrződtek azok a korai ásványfázisok, amelyek a Nap körül keringő első szilárd anyagokként keletkeztek, betekintést engedve ezzel a fiatal, formálódó Naprendszeren belüli körülményekre.

Egy kondritot két fő összetevő alkot: a névadó kondrumok és az azokat körülvevő mátrix. A finom szemcsés mátrix mindössze (jellemzően olivin, plagioklász, piroxének, vas-oxidok, szulfidok) a szövet 10-15%-át tölti ki, míg a maradékot a néhány tizedmilliméterestől a centiméteres nagyságúig terjedő kondrumok („magok”) adják. A kondrumok olyan egykor a Nap körül keringő ásványhalmazok (például olivin, piroxén), melyek a fiatal Napot körülvevő, homogén összetételűnek tekinthető por és gázfelhőből származnak (WOOD, 2005) és amelyeket valamilyen erőhatás, pl. napkitörés megolvasztott, létrehozva ezzel a szilárdulás után is megmaradó gömb alakot. Egy kondritban a kőzetet ért hatások függvényében hat különálló kondrumtípussal találkozhatunk, melyek az üveges/kriptokristályos, excentro-radiális, lemezes-pálcás-rudas, porfíros, szemcsés és poikilites (2. ábra; BÉRCZI, 2007). Az így keletkezett gömböcskék a világűrben sodródtak, ütközések során összetapadtak, tovább nőttek, mígnem megalkották a Naprendszer első kőzeteit. Később ezen korai égitestek radiogén izotópok bomlásából származó hőmérséklet hatására, esetleg a saját méretüknek köszönhetően felmelegedtek, minek eredményeként metamorf folyamatok indultak el bennük. Kellő méret esetén a bolygókezdemények formálásában a magmás folyamatok is részt vettek.

Kivételes esetekben egyes „primitív” meteoritok (pl. Kabai meteorit: OTT ET AL., 2018; Allende meteorit: BLENDER & FUCHS, 1975) közvetlen a csillagrendszert létrehozó szupernovarobbanások anyagából származó primer alkotókat (CAI zárványok, gyémánt, grafit, SiC, stb.) is megőrizhetnek (MARROCHI ET AL., 2015). Ezen ősi anyagok nemesgázizotópos vizsgálata magyarázatot adhat a szupernova robbanás előtt, alatt és után bekövetkező nukleoszintetikus (s-, p reakciók) folyamatokra (GILMUR, 2010). Más szerves anyag tartalmú szenes kondritok akár a földi élet eredetének megértésében is szerepet játszhatnak (WAAJEN ET AL., 2024; OBA ET AL., 2021). Ahhoz, hogy eldönthessük, hogy egy véletlenszerűen talált meteorit milyen további kozmokémiai kutatásokra használható fel, meg kell ismerni a minták alapvető ásványtani, kőzettani és geokémiai jellegzetességeit.

Leggyakoribb felfedezési helyük a sivatagok, amelyekben a körülmények lehetővé teszik az ezen extraterresztrikus kőzetek konzerválódását, akár több tízezer évre. A két fő sivatagi környezet, mely a legtöbb meteoritot szolgáltatja az Antarktis és a Szahara. Tekintve az Antarktis korlátozott megközelíthetőségét, az innen érkező valamennyi meteorit egyértelmű tudományos céllal került begyűjtésre, jól dokumentált környezettel és körülményekkel. Nem mondható el ugyanez viszont a Szaharában, gyakran az ott élő emberek, esetleg kimondottan ezzel a céllal odaérkezett kincskeresők által begyűjtött meteoritokról. Az innen származó kőzetek sokszor bármiféle dokumentáció vagy besorolás nélkül kerülnek magángyűjtőkhöz, tudományos intézetekhez. Gyakran nincs információ a meteorit megtalálásának pontos helyéről, legrosszabb esetben még a kőzet extraterresztrikus eredetében sem lehetünk biztosak. Reflektálva az ezeket a meteoritokat körülvevő bizonytalanságra, a Szaharából érkező példányok az „unclassified NWA”, esetleg csak simán „NWA” (Northwest Africa – Északnyugat-Afrika) nevet viselik.

Jelen dolgozat célja a Dr. Szabó Gergely témavezetőm által rendelkezésemre bocsátott két, be nem sorolt NWA meteorit (a továbbiakban NWA1 és NWA2) ásványtani, közettani és geokémiai elemzése és átfogó leírása. Mindezek alapján a meteoritok által elszenvedett sokk-metamorfózis és földi eredetű mállottság fokának meghatározása, valamint a meteoritok beillesztése a megfelelő rendszertani kategóriákba. Céлом továbbá a jelen dolgozatban leírt meteoritok adatainak a Meteoritical Society által kezelt Meteoritical Bulletin nevű nyilvános adatbázisba juttatása.



2. ábra A hat fő kondruntípus, balról jobbra: üveges/kriptokristályos, excentro-radiális, lemezes-pálcás-rudas, porfiros, szemcsés és poikilites (BÉRCZI, 2007)

3. Az osztályozás módszertana

Kutatásom célja a rendelkezésre álló meteoritok osztályba (pl. kő/kő-vas/vas meteorit), majd további petrológiai és kémiai adottságok alapján csoportba sorolása. A helyes besoroláshoz szükséges vizsgálat továbbá a meteorit által elszenvedett sokk-metamorfózis, valamint a Földön bekövetkezett mállás mértékének megállapítása.

Nemzetközi szabványok szerint a besorolás a következő módon történik:

- A meteorit megtalálásának helyéhez köthető jelentős földrajzi név (amennyiben van ilyen)
- Kondritcsoport, petrológiai osztály (betű-szám)
- Sokkoltsági fok (betű-szám)
- Mállottsági fok (betű-szám)

Ennek megfelelően egy nevezéktani példa: Csátalja H4 S2 W2. Az így kapott kombinációból könnyen azonosíthatóak a meteoritra jellemző legfontosabb tulajdonságok.

3.1. Kondritcsoport

A Földre hulló meteoritok 87%-a kondrit (kondrumokat tartalmazó, főként olivinból, piroxénből, földpátból, vas-nikkelből és vas-oxidból felépülő kőmeteorit). Ezen belül is mesze a leggyakoribbak a közönséges kondritok, melyeket a „H” (olivin-bronzit), „L” (olivin-hipersztén) és „LL” (amfoterit) csoportok alkotnak. A kondritok közé tartoznak továbbá a szenes kondritok, az enstatit kondritok, valamint az egyéb, nagyobb osztályokba nem illő csoportok (pl.: Rumuruti-szerű, Kakangari-szerű).

A közönséges kondritok fő jellemzője a nagy számban és változó méretben jelenlévő kondrumok, melyeket a jelentősen kisebb térfogatú mátrix foglal magába. A primitív kondritokkal szemben a CAI-k (kalcium-alumínium gazdag zárvány) és az AOA-k (amőboid olivin aggregátum) megjelenése igen ritka ezen csoportokban ($<<1\text{ vol}\%$) (WEISBERG ET AL, 2006).

A jelen dolgozatban elemzett kondritokat a VAN SCHMUS & WOOD által 1967-ben meghatározott paraméterek alapján (1. táblázat), valamint teljes kőzetkémiai vizsgálatok eredményei szerint soroltam be megfelelő csoportokba. Tekintve, hogy egy meteorit több

petrológiai csoport jellemzőit is hordozhatja, a kémiai analízis pedig nem minden esetben ad minden igényt kielégítő eredményt, a lehető legbiztosabb osztályozás érdekében oxigén izotópos mérések is segédkezhetnek a rendszertani besorolásban.

Group	Fe/SiO ₂ ⁽²⁾	Fe ⁰ /Fe ^(2,3)	Fa ⁽⁴⁾	SiO ₂ /MgO ⁽²⁾
E	0.77⁽⁵⁾	0.80⁽⁵⁾	0	1.90⁽⁵⁾
	±0.30	±0.10		±0.15
C	0.77	—	—	1.42
	±0.07			±0.05
H	0.77	0.63	18	1.55
	±0.07	±0.07	±2	±0.05
L	0.55	0.33	24	1.59
	±0.05	±0.07	±2	±0.05
LL	0.49	0.08	29	1.58
	±0.03	±0.07	±2	±0.05

1. táblázat VAN SCHMUS & WOOD (1967) által meghatározott, kondritokra vonatkozó kémiai paraméterek

3.2. Petrológiai osztály

Egy meteorit szövete a szülő égitesten végbemenő termális, vagy víz által okozott átalakulási folyamatok hatására megváltozhat. VAN SCHMUS & WOOD 1967-es tanulmányukban olyan többlépcsős skálát alakítottak ki, mely során hat egymást követő, kémiai összetételtől független petrológiai osztályt különítettek el. A legkisebb átalakulást szenvedett meteoritok a 3-mas petrológiai osztályba tartoznak. Az 1. és 2. oszlopok hidrotermás átalakulásra utalnak, míg a 4-es kategóriától felfelé a szülő égitestet ért termális átalakulás mértéke szerint kerülnek osztályozásra a meteoritok. Az így kapott táblázatot a későbbiekben SEARS & DODD (1988), BREARLY & JONES (1998), valamint WEISBERG ET AL. (2006) tovább bővítette, létrehozva egy hetedik oszlopot is, amelyet az eredeti kondritos szövet teljes eltűnésével hoztak kapcsolatba (2. táblázat).

A szülő égitest felmelegedésének mértékétől függően a mátrix átkristályosodhat, a jól definiált kondrumok körvonalai „elmosódhatnak”, az alacsony Ca-tartalmú monoklin piroxének rombos piroxénekké alakulhatnak. Nagyobb mértékű felmelegedésnél gyakran megjelennek a másodlagos, átkristályosodással keletkező, 50 µm-nél nagyobb földpátszemcsék, a kémiai zonációt mutató olivin kristályok pedig összetételükben

homogenizálódnak. Kellően nagy hőhatást követően a kondrit szövetének jelentős része újrakristályosodhat, mely nagyban megnehezíti a kondrumok méretének, valamint a kondrum-mátrix arányának meghatározását.

Criterion	1	2	3	4	5	6	7
Homogeneity of olivine compositions	—	>5% mean deviations		≤5%	Homogeneous		
Structural state of low-Ca pyroxene	—	Predominantly monoclinic		>20% monoclinic	≤20% monoclinic	Orthorhombic	
Feldspar	—	Minor primary grains		Secondary <2-μm grains	Secondary 2–50-μm grains	Secondary >50-μm grains	
Chondrule glass	Altered or absent	Mostly altered, some preserved	Clear, isotropic	Devitrified	Absent		
Metal: Maximum Ni (wt%)	—	<20 taenite minor or absent	>20 kamacite and taenite in exsolution relationship				
Sulfides: Mean Ni (wt%)	—	>0.5	<0.5				
Matrix	Fine grained opaque	Mostly fine-grained opaque	Opaque to transparent	Transparent, recrystallized			
Chondrule-matrix integration	No chondrules	Sharp chondrule boundaries		Some chondrules can be discerned, fewer sharp edges		Chondrules poorly delineated	Primary textures destroyed
Carbon (wt%)	3–5	0.8–2.6	0.2–1	<0.2			
Water (wt%)	18–22	2–16	0.3–3	<1.5			

2. táblázat A kondritok petrológiai osztályozásához használt paraméterek, VAN SCHMUS & WOOD (1967), SEARS & DODD (1988), BREARLY & JONES (1998) és WEISBERG ET AL. (2006) módosításai után

3.3. Sokkoltsági fok

A meteoritok gyakori jellemzője a szülő égitestüket ért nagy sebességű és energiájú becsapódások által elszenvedett sokk-metamorfózis, breccsásodás. Noha már a meteoritok kutatásának korai szakaszában is felismerték ezen vonásokat (BREZNIA, 1904) a tudomány sokáig csak másodlagos, esetleg harmadlagos karakterként tartotta számon őket, melyek elfedik és felismerhetetlenné teszik az elsődlegesnek gondolt petrográfiai jellemzőket.

Ezzel ellentétben ma már tudjuk, hogy a becsapódások nagyban módosítják a meteoritok alapvető szöveti és geokémiai tulajdonságait, mint például a nemesgázok, nyomelemek és illóelemek mennyiségét és eloszlását. Ezeken túl, a becsapódások által okozott átalakulás segíthet fényt deríteni a meteoritok szülő égitestjeinek kollíziós és geológiai múltjára (STÖFFLER ET AL., 1991).

STÖFFLER ET AL. (1991) tanulmányukban egy hat lépcsős skálát állítottak fel, mely S1-től (sokkolatlan) S6-ig (nagyon erősen sokkolt) osztályozza a meteoritokat (3. táblázat). A sokk-metamorf szinteket főként az olivin és a plagioklász kristályok tulajdonságai (szabálytalan

törés, unduláló kioltás, planáris törések, mozaikosság), valamint lokalizált olvadásból visszamaradt opak sokk-erek, olvadékszabek, összekapcsolódó olvadási erek és az azokban lévő fémkitöltés alapján határozták meg.

Shock stage	Effects resulting from equilibration peak shock pressure		Effects resulting from local P-T-excursions	Shock pressure GPa *	Post-shock temperature increase °C **	Estimated minimum temperature increase, °C
	Olivine	Plagioclase				
unshocked S1	<u>Sharp optical extinction</u> , irregular fractures		none	< 4 - 5	10 - 20	10
very weakly shocked S2	<u>Undulatory extinction</u> , irregular fractures		none			
weakly shocked S3	<u>Planar fractures</u> , undulatory extinction, irregular fractures	Undulatory extinction	Opaque shock veins, incipient formation of melt pockets, sometimes interconnected	5 - 10	20 - 50	20
moderately shocked S4	<u>Mosaicism</u> (weak), planar fractures	Undulatory extinction, partially isotropic, planar deformation features	Melt pockets, interconnecting melt veins, opaque shock veins	15 - 20	100 - 150	100
strongly shocked S5	Mosaicism (strong), planar fractures + planar deformation features	<u>Maskelynite</u>	Pervasive formation of melt pockets, veins and dikes; opaque shock veins	30 - 35	250 - 350	300
very strongly shocked S6	Restricted to local regions in or near melt zones		as in stage S5	45 - 55	600 - 850	600
	<u>Solid state recrystallization</u> and staining, ringwoodite, melting	shock melted (normal glass)				
Shock melted	Whole rock melting (impact melt rocks and melt breccias)			75 - 90	1500 - 1750	1500

3. táblázat STÖFFLER ET AL. (1991) által meghatározott sokkoltsági állapotok, hőmérséklettel és nyomással társítva

3.4. Mállottsági fok

A világűrben több milliárd évig megőrződött meteoritok Földre érésük első pillanatától kezdve egyből mállani kezdenek: légkörbe lépésük után gyakran több kisebb darabra törnek, amelyek ezután önállóan zuhannak, majd csapódnak be, amely szintén további aprózódáshoz vezethet. A légkörben történő ereszkedés során a legkülső közetréteg megolvad, és 1-2 mm vastagságú kérget hoz létre a közet körül. Az így keletkezett kéreg rövid ideig megvédi a közet belső részeit a földi időjárástól, lehetővé téve ezzel egy szinte teljesen érintetlen minta elemzését, amennyiben az időben begyűjtésre kerül. A legtöbb meteorit viszont a „talált” és nem a „hullott” kategóriába tartozik, ami azt jelenti, hogy a Földre érkezési idejük ismeretlen, több ezer évnyi mállás és aprózódás érthette őket.

Noha a sivatagi környezetek az átlagosnál tovább képesek megőrizni egy meteoritot, a közetben így is számtalan átalakulás megy végbe. A fekete, üveges olvadási kéreg megsérülhet

a földet érés közben, rövidesen a becsapódás után barnássá válik, főleg a vastartalmú ásványok és ötvözetek oxidálódni kezdenek. Idővel az oxidáció elér a meteorit belsejébe is, amit a zsugorodási repedések megjelenése segít. Kitértiségtől függően a fém és troilit (Fe-Ni) oxidálódni kezdenek, valamint a repedésekben karbonátos kitöltések is megjelenhetnek. A legnagyobb fokú mállást szenvedett meteoritokban a szilikátásványokat agyagásványok és oxidok helyettesítik. Általánosságban elmondható, hogy az Antarktiszon talált meteoritok kisebb mértékű mállást szenvednek, mint forró sivatagi társaik (WLOTZKA, 1993).

WLOTZKA 1993-ban egy hét lépcsős mállottsági skálát hozott létre a kondritok földi kitértiségének megbecslése érdekében (4. táblázat).

Mállottsági fok – becsült teresztrikus kor (forró sivatagokban)	Megfigyelhető átalakulás
W0 – 0 év (friss hullás)	Nincs megfigyelhető oxidáció
W1 – 0 – 5000 év	Fém és troilit csekély oxidációja, oxid erek
W2 – 5000 – 15 000 év	Mérsékelten oxidált fém és troilit (20-60%)
W3 – 15 000 – 30 000 év	Erősen oxidált fém és troilit (60-95%)
W4 – 20 000 – 35 000 év	Fém és troilit teljes oxidációja (>95%)
W5 – 30 000 – 45 000 év	Repedések mentén a szilikátok átalakulása
W6 – >45 000 év	Szilikátok átalakulása oxidokká és agyagásványokká

4. táblázat WLOTZKA (1993) által megállapított mállási szintek a hozzájuk tartozó átalakulásokkal és becsült korokkal

4. Vizsgálati módszerek

Az NWA1 munkanévvel ellátott, be nem sorolt NWA meteorit eredeti, begyűjtött tömege 50,3 g volt, begyűjtésének pontos helye ismeretlen. Eredeti mérete körülbelül 3,5 x 4,3 x 1,8 cm volt. A vékonycsiszolatok elkészítése, a teljes kőzetkémiai, valamint nemesgázanalízis után megmaradt tömege 32,05 g.

Az NWA2 munkanevet viselő, be nem sorolt NWA meteorit eredeti, begyűjtött tömege 37,2 g volt, származási helye Algéria, begyűjtésének éve 2018. Eredeti mérete körülbelül 4,4 x

3,5 x 2,7 cm volt. A vékonycsiszolatok elkészítése, a teljes kőzetkémiai, valamint nemesgázanalízis után megmaradt tömege 18,72 g.



3. ábra Az NWA1 és NWA2-ből a petrográfiai és geokémiai vizsgálatok és osztályozás után megmaradt darabok

4.1. Polarizációs mikroszkópos vizsgálatok

A vékonycsiszolatokat és a polarizációs mikroszkópos vizsgálatokat a HUN-REN Atommagkutató Intézet Geokronológiai Laboratóriumában készítettem. A polarizációs mikroszkóppal történő vizsgálathoz mindkét rendelkezésemre álló meteoritból készítettem 3-3 darab, ~30 μm vastagságú, polírozott vékonycsiszolatot. A mikroszkópos vizsgálatot és a mikroszkópos felvételeket egy OLYMPUS BX53 polarizációs mikroszkóppal, és a rá szerelt, OLYMPUS Stream Motion 2.5 (64bit) program által vezérelt OLYMPUS DP23 kamerával készítettem. A kondrumátmérők vizsgálatát szintén ezen program mérési funkciójával végeztem, az adott kondrum két egymásra merőleges átmérőjének átlagértékével számolva.

4.2. Elektron mikroszonda (EPMA) vizsgálatok

A meteoritokból készült polírozott vékonycsiszolatok fő- és nyomelem összetételét a Grazi Egyetem, Földtudományi Tanszék, Graz Geocenterben található JXA-8530F Plus Hyper Probe; JOEL műszerrel határoztam meg. A műszer legkisebb elérhető felbontása ~1 μm , A mérések során használt áram 15 keV, a nyalábáram 10 nA, a sztenderdek pedig N06 olivin, N09 augit és N06 plagioklász voltak.

4.3. Teljes kőzetkémiai analízis

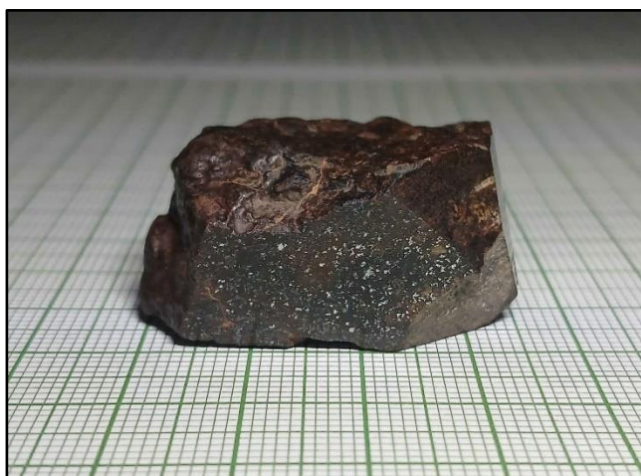
A meteoritok teljes kőzetkémiai analízisét a Bureau Veritas Commodities Canada Ltd. végezte Vancouverben, Kanadában. A minták elemzése lítium borátos feltárással történt, a fő és nyomelemek kimutatása röntgenfluoreszcens analízissel, valamint induktív csatolású spektroszkópiával történt. A teljes kőzetkémiai elemzésre felhasznált minták tömege mindkét meteorit esetében 1,6 g volt.

5. Eredmények

5.1. Makroszkópos leírás

5.1.1. NWA1

Az NWA1 meteorit külseje sötétbarna, feketés és narancsos színű. Az olvadási kéreg a földi kitettség miatt elvesztette élénk fekete színét és jelentős eróziót szenvedett; vágott felületen és csiszolatban már nem kivehető. A meteorit felszínén számos repedés fut, melyekben rozsdabarna sivatagi por figyelhető meg. Néhány kellően nagy repedésben szintén sivatagi por eredetű kvarcsezemcsék is láthatók. Számos esetben ezek a repedések a meteorit belső szövetét is átjárják, közelükben gyakori a limonit okozta barnás elszíneződés, mely áttérjed az egyébként szürkés mátrixra is. A meteorit vágott felületének nagy százalékát teszik ki az ezüstösen csillogó Fe-Ni(-oxid) szemcsék. A vágott felületen makroszkóposan is megfigyelhetők, bár nehezen kivehetők a kondrumok, valamint az azoknak hiányában jelentkező bemélyedések a kőzetben. A meteorit erősen vonzza a mágnesset.



4. és 5. ábra Bal oldalon az NWA1 meteorit teljes, érintetlen formája. Jobb oldalon a vágás és csiszolás után látható felület

5.1.2. NWA2

Az NWA2 meteorit külseje sötétbarna, feketés és narancsos színű. Az olvadási kéreg a földi kitettség miatt elvesztette élénk fekete színét, kivéve azon a felületen, amely nagyobb védelmet élvezhetett az időjárási elemektől (például betemetődött, vagy a meteorit földet érésénél a talajba fúródott). Ezen a megőrződött felületen vágás után is kivehető a vékony, feketés réteg. A meteorit felszínén számos repedés fut, melyekben rozsdabarna sivatagi por figyelhető meg. A repedések a belső szövetet is átjárják, ennek okán a limonitos elszíneződés szinte a teljes mátrixra is kiterjedt. Vágott felületen megfigyelhetők az ezüstösen csillogó, noha az NWA1-ben találhatóknál kisebb méretű és kevesebb százalékot kitevő, kisebb csoportokban megtalálható Fe-Ni(-oxid). A vágott felületen makroszkóposan is megfigyelhetők, bár nehezen kivehetők a kondrumok, valamint az azoknak hiányában jelentkező bemélyedések a kőzetben. A meteorit vonzza a mágnest, de kisebb mértékben, mint NWA1.



6. és 7. ábra Bal oldalon az NWA2 meteorit teljes, érintetlen formája. Jobb oldalon a vágás és csiszolás után látható felület

5.2. Polarizációs mikroszkópos leírás

5.2.1. NWA1

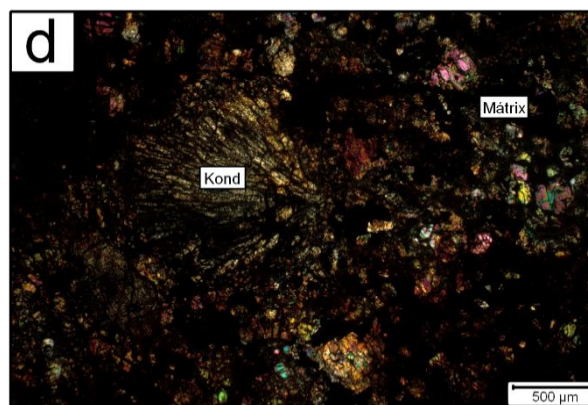
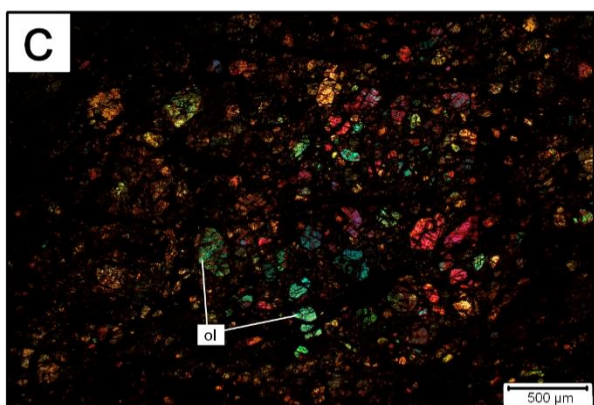
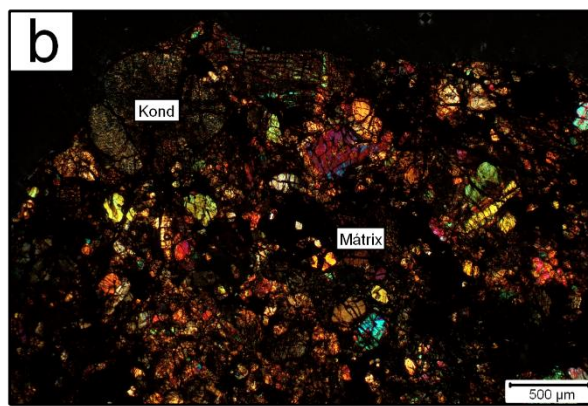
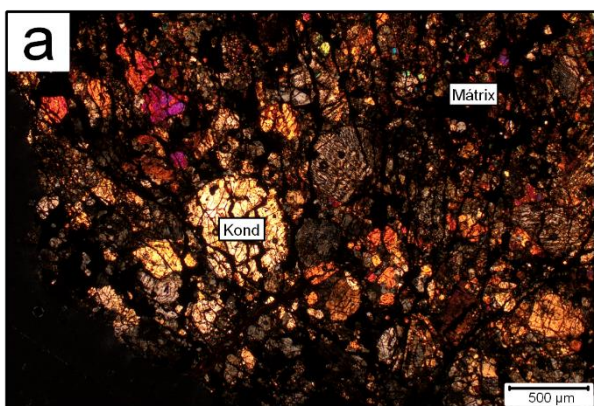
Az NWA1 munkanevű meteorit polarizációs mikroszkóp alatt változó méretű kondrumokat mutat (8. a ábra). Ötven mérés alapján az átlagos kondrumátmérő 707 μm -nek mutatkozott, a legkisebb mért átmérő 220 μm , míg a legnagyobb 1730 μm volt. A kondrumok átalakulása, és azok határvonalainak elmosódása miatt nehéz megállapítani az eredeti kondrum-mátrix arányt. A hat fő kondrumtípus (2. ábra) közül mindegyik megtalálható a csiszolatokban.

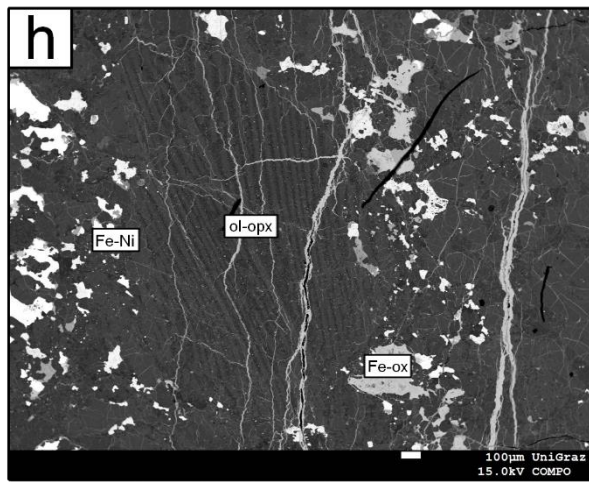
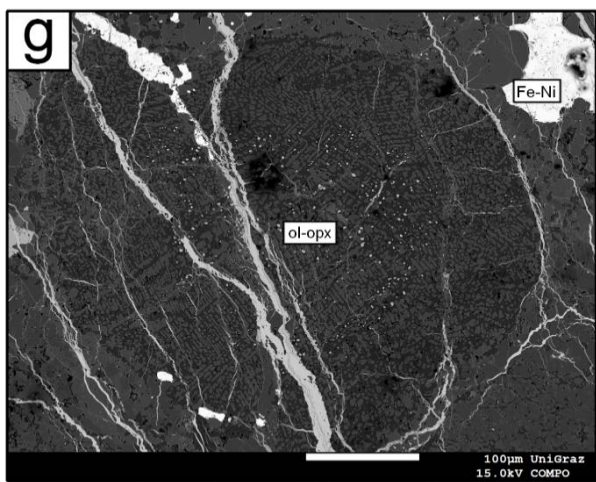
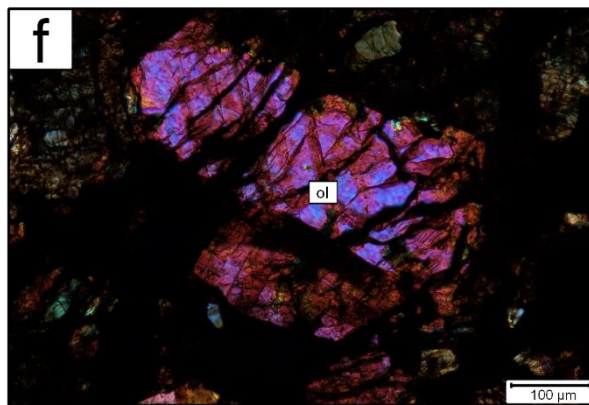
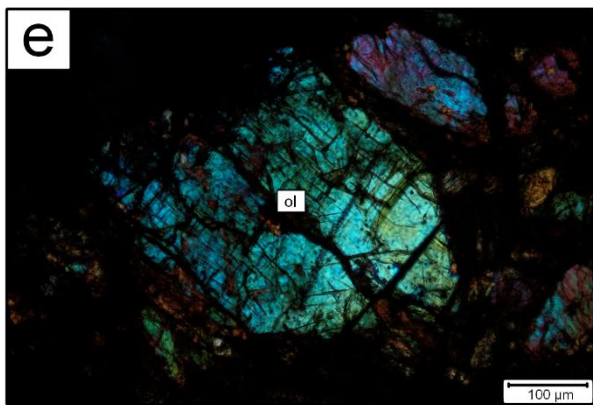
A kondrumhatárok gyakran elmosódottnak látszanak és átmenetet képeznek maga a kondrum és a mátrix között, de akadnak éles határvonallal rendelkező példányok is. Helyenként egymásnak nyomódott kondrumok is megfigyelhetők.

Az újrakristályosodott, átlátszó mátrixot olivin, rombos és monoklin piroxén, valamint földpátszemcsék alkotják (8. b ábra). Az olivin és piroxén kristályok mérete a néhány tíztől a négy-ötszáz μm -ig terjed (8. c ábra). Gyakoriak a nem szabályos kör metszetű, egyik irányban megnyúlt kondrumok (8. d ábra). Ritkák az 50-100 μm -nél nagyobb földpátok. Az olivin szemcsék alakja leggyakrabban idiomorf-hipidiomorf. Számos olivin kristályban található meg sokk-metamorfizációra utaló szabálytalan, illetve planáris törés (8. e, f ábra) melyekhez az olivin, illetve plagioklász unduláló kioltása társul.

Megfigyelhető továbbá számos vas-oxid, illetve vas-szulfid szemcse (8. g, h ábra), melyek gyakran kitöltik a mátrixot és kondrumokat egyaránt átjáró, esetenként összeérő repedéseket. A meteorit szélein több és nagyobb szélességű erek futnak, mint a belsejében.

A mátrix területének több mint felén másodlagos limonitosodás figyelhető meg, mely jellemzően a meteorit szélein és a sokk-metamorf erek mentén jelentkezik.





8. ábra NWA1-ről polarizációs mikroszkóp (a-f; +nikol) és pásztázó elektronmikroszkóp (g-h) használatával készített visszaszórt elektronképek. (a: tipikus kondritos szövet, számos jól kivehető kondrummal; b: kondrum és az azt körülvevő jellegzetes mátrix; c: olivin kristályok kondrumban; d: excentro-radiális kondrum és mátrix; e, f: szabálytalan és planáris törésekkel átszőtt olivin kristályok; g, h: szételegyedett olivin-ortopiroxén összetételű, Fe-Ni, Fe-ox sokk-érrel átszőtt kondrumok)

5.2.2. NWA2

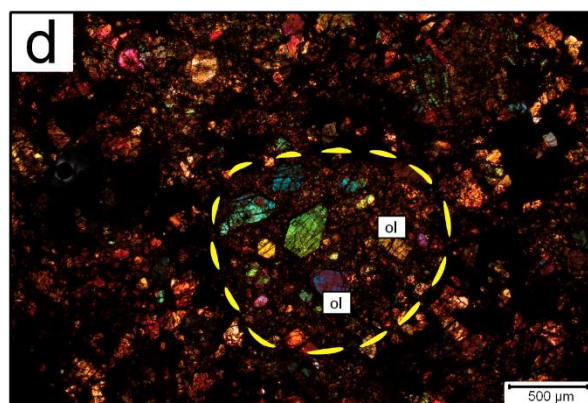
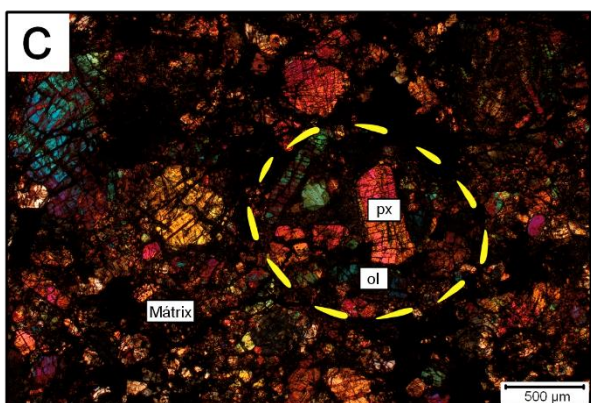
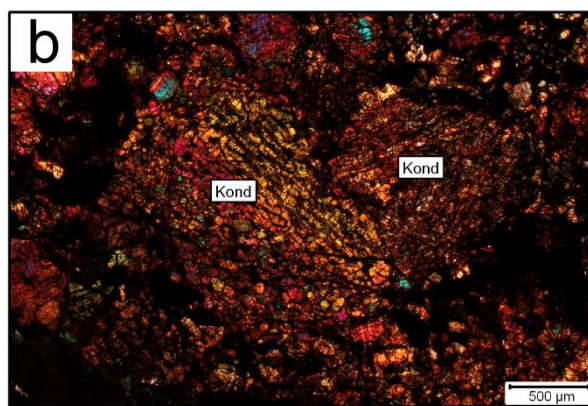
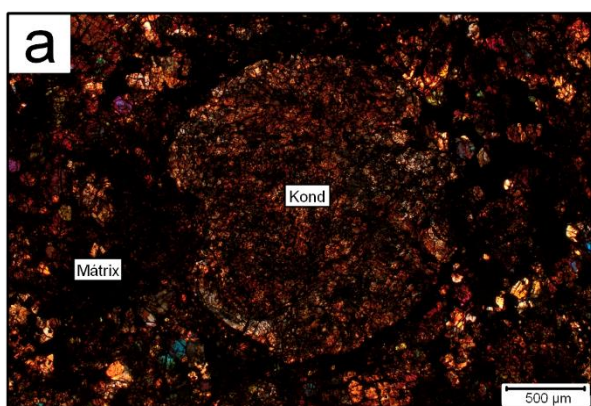
Az NWA2 munkanevű meteorit polarizációs mikroszkóp alatt változó méretű kondrumokat mutat. Ötvenhat mérés alapján az átlagos kondrumátmérő 887 μm -nek mutatkozott, a legkisebb mért átmérő 271 μm , míg a legnagyobb 2020 μm -nek bizonyult. A kondrumok átalakulása, és azok határvonalainak elmosódása miatt nehéz megállapítani az eredeti kondrum-mátrix arányt. A hat fő kondrumtípus közül mindegyik megtalálható a csiszolatokban. Gyakoriak a nem szabályos kör metszetű, egyik irányban megnyúlt kondrumok. A kondrumhatárok gyakran elmosódottnak látszanak és átmenetet képeznek maga a kondrum és a mátrix anyaga között, jellemzően kevesebb az éles határvonallal rendelkezők száma, mint az NWA1-ben (9. a ábra). Helyenként egymásnak nyomódott kondrumok is megfigyelhetők (9.

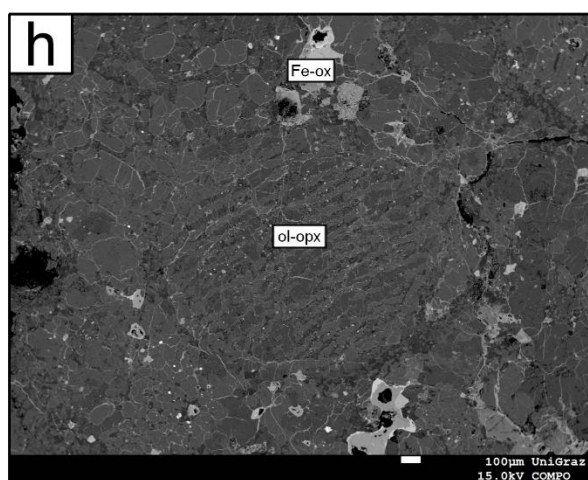
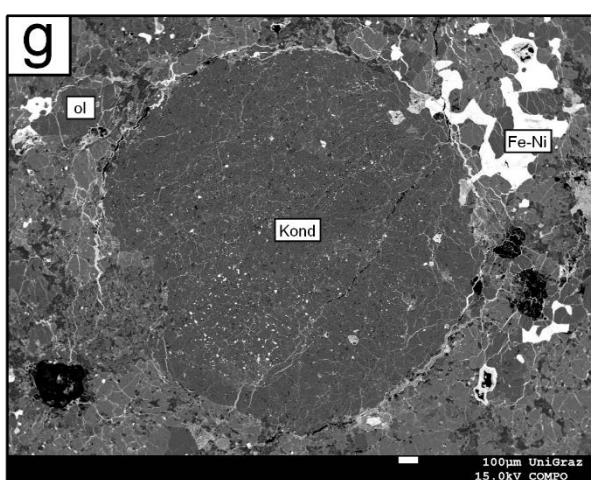
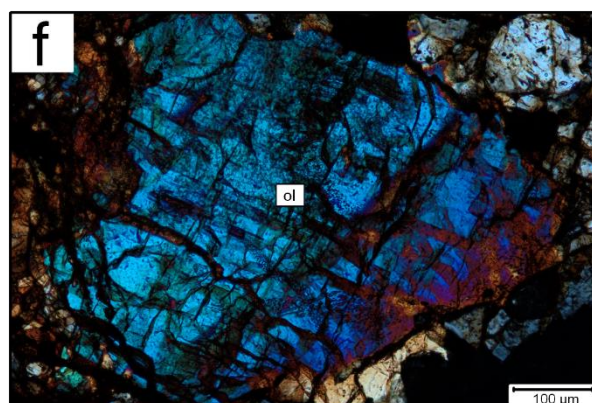
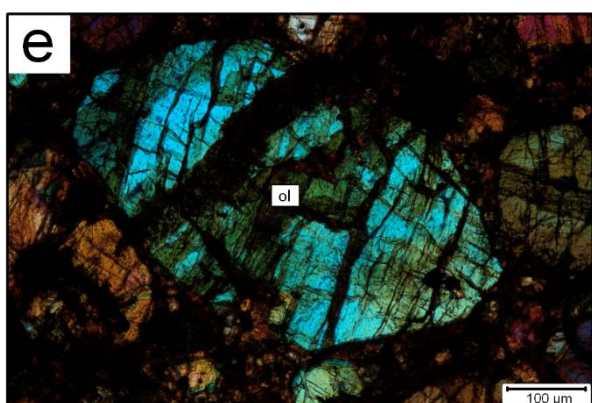
b ábra). A kisebb, 300-400 μm átmérőjű kondrumok nehezebben meghatározhatók, nagyobb mértékű elmosódást mutatnak nagyobb társaiknál.

Az újrakristályosodott, átlátszó mátrixot olivin, rombos és monoklin piroxén valamint földpátszemcsék alkotják (9. c, d ábra). Az olivin és piroxén kristályok mérete a néhány tíztől a 400-500 μm -ig terjed. Ritkák az 50-100 μm -nél nagyobb földpátszemcsék. Az olivin kristályok alakja leggyakrabban idiomorf-hipidiomorf. Számos olivin szemcsében található meg sokk-metamorfizációra utaló szabálytalan, illetve planáris törés (9. e, f ábra), melyekhez az olivin, illetve plagioklász unduláló kioltása társul.

Megfigyelhető továbbá számos részben oxidálódott Fe-Ni szemcse, ám kisebb mennyiségben vannak jelen és általánosságban kisebb kiterjedésűek, mint az NWA1-ben. A vas-oxid gyakran kitölti a mátrixot és kondrumokat egyaránt átjáró, esetenként összeérő repedéseket (9. g, h ábra). A meteorit szélein több és nagyobb szélességű erek futnak, mint a belsejében.

A mátrix területének majdnem egészét másodlagos limonitosodás borítja, mely jellemzően a meteorit szélein és a sokk-metamorf erek mentén jelentkezik.



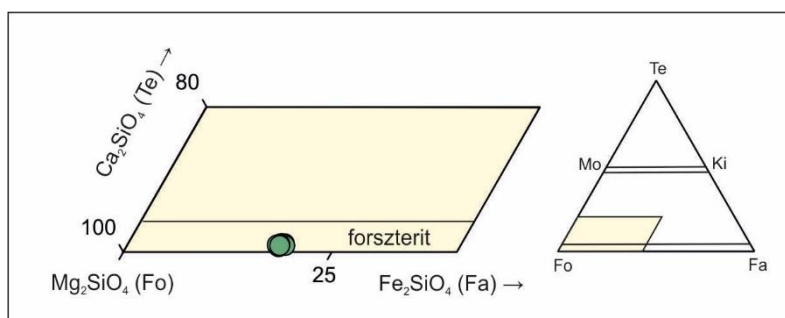


9. ábra NWA2-ről polarizációs mikroszkóp (a-f; +nikol) és pásztázó elektronmikroszkóp (g-h) használatával készített visszaszórt elektronképek. (a, e: részlegesen elmosódott körvonalú kondrum és mátrix; b: két egymásba nyomódott kondrum; c, d: egykori kondrumok helyén kristályosodott olivin és piroxén kristályok; e, f: szabálytalan és planáris törésekkel átszőtt olivin kristályok; g, h: szételegyedett, olivin-ortopiroxén felépítésű kondrum)

5.3. A meteoritok kémiai összetétele az EPMA vizsgálatok alapján

5.3.1. NWA1

A mátrix olivin kristályain végzett 9 darab EPMA pontmérés szerint kémiai összetételben <1%-os eltérést mutatnak (6. táblázat). A visszaszórt elektronképen az egyes olivinkristályokon belül kémiai zonáció nem volt felismerhető. Az olivin átlagos fayalit-tartalma 18,40 mol%, forszterit-tartalma pedig 81,01 mol%-nak mutatkozott (10. ábra).

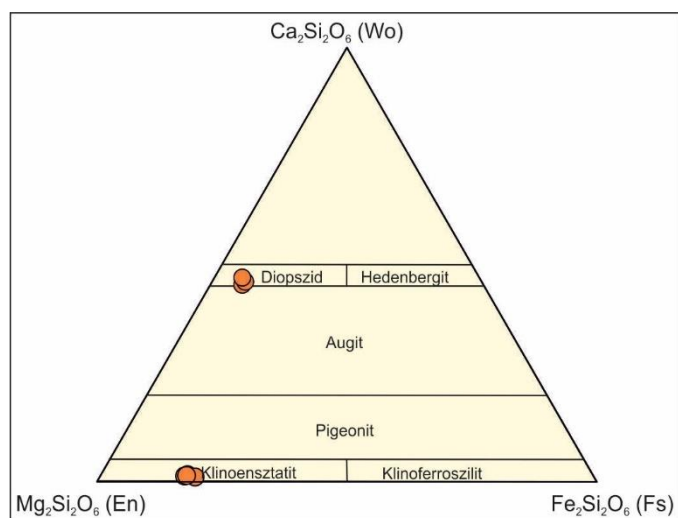


10. ábra NWA1 olivin kristályainak kémiai összetétele 9 mérés alapján

	NWA1 #21 olivin	NWA1 #22 olivin	NWA1 #23 olivin	NWA1 #24 olivin	NWA1 #25 olivin	NWA1 #26 olivin	NWA1 #27 olivin	NWA1 #28 olivin	NWA1 #30 olivin
SiO ₂	39.17	39.08	39.36	39.09	39.38	39.58	39.32	39.67	39.59
TiO ₂	b.d.l.	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01	b.d.l.
Al ₂ O ₃	0.03	b.d.l.	0.01	0.01	0.01	b.d.l.	0.02	0.02	0.01
Cr ₂ O ₃	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.01	b.d.l.	0.02	b.d.l.	b.d.l.
FeO	17.30	17.40	17.55	17.27	17.50	17.46	17.17	16.97	17.23
MnO	0.36	0.53	0.47	0.45	0.51	0.42	0.47	0.44	0.42
MgO	43.08	43.03	42.92	43.02	42.76	42.55	42.65	42.55	42.78
CaO	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.05	0.03	0.02	0.04
NiO	0.06	0.04	0.09	b.d.l.	0.02	b.d.l.	0.01	b.d.l.	0.05
Total	100.02	100.14	100.44	99.86	100.23	100.09	99.71	99.66	100.13

6. táblázat Az NWA1-ben található olivin kristályok kémiai összetétele mikroszondás mérések alapján (n=9), oxid tömeg%-ban megadva

A piroxén kristályokon végzett 8 mikroszondás mérés során 5 rombos és 3 monoklin szerkezetű piroxént különítettem el. Kémiai összetételük a visszaszórt elektronkép és a pontmérések szerint, <1%-os eltéréssel homogénnek tekinthető (7. táblázat). A rombos piroxének átlagos En-tartalma 81,06 mol%, Fs-tartalma 16,76 mol%, Wo-tartalma pedig 1,17 mol%-nak mutatkozott. Ugyanezen mérések a monoklin piroxénekben En – 48,75 mol%. Fs – 5,96 mol%, Wo – 45,29 mol%-nak bizonyultak (11. ábra). A visszaszórt elektronképen a piroxén kristályokon sem koncentrikus, sem szektorzónásságot nem lehetett megfigyelni.

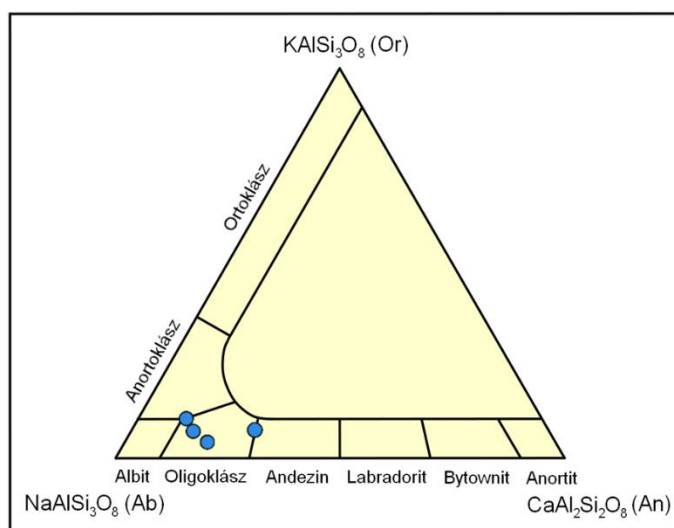


11. ábra NWA1 piroxén kristályainak kémiai összetétele 8 mérés alapján

	NWA1 #28 cpx	NWA1 #29 opx	NWA1 #30 opx	NWA1 #31 cpx	NWA1 #33 opx	NWA1 #34 opx	NWA1 #36 opx	NWA1 #37 cpx
SiO ₂	55.826	55.155	56.332	54.778	56.890	56.591	57.250	55.211
TiO ₂	0.312	0.133	0.174	0.331	0.146	0.093	0.037	0.158
Al ₂ O ₃	0.793	0.151	0.145	0.501	0.146	0.102	0.107	0.382
Cr ₂ O ₃	0.699	0.106	0.072	0.716	0.140	0.102	0.060	0.805
FeO	3.775	11.924	11.015	3.900	11.740	10.877	11.005	3.516
MnO	0.199	0.471	0.433	0.226	0.491	0.425	0.467	0.188
MgO	17.156	31.926	30.752	17.096	30.795	30.957	30.848	17.093
CaO	21.819	0.558	0.701	22.169	0.560	0.620	0.642	22.389
Na ₂ O	0.676	b.d.l.	0.022	0.499	0.017	0.006	b.d.l.	0.453
K ₂ O	0.031	0.005	0.010	0.008	0.012	b.d.l.	0.003	0.007
NiO	0.041	b.d.l.	b.d.l.	0.141	0.015	0.007	0.048	0.147
BaO	b.d.l.	0.021	0.028	0.016	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.
Total	101.325	100.450	99.684	100.380	100.951	99.778	100.466	100.348

7. táblázat Az NWA1-ben található piroxén kristályok kémiai összetétele mikroszondás mérések alapján (n=8),
oxid tömeg%-ban megadva

A földpát kristályokon végzett 4 pontmérés alapján átlagos összetételük 75,32 mol% Ab, 17,70 mol% An és 6,98 mol% Or-nak bizonyult, mely alapján a földpátok oligoklász összetételűek (12. ábra). Zónásságot a visszaszórt elektronképek nem mutattak.



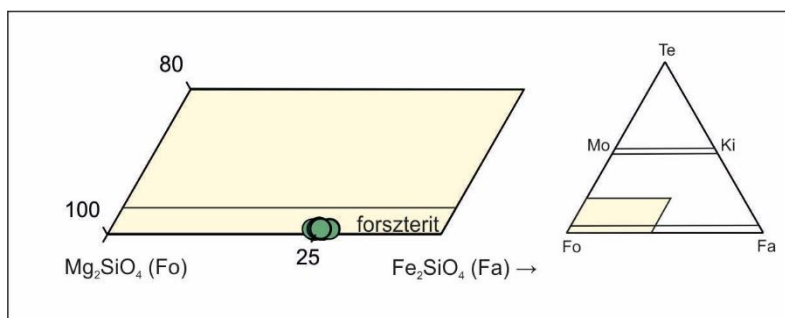
12. ábra NWA1 földpát kristályainak kémiai összetétele 4 mérés alapján

	NWA1 #2	NWA1 #3	NWA1 #4	NWA1 #5
	<i>plag</i>	<i>plag</i>	<i>plag</i>	<i>plag</i>
SiO ₂	62.19	61.85	60.68	63.09
TiO ₂	0.10	0.04	0.02	0.07
Al ₂ O ₃	17.96	20.44	20.98	21.08
FeO	1.31	2.47	2.73	1.43
MnO	0.04	0.05	0.02	0.01
MgO	3.56	3.90	3.57	1.04
CaO	5.95	2.48	2.12	3.27
Na ₂ O	7.63	8.07	7.29	8.70
K ₂ O	0.81	0.99	1.65	0.92
BaO	0.01	0.01	0.01	b.d.l.
Total	99.56	100.29	99.06	99.60

8. táblázat Az NWA1-ben található plagioklász kristályok kémiai összetétele mikroszondás mérések alapján (n=4), oxid tömeg%-ban megadva

5.3.2. NWA2

A mátrix olivin kristályain végzett 19 mikroszondás pontmérés kémiailag homogén összetételt mutat <1% összetételbeli eltéréssel (9. táblázat). Átlagos Fa-tartalmuk 24,71 mol%, Fo-tartalmuk pedig 74,71 mol% (13. ábra). Az olivin kristályokon kémiai zónásságot nem észleltem.



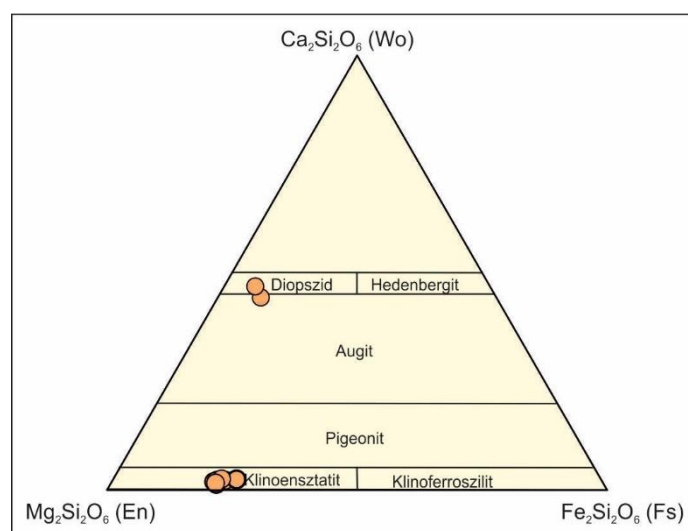
13. ábra NWA2 olivin kristályainak kémiai összetétele 19 mérés alapján

	NWA2 #2 olivin	NWA2 #3 olivin	NWA2 #4 olivin	NWA2 #5 olivin	NWA2 #6 olivin	NWA2 #7 olivin	NWA2 #8 olivin	NWA2 #9 olivin	NWA2 #10 olivin
SiO ₂	38.37	38.47	38.42	38.82	38.31	38.46	38.41	38.22	38.17
TiO ₂	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.02	0.01	0.01	b.d.l.
Al ₂ O ₃	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.01	b.d.l.	b.d.l.	0.02	b.d.l.
Cr ₂ O ₃	0.01	0.05	b.d.l.	0.02	0.02	b.d.l.	b.d.l.	0.02	0.03
FeO	22.51	22.60	22.70	23.22	22.36	22.40	22.16	22.66	23.15
MnO	0.39	0.58	0.40	0.49	0.50	0.39	0.47	0.51	0.50
MgO	38.27	38.65	38.21	38.35	38.63	38.81	38.65	38.56	38.54
CaO	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03
NiO	b.d.l.	0.03	0.08	0.06	0.03	b.d.l.	b.d.l.	0.05	b.d.l.
Total	99.57	100.41	99.86	100.97	99.86	100.12	99.72	100.09	100.41

	NWA2 #11 olivin	NWA2 #12 olivin	NWA2 #13 olivin	NWA2 #14 olivin	NWA2 #15 olivin	NWA2 #16 olivin	NWA2 #17 olivin	NWA2 #18 olivin	NWA2 #19 olivin	NWA2 #20 olivin
SiO ₂	38.35	38.70	38.35	37.96	38.41	38.90	38.72	38.29	38.37	38.75
TiO ₂	0.01	b.d.l.	0.01	b.d.l.	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	b.d.l.
Al ₂ O ₃	b.d.l.	0.01	0.01	0.01	0.01	b.d.l.	0.01	0.04	0.02	b.d.l.
Cr ₂ O ₃	b.d.l.	0.02	0.02	0.04	b.d.l.	b.d.l.	0.01	b.d.l.	b.d.l.	0.01
FeO	22.59	22.87	22.58	22.48	22.59	22.29	22.52	23.12	22.63	22.87
MnO	0.46	0.42	0.48	0.47	0.47	0.47	0.49	0.44	0.48	0.48
MgO	38.42	38.51	38.34	38.06	38.46	38.32	38.50	38.23	38.35	38.88
CaO	0.02	0.03	0.04	0.04	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	b.d.l.
NiO	0.07	b.d.l.	0.08	0.02	b.d.l.	0.03	0.02	0.14	0.10	0.04
Total	99.92	100.55	99.90	99.09	99.98	100.04	100.30	100.29	99.98	101.04

9. táblázat Az NWA2-ben található olivin kristályok kémiai összetétele mikroszondás mérések alapján (n=19), oxid tömeg%-ban megadva

A 17 darab, piroxéneken végzett pontmérés során 15 rombos és 2 monoklin szerkezetű piroxént mértem meg (10. táblázat). A rombos piroxének átlagos En-tartalma 76,98 mol%, Fs-tartalma 21,56 mol%, Wo-tartalma 1,47 mol% volt, míg ugyanezen adatok a monoklin piroxéneken 46,49 mol% En, 8,24 mol% Fs, valamint 45,27 mol% Wo-nak mutatkoztak (14. ábra). A visszaszórt elektronképen a piroxén kristályokon sem koncentrikus, sem szektorzónásságot nem lehetett megfigyelni.



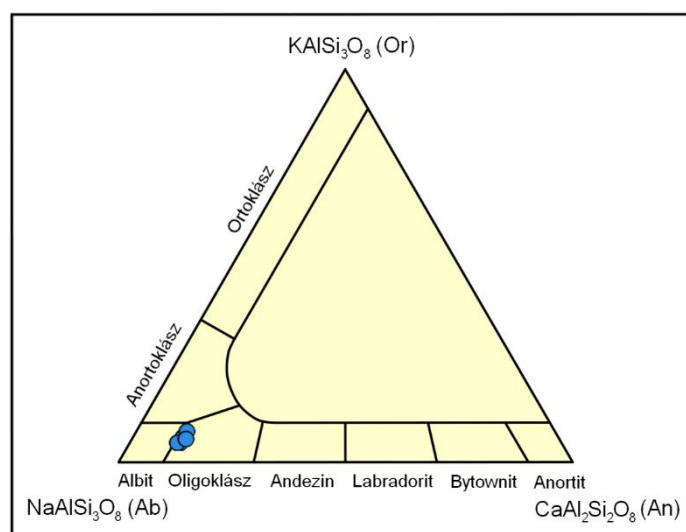
14. ábra NWA2 piroxén kristályainak kémiai összetétele 17 mérés alapján

	NWA2 #11 <i>opx</i>	NWA2 #12 <i>opx</i>	NWA2 #13 <i>opx</i>	NWA2 #14 <i>opx</i>	NWA2 #15 <i>opx</i>	NWA2 #16 <i>opx</i>	NWA2 #17 <i>opx</i>	NWA2 #18 <i>cpx</i>
SiO ₂	55.74	54.40	53.94	56.31	56.06	56.53	54.99	54.06
TiO ₂	0.18	0.21	0.20	0.20	0.14	0.10	0.16	0.47
Al ₂ O ₃	0.17	0.35	0.46	0.21	0.11	0.10	0.16	0.56
Cr ₂ O ₃	0.10	0.13	0.12	0.13	0.09	0.13	0.20	0.85
FeO	14.11	14.55	15.08	13.87	13.85	13.86	14.54	5.55
MnO	0.43	0.42	0.46	0.44	0.42	0.45	0.49	0.16
MgO	28.59	27.97	27.10	28.58	28.42	28.09	28.87	16.27
CaO	0.70	0.82	0.87	0.72	0.83	0.92	0.56	21.68
Na ₂ O	0.01	0.03	b.d.l.	0.02	b.d.l.	0.03	b.d.l.	0.55
K ₂ O	b.d.l.	b.d.l.	0.01	b.d.l.	b.d.l.	0.01	0.01	0.01
NiO	0.04	0.14	0.73	b.d.l.	b.d.l.	0.02	b.d.l.	0.05
BaO	0.01	b.d.l.	0.02	b.d.l.	b.d.l.	0.04	b.d.l.	b.d.l.
Total	100.09	99.01	98.99	100.49	99.92	100.27	99.97	100.21

	NWA2 #19 <i>cpx</i>	NWA2 #20 <i>opx</i>	NWA2 #21 <i>opx</i>	NWA2 #22 <i>opx</i>	NWA2 #23 <i>opx</i>	NWA2 #24 <i>opx</i>	NWA2 #25 <i>opx</i>	NWA2 #26 <i>opx</i>	NWA2 #27 <i>opx</i>
SiO ₂	54.21	56.22	55.73	55.88	55.96	56.38	55.41	56.08	56.68
TiO ₂	0.43	0.17	0.17	0.16	0.20	0.18	0.19	0.18	0.16
Al ₂ O ₃	0.61	0.14	0.14	0.21	0.17	0.17	0.35	0.15	0.17
Cr ₂ O ₃	0.69	0.11	0.10	0.13	0.08	0.12	0.08	0.08	0.05
FeO	4.75	14.24	14.29	14.02	14.00	14.07	14.05	14.18	13.93
MnO	0.22	0.51	0.45	0.41	0.41	0.43	0.47	0.43	0.41
MgO	16.31	28.72	28.73	28.36	28.87	28.66	27.73	28.81	28.55
CaO	22.47	0.57	0.68	0.84	0.76	0.77	0.90	0.66	0.69
Na ₂ O	0.48	b.d.l.	0.03	b.d.l.	0.01	b.d.l.	0.02	0.01	0.04
K ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.00	b.d.l.	b.d.l.	0.02	b.d.l.	b.d.l.
NiO	0.03	0.01	b.d.l.	0.12	b.d.l.	b.d.l.	0.23	0.06	b.d.l.
BaO	0.00	0.03	0.00	0.00	b.d.l.	0.01	0.02	0.02	b.d.l.
Total	100.22	100.72	100.32	100.15	100.46	100.79	99.45	100.67	100.67

10. táblázat Az NWA2-ben található piroxén kristályok kémiai összetétele mikroszondás mérések alapján (n=17), oxid tömeg%-ban megadva

A földpát kristályokon végzett 5 mikroszondás pontmérés alapján albitos komponens dúsulást mutatnak. Kémiai összetétel szerint Ab-tartalmuk 83,29 mol%, An-tartalmuk 10,72 mol%, Or-tartalmuk pedig 6 mol%-nak bizonyult, mely alapján a földpátok oligoklász összetételűek (15. ábra).



15. ábra NWA2 földpát kristályainak kémiai összetétele 5 mérés alapján

	NWA2 #6 <i>plag</i>	NWA2 #7 <i>plag</i>	NWA2 #8 <i>plag</i>	NWA2 #9 <i>plag</i>	NWA2 #10 <i>plag</i>
SiO ₂	62.33	64.97	65.48	65.49	64.59
TiO ₂	0.05	0.05	0.03	0.04	0.05
Al ₂ O ₃	20.50	21.19	21.79	21.67	20.91
FeO	2.23	1.54	0.40	0.81	0.68
MnO	0.02	0.01	0.00	0.04	0.00
MgO	0.18	0.39	0.04	0.12	0.55
CaO	2.12	2.18	2.24	2.15	2.21
BaO	b.d.l.	0.02	b.d.l.	b.d.l.	0.01
Na ₂ O	8.84	9.21	9.60	9.64	9.52
K ₂ O	1.14	1.22	0.86	0.86	1.03
Total	97.42	100.77	100.44	100.83	99.56

11. táblázat Az NWA2-ben található plagioklász kristályok kémiai összetétele mikroszondás mérések alapján (n=5), oxid tömeg%-ban megadva

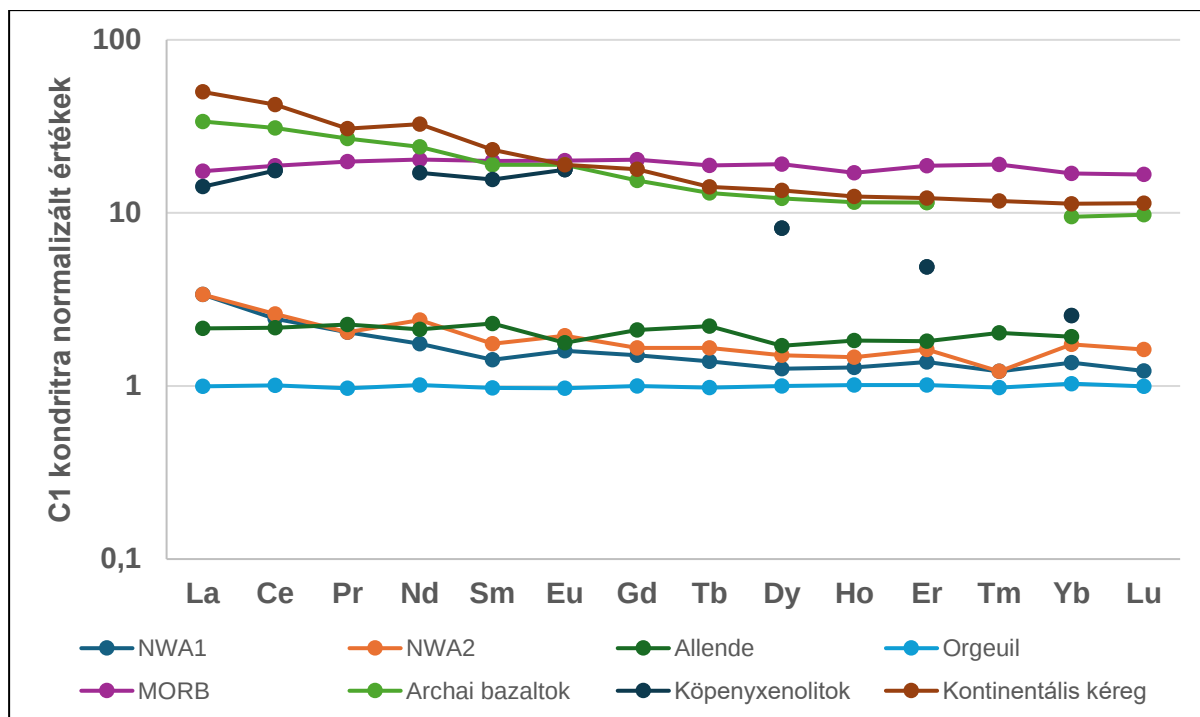
5.4. Teljes kőzetkémiai elemzések

5.4.1. NWA1

Az NWA1-ből készült teljes kőzetkémiai analízisből kapott adatok alapján az NWA1 magas vastartalommal rendelkezik, az Fe₂O₃ a meteorit tömegének 36,06 m/m%-át teszi ki. A meteorit teljes ritkaföldfém-koncentrációja igen alacsony ($\Sigma\text{REE}_{\text{NWA1}}$: 4,82 ppm), eloszlása közel lineáris, könnyű ritkaföldfémekben (La-tól Nd-ig) enyhe dúsulást mutat (16. ábra).

5.4.2. NWA2

Az NWA2-ből származó kőzetkémiai adatok szerint ezen meteorit NWA1-nél kisebb mennyiségű Fe₂O₃-mat tartalmaz; tömegének 28,1 m/m%-át teszi ki. A teljes ritkaföldfém koncentráció ($\Sigma\text{REE}_{\text{NWA2}}$: 5,55 ppm) kicsivel magasabb az NWA1-nél. A meteorit ritkaföldfém koncentrációja La, Cr és Pr esetében szinte teljesen egybevág NWA1-gyel, ám az ennél nehezebb elemek Tm kivételével NWA1-nél nagyobb koncentrációt mutatnak (16. ábra).



16. ábra NWA1 és NWA2 ritkaföldfém eloszlása CI kondritra normálva (hivatkozások a 17. ábra szerint)

	NWA1	NWA2	Orgeuil meteorit	Allende meteorit	MORB	Köpeny xenolit	Archai bazalt	Kontinentális kéreg átlag
SiO ₂ (wt%)	34,98	40,38						
Al ₂ O ₃	2,21	2,45						
Fe ₂ O ₃	36,06	28,10						
MgO	20,79	21,48						
CaO	1,60	1,98						
Na ₂ O	0,79	0,87						
K ₂ O	0,11	0,15						
TiO ₂	0,10	0,11						
P ₂ O ₅	0,24	0,26						
MnO	0,28	0,32						
Cr ₂ O ₃	0,50	0,52						
Ba	35	801						
Ni	>10000	7257						
Sc	8	9						
Sum	99,36	97,63						

Be (ppm)	<1	<1						
Co	790,30	320,10						
Cs	0,10	<0.1						
Ga	5,40	5,20						
Hf	0,20	0,30						
Nb	0,60	0,60						
Rb	3,70	3,70						
Sn	<1	<1						
Sr	18,90	101,00						
Ta	<0.1	<0.1						
Th	<0.2	<0.2						
U	<0.1	0,60						
V	73,00	109,00						
W	0,70	0,70						
Zr	8,20	9,50						
Y	1,90	2,20						
La	0,80	0,80	0,24	0,51	4,13	3,36	8,00	11,85
Ce	1,50	1,60	0,62	1,33	11,46	10,77	19,00	25,87
Pr	0,19	0,23	0,09	0,21	1,84		2,50	2,85
Nd	0,80	1,10	0,46	0,97	9,30	7,81	11,00	14,88
Sm	0,21	0,26	0,14	0,34	2,96	2,31	2,81	3,43
Eu	0,09	0,11	0,05	0,10	1,13	1,00	1,07	1,07
Gd	0,30	0,33	0,20	0,42	4,04		3,06	3,55
Tb	0,05	0,06	0,04	0,08	0,68		0,47	0,51
Dy	0,31	0,37	0,25	0,42	4,70	2,01	2,99	3,32
Ho	0,07	0,08	0,06	0,10	0,93		0,63	0,68
Er	0,22	0,26	0,16	0,29	3,00	0,78	1,84	1,95
Tm	0,03	0,03	0,02	0,05	0,47			0,29
Yb	0,22	0,28	0,17	0,31	2,72	0,41	1,53	1,82
Lu	0,03	0,04	0,02		0,41		0,24	0,28

12. ábra A vizsgált minták fő és nyomelem összetétele. Viszonyításként különböző rezervoárok RFF adatai: Orgeuil meteorit – Anders és Ebihara, 1982; Allende meteorit – Martin és Mason, 1974; MORB – Kelemen, et al. (2004), köpenyxenolit – Sen et al., 1993; archai bazalt – Rudnick és Fountain, 1995; kontinentális kéreg – Wedepohl (1995)

Összehasonlítva a vizsgált meteoritok ritkaföldfém eloszlását a primitívnek minősített Allende és Orgeuil meteoritokkal, a nehéz ritkaföldfémek tekintetében mintáim közelebb esnek a referenciaként használt (C1) Orgeuil meteorithoz, míg az Allende meteorit egyértelműen magasabb nehéz ritkaföldfém koncentrációkat mutat. Kizárólag a könnyű ritkaföldfémek esetében (La, Ce) mutatnak mintáim határozott dúsulást.

Bármilyen földi közethez [köpenyxenolit, MORB (mid-ocean ridge basalt), archai korú bazalt, átlagos földkéreg] viszonyítva viszont a két meteorit jóval szegényebb ritkaföldfémekben.

6. Diskusszió

6.1. Az NWA1 és NWA2 meteoritok osztályozása

6.1.1. NWA1

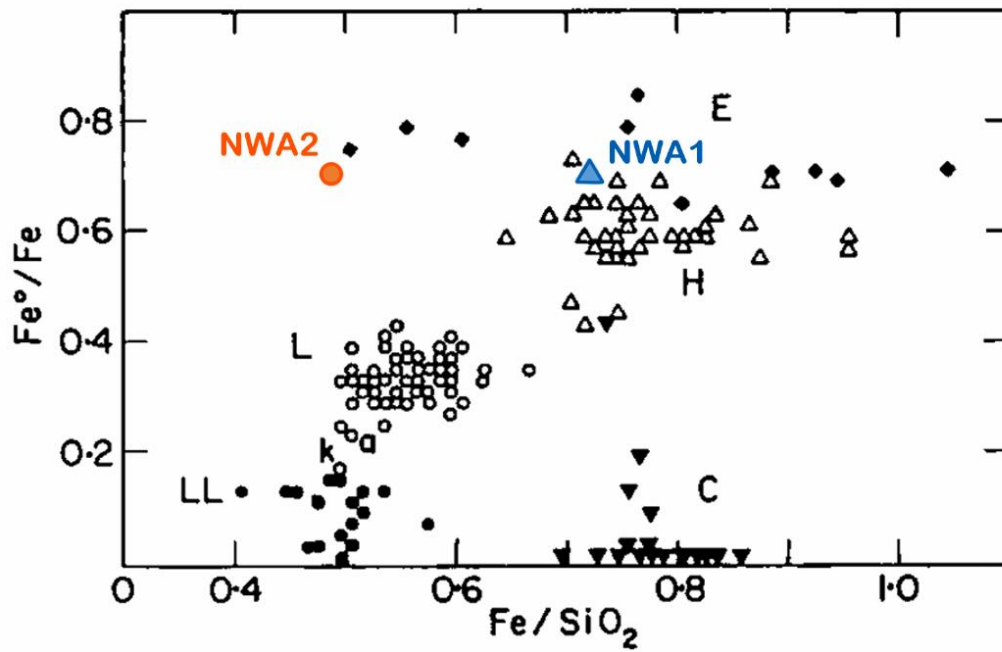
A vizsgált meteoritban a kondritok megjelenése, valamint az alacsony fém Fe-Ni – kőzet arány alapján mintámat a kőmeteoritok közé, azok között is, a kondritok csoportjába soroltam.

Kondritcsoport

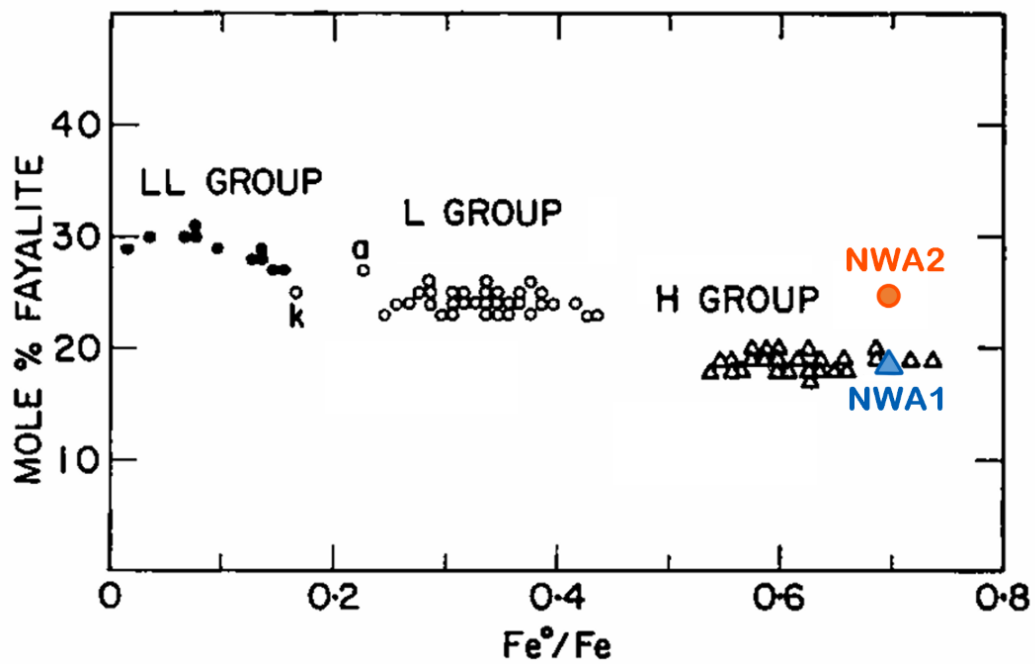
Az olivin 18,40 mol%-os Fa-tartalma, a kőzetkémiai analízis során kimért SiO_2/MgO (1,68), Fe/SiO_2 (0,72), valamint $\text{Fe}_{\text{Teljes}}/\text{Fe}_{\text{Fém}}$ (0,7) arányok, megegyeznek a VAN SCHMUS & WOOD által 1967-ben meghatározott, a „H” kondritokra vonatkozó paramétereivel (1. táblázat). A kondrumok átlagos átmérője 707 μm -nek mutatkozott, mely jelentősen több, mint a WEISBERG ET AL. (2006) által meghatározott 300 μm -es kondrumátmérő. Ez a meteorit részleges újrakristályosodásával és mállásával magyarázható, mely folyamatok során számos kisebb kondrum felismerhetetlenné vált és a homogén alapanyag részévé vált.

Az NWA1 ritkaföldfém eloszlása egybevág számos közös kondrit ugyanezen adataival (MASUDA ET AL., 1972; NAKAMURA 1973; EVENSEN ET AL., 1978). Ez alapján megállapítható, hogy a szülő égitesten nem történt jelentős termális rétegződés (differenciálódás), az megtartotta közel eredeti összetételét. A könnyű-ritkaföldfémek dúsulása a részleges termális kiegyenlítődésre utal.

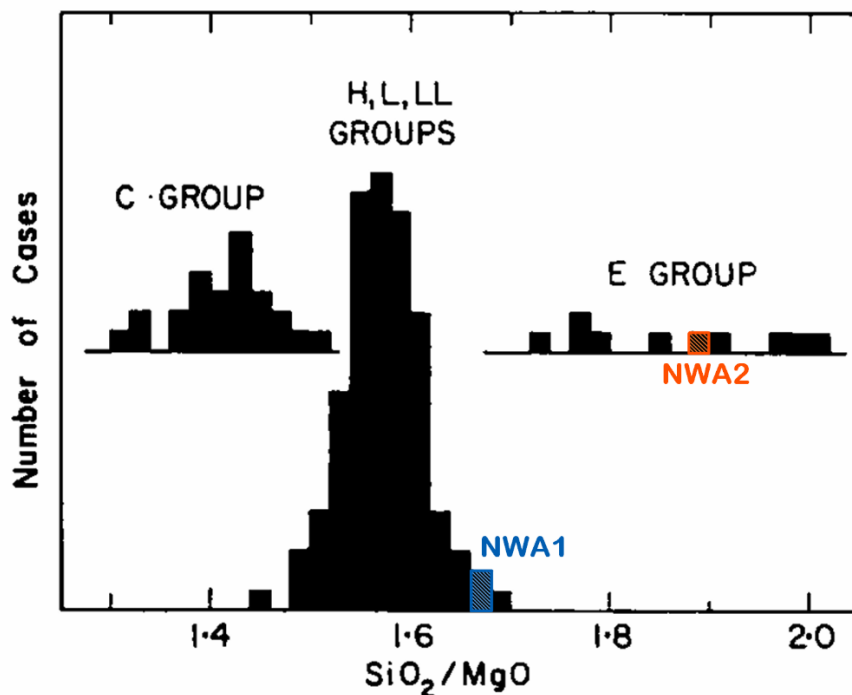
Az NWA1 munkanevű meteoritot ezen tulajdonságok alapján VAN SCHMUS & WOOD 1967-es osztályozási rendszere szerint a közös kondritok „H” (high iron) csoportjába soroltam be (1. táblázat; VAN SCHMUS & WOOD, 1967).



17. ábra NWA1 és NWA2 Fe/SiO_2 és Fe^0/Fe arányaival történő ábrázolás VAN SCHMUSS & WOOD (1967) után



18. ábra NWA1 és NWA2 Fe^0/Fe és Fa-mol% arányaival történő ábrázolás VAN SCHMUSS & WOOD (1967) után



19. ábra NWA1 és NWA2 SiO₂/MgO arányai és a VAN SCHMUS & WOOD (1967) által mért meteoritok kondritcsoportbeli eloszlása

Petrológiai osztály

Az NWA1-ben még felismerhető, de esetenként elmosódott kondrumhatárok, illetve újrakristályosodott, átlátszó mátrix figyelhető meg. Az olivin és piroxén homogén összetételű, a piroxéneken belül a rombos piroxén nagyobb arányban jelenik meg, mint a monoklin. A kondrumokban nem fedezhető fel közetüveg, valamint ritkák a 150 µm-nél nagyobb földpátkristályok.

Az NWA1 munkanevű meteorit ezen tulajdonságok alapján az 5. petrológiai osztályhoz sorolható (2. táblázat; VAN SCHMUS & WOOD, 1967).

Sokkoltsági fok

Az NWA1-ben az olivin és plagioklász kristályok unduláló kioltást mutatnak, az olivinben szabálytalan, illetve planáris törések figyelhetők meg, a mátrixban egymásba csatlakozó opak sokk-erek jelentkeznek.

Az NWA1 munkanevű meteorit ezen tulajdonságok alapján az „S3”, azaz „gyengén sokkolt” sokk-metamorfizációs fokozatba tartozik, mi szerint 15-20 GPa nyomás, valamint 100-150 °C sokkhatás utáni felmelegedés érhet (3. táblázat; STÖFFLER ET AL., 1991).

Mállottsági fok

Az NWA1 földi mállás nyomait mutatja, melyet bizonyítja az olvadási kéreg jelentős lepusztulása, a meteorit belső felületének nagyjából 60%-át borító barnás, limonitos átalakulás, valamint a fémként jelen lévő vas-nikkel és vas-szulfid körülbelül 50%-ának oxidációja. A szilikátásványokon nem figyelhető meg átalakulás.

Az NWA1 munkanevű meteorit ezen tulajdonságok alapján a „W2” mállási fokhoz sorolható, teresztrikus kora 5 000-15 000 év között lehet (4. táblázat; WLOTZKA 1993).

6.1.2. NWA2

Hasonlóan az NWA1 meteoritához a kondritok megjelenése, valamint az alacsony fém Fe-Ni – közet arány alapján az NWA 2 meteorit is a kőmeteoritok közé, azok között is, a kondritok csoportjába tartozik.

Kondritcsoport

Az NWA2 munkanevű meteorit besorolása számos szempontból mutatkozik ellentmondásosnak. Az olivin magas fayalit-tartalma ($\text{Fe}_{24,7}$) végett VAN SCHMUS & WOOD 1967-es osztályozási rendszere alapján a meteorit az „L” (low-iron) közönséges kondritok közé sorolható. A teljes közetre vonatkoztatott SiO_2/MgO (1,88), Fe/SiO_2 (0,49), valamint $\text{Fe}_{\text{Teljes}}/\text{Fe}_{\text{Fém}}$ (0,7) arányok ugyanezen beosztás alapján inkább az „E” (ensztatitos) kondritokkal teszik rokonná a meteoritot (15-17. ábra). Ezen kondritok viszont szinte egyáltalán nem tartalmaznak olivint, amiben az NWA2 bővelkedik (>30%). Az NWA2-ben megállapított 887 μm -es átlagos kondrumátmérő közelebb áll a WEISBERG ET AL. (2006) által az „L” kondritokra megállapított 700 μm -hez, szemben az „E” kondritok 200-600 μm -es átlagos kondrumátmérőivel. Az NWA2 ritkaföldfém eloszlása és koncentrációja rokonságot mutat számos más „L” kondritéval (MASUDA ET AL., 1972; NAKAMURA 1973; EVENSEN ET AL., 1978). Hasonlóan az NWA1-hez, az NWA2 ritkaföldfém eloszlása alapján egy nem

differentiálódott, javarészt keletkezési körülményeket megőrző, termálisan kiegyenlített szülőtestet feltételezhetünk. Tekintve, hogy a teljes közetkémiai analízis nem minden esetben ad az osztályozáshoz szükséges megbízható támpontot a gyakran nagy mértékű kémiai heterogenitást mutató közönséges kondritok esetében, a meteorit közönséges, enszatitos, vagy esetlegesen egy ezt megelőzően nem ismert hibrid osztályba sorolásában jövőbeli oxigén-izotópos mérések segídezhetnek.

Ezen dolgozaton belül a közönséges kondritok „L(?)” csoportját ajánlom meg a meteoritnak, az elnevezéssel reflektálva az ellentmondó eredményekből adódó bizonytalanságra.

Petrológiai osztály

Az NWA2 meteorit szövetében javarészt elmosódott, nehezen definiálható kondrumok figyelhetők meg, melyek átmenetet mutatnak a saját és az újrakristályosodott mátrix anyaga között. Az olivin és piroxén kristályok homogén összetételt mutatnak, a piroxéneken belül a rombos piroxén nagyobb arányban található meg a monoklin szerkezetűeknél. A kondrumokban nem fedezhető fel közetüveg, valamint ritkák a 150 µm-nél nagyobb földpátkristályok.

Az NWA2 munkanevű meteorit ezen tulajdonságok alapján a 6. petrológiai osztályhoz sorolható (2. táblázat; VAN SCHMUS & WOOD, 1967 után).

Sokkoltsági fok

Az NWA2 meteoritban az olivin és plagioklász kristályok unduláló kioltást mutatnak, az olivinben szabálytalan, illetve planáris törések figyelhetők meg, a mátrixban számos egymásba csatlakozó, összefüggő opak sokk-ér jelenik meg.

Az NWA2 munkanevű meteorit, az „S3”, azaz „gyengén sokkolt” sokk-metamorfizációs fokozatba tartozik, mi szerint az NWA1-hez hasonlóan 15-20 GPa nyomás, valamint 100-150 °C sokkhatás utáni felmelegedés érhetette (3. táblázat; STÖFFLER ET AL., 1991).

Mállottsági fok

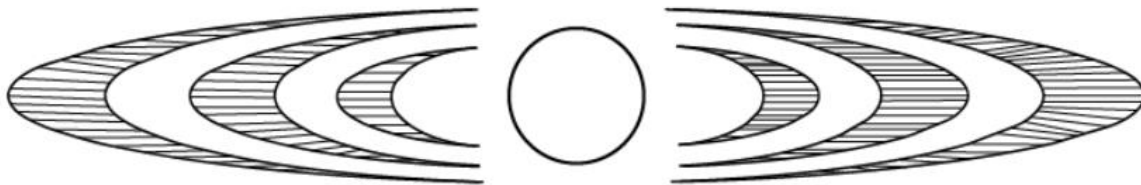
Az NWA2 földi mállás nyomait mutatja, melyet bizonyítja az olvadási kéreg – a feltehetően az időjárási elemektől jobban védett minimális felszínrészen kívül – jelentős lepusztulása, a meteorit belső felületének majdnem egészét borító barnás, limonitos átalakulás, valamint a fémes formában jelenlévő vas-nikkel körülbelül 85%-ának oxidációja. A szilikátásványokon nem figyelhető meg átalakulás.

Az NWA2 munkanevű meteorit ezen tulajdonságok alapján a „W3” mállási fokhoz sorolható, teresztrikus kora 15 000-30 000 év között lehet (4. táblázat; WLOTZKA 1993).

6.2. NWA1 és NWA2 keletkezése, fejlődéstörténete

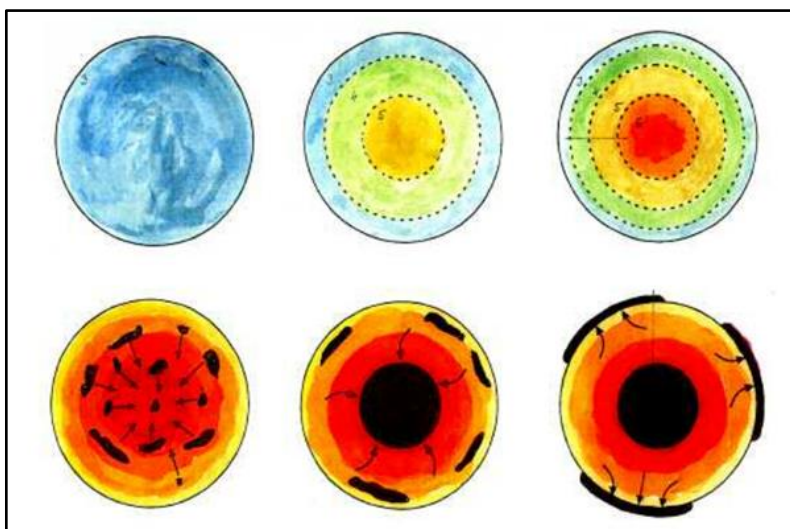
Több mint 4,5 milliárd évvel ezelőtt a mai Naprendszerünk helyén csak egy, a Napot megelőző csillagok ősi szupernóva robbanásaiból visszamaradt és szétszórt por- és gázfelhő helyezkedett el. Ez a pörgő gázfelhő, feltehetően helyi sűrűségkülönbségek miatt elkezdett összehúzódni és felmelegedni, egészen addig, amíg megszületett egy fiatal csillagkezdemény, a korai Nap.

A fiatal, formálódó Naprendszer nem rendelkezett számottevő szilárd halmazállapotú alkotóval, ám ez $4567,30 \pm 0,16$ évvel ezelőtt megváltozott, amikor a forró gázfelhőből először kikristályosodtak a Naprendszer legidősebb szilárd anyagai, a CAI-k (kalcium-alumínium zárványok; CONNELLY ET AL., 2012). Vitatott, hogy ezt az eseményt pontosan mennyi idővel később, de a CAI-k megjelenése után ~1,5 millió évvel már biztosan egyéb ásványok is kikristályosodtak a gázfelhőből (PIRALLA ET AL., 2023). Valamilyen külső behatás (például nebulán belüli sokkhatás következtében ezek az ásványok megolvadtak, és gömb alakot vettek fel, létrehozva a kondrumként ismert kőzetgömböcskéket (WOOD, 2005). Ezek a tizedmilliméterestől centiméteres nagyságig terjedő aggregátumok aztán tovább keringtek, és ütközések során egyre nagyobbra nőttek, egészen kőzetalkotó mennyiségig. Így jöttek létre az első bolygókezdemények (planetezimálisok).



20. ábra A fiatal Nap körül kristályosodó ásványhalmazok BÉRCZI (2000) után

A fiatal Naprendszer így formálódó égitestjeinek további fejlődésében nagy szerepet játszott a hőmérséklet, ugyanis, ha egy égitest kellően felmelegedett (radioaktív elemek bomlásának, ütközések hatására, esetleg saját méretéből kifolyólag) megindult benne az övekre tagolódás (differenciálódás) folyamata (BÉRCZI, 2007). Ennek hatására a nehezebb elemek, mint például a Fe és Ni a bolygókezdemény közepe felé kezdtek mozogni. Ezzel egyidejűleg könnyebb elemek, például a kőzetalkotó Si a „felszín” közelében maradnak. Azon bolygókezdemények, melyeken bekövetkezett a differenciálódás folyamata, teljesen elvesztették kondriumjaikat és a koaguláció során szerzett szöveti bélyegeiket (21. ábra).

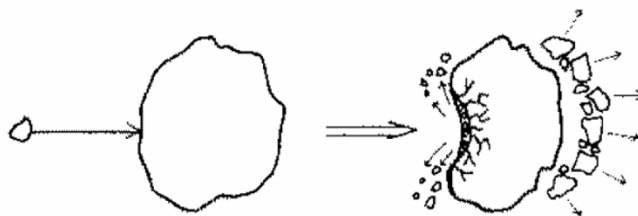


21. ábra Fent: egy kondritos égitest fejlődése, hagymahéj-szerkezet kialakulása;
lent: vasmag és bazaltos akondritos rétegek differenciációja (BÉRCZI, 2008)

Ezzel ellentétben, az NWA1 és NWA2 meteoritok olyan szülő égitestekről származnak, amelyek (i) nem tartalmaztak elég rövid felezési idejű radioaktív anyagot mely a differenciálódásig fűthette volna őket, (ii) nem akkumuláltak kellő mennyiségű anyagot (kis méretűek maradtak), (iii) nem érte őket olyan becsapódási esemény, mely jelentősen átolvasztotta volna őket. Ezen tulajdonságoknak köszönhetően NWA1 és NWA2 szülő égitestjei megőrizték azt a megközelítőleg homogén állapotot, amelyben ~4,5 milliárd évig – formálódásuk óta – a világűrben keringtek.

Noha nem differenciálódott égitestekről származnak, mindkét meteorit esetében némi átalakulást így is szenvedett az eredeti, kondritos szövet. Ez annak köszönhető, hogy szülő égitestjeik anyaga kellően felmelegedett ahhoz, hogy ásványos anyaguk átkristályosodjon. Ezzel magyarázhatók a meteoritokban található „elmosódott” körvonalú, átlagosan nagy átmérőjű kondrumok, a szokásosnál nagyobb térfogatot kitevő mátrix, illetve a egyensúlyi állapotot tükröző (nem zónás) olivin és piroxén kristályok.

A világűrben töltött évmilliárdok alatt az NWA1 és NWA2 szülő égitestjeit számos becsapódás által okozott sokk-hatás érte, melyeknek ékes bizonyítékai a mindkét meteoritban megtalálható, unduláló kioltást mutató olivin és plagioklász kristályok, az olivin kristályok szabálytalan és planáris törései, valamint az opak sokk-erek és olvadási-zsebek. Egy-egy ilyen becsapódás hatására vált le szülő égitestjéről az NWA1 és NWA2 is. A meteoritok szülő égitestről történő leválási idejének, valamint a kőzetek világűrben töltött idejének meghatározásában a folyamatban lévő nemesgáz analitikai elemzések fognak segítséget nyújtani.



22. ábra Sokk-metamorfózist szenvedő égitest modellje (STÖFFLER ET AL., 1991)

Földre érkezésük után az NWA1 és NWA2 meteoritok jelentős ideig voltak kitéve a szaharai időjárás elemeinek. Olvadási kérgük elvesztette feketés színét, a sivatagi por láthatóan behatolt néhány zsugorodási repedésbe. Mikroszkóp alatt jól kivehető a két meteorit szövetének nagy százalékát befedő, limonit okozta barnás elszíneződés, valamint felfedezhető a Fe-Ni oxidációja is. NWA1 teresztrikus kora 5 000 – 15 000 év, míg NWA2 teresztrikus kora 15 000 – 30 000 év között lehet.

7. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni Dr. Benkó Zsolt témavezetőmnek a munkám során nyújtott szakértelmét, segítségét és útmutatását, valamint Dr. Szabó Gergely témavezetőmnek, hogy rendelkezésemre bocsátotta két saját gyűjteményében őrzött meteoritját. Molnár Katának hálával tartozom a dolgozat lektorálásáért és hasznos szakmai megjegyzéseiért.

Köszönettel tartozom továbbá Dr. Ulrich Ottnak a MAP 215-50 tömegspektrométer használatában történő segítségéért, valamint Dr. Christoph Hauzenbergernek és munkatársainak az EPMA mérések lehetővé tételéért.

8. Irodalomjegyzék

- Anders E., Ebihara M. (1982): Solar-System abundances of the elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 46(11), 2363-2380.
- Bérczi Sz. (2007): A Naprendszer égitestjeinek fejlődése: A kisbolygók, *ELTE TTK Fizikai Intézet, Anyagfizikai Tanszék, FIZIKAI SZEMLE* 2007/3, 88-94.
- Bérczi Sz. (2000): Kis atlasz a Naprendszerről (1): Planetáris- és anyagtérképek a holdközetekekről, meteoritekekről. *Budapest*.
- Bérczi Sz., Gucsik A., Hargitai H., Józsa S., Kereszturi Á., Nagy Sz., Szakmány Gy. (2008): Kis atlasz a Naprendszerről (11): Közetszövegek a Naprendszerben, *ELTE TTK/MTA Geonómia Bizottság, Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport. Budapest*.
- Blander M., Fuchs H. L. (1975): Calcium-aluminum-rich inclusions in the Allende meteorite: evidence for a liquid origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 39/12, 1605-1619.
- Brearley A. J. & Jones R. H. (1998): Planetary Materials, edited by James J. Papike, Berlin, Boston: De Gruyter, 125-137.
- Breznia A. (1904): The arrangement of collections of meteorites. *Proceedings of the American Philosophical Society*. 43(176), 211-247.
- Connelly N. J., Bizzarro M., Krot A. N., Nordlund Å., Wielandt D., Ivanova M. A. (2012): The Absolute Chronology and Thermal Processing of Solids in the Solar Protoplanetary Disk. *Science* 338, 651-655.
- Evensen N.M., Hamilton P.J., O'nions R.K. (1978): Rare-earth abundances in chondritic meteorites, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42/8, 1199-1212.
- Gilmour J.D. (2010): "Planetary" noble gas components and the nucleosynthetic history of solar system material, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74/1, 380-393.
- Gregory T. (2020): Meteorite. *John Murray Press*
- Kelemen P.B., Hanghoj K. and Greene A.R. (2004): One View of the Geochemistry of Subduction-related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust. *Treatise on Geochemistry. Holland, H.D. and Turekian, K.K. (Editors), Elsevier, Amsterdam*. 3, 593-659.

- Masuda A., Nakamura N., Tanaka T. (1973): Fine structures of mutually normalized rare-earth patterns of chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 37/2, 239-248.
- Marrocchi Y., Avive G., Estrade N. (2015): Multiple carriers of Q noble gases in primitive meteorites. *Geophysical Research Letters*. 42, 2093–2099.
- Martin P.M., Mason B. (1974): Major and trace elements in the Allende meteorite. *Nature* 249(5455), 333-334.
- Nakamura N. (1974): Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 38/5, 757-775.
- Oba Y., Takano Y., Furukawa Y. et al. (2022): Identifying the wide diversity of extraterrestrial purine and pyrimidine nucleobases in carbonaceous meteorites. *Nature Communications*. 13, 2008.
- Ott, U., Pető, M., Pécskay, Z., Benkő, Zs. (2018): Noble gas study of the Kaba meteorite In: Nagy, M.; Rózsa, P; McIntosh, R. W.: Átfogó kutatások a kabai meteoriton: a kabai meteorit hullásának 160. évében rendezett nemzetközi konferencia előadásai. Debrecen, Magyarország: Debreceni Egyetemi Kiadó 288 p. 151-158.
- Piralla M., Villeneuve J., Schnuriger N., Bekaert V. D., Marrocchi Y. (2023): A unified chronology of dust formation in the early solar system, *Icarus*, 394.
- Rudnick, R.L. and Fountain, D.M. (1995): Nature and composition of the continental crust - a lower crustal perspective. *Reviews in Geophysics*. 33, 267-309.
- Sears D. W., & Dodd R. T. (1988): Overview and classification of meteorites. *Meteorites and the early solar system*, 3-31.
- Sen G., Frey F. A., Shimizu N., Leeman W. P., (1993): Evolution of the lithosphere beneath Oahu, Hawaii: rare earth element abundances in mantle xenoliths. *Earth and Planetary Science Letters*. 119, 53-69.
- Stöffler D, Keil K., Edward S. R.D., (1991): Shock metamorphism of ordinary chondrites, *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 55/12, 3845-3867.
- Van Schmus W. R., Wood J. A. (1967): A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 31/5, 747-765.
- Waajen A.C., Lima C., Goodacre R. et al. (2024): Life on Earth can grow on extraterrestrial organic carbon. *Scientific Reports*. 14, 3691.

- Wedepohl K.H. (1995): The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59, 1217-1239.
- Weisberg M. K., McCoy Timothy J., and Krot, A. N. (2006): Systematics and evaluation of meteorite classification. *Meteorites and the Early Solar System II*, edited by Lauretta, Dante S. and Sween, H. Y., Jr., 19–52. Univ. of Arizona Press
- Wlotzka F. (1993): A weathering scale for ordinary chondrites. *Meteoritics*, 28., 460.
- Wood A. J. (2005): The Chondrite Types and their Origins. *ASP Conference Series, Vol. 341*.