

Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar
Természet- és Környezetföldrajz Tanszék

A hordalékszállítás dinamikájának vizsgálata OSL vizsgálatok segítségével magashegységi környezetben

OTDK Dolgozat

Készítette: **Khern Kíra**
SZTE TTIK Földrajz BSc III. évfolyam

Témavezető:
Dr. Sipos György
egyetemi docens

Szeged, 2024

Tartalomjegyzék

1.Bevezetés	3
1.1. Problémafelvetés.....	3
1.2. Kutatási célok.....	4
2. Előzmények	5
2.1. A lumineszcens kormeghatározás fizikai alapjai	5
2.2. Méréstechnika: az egymintás regenerációs protokoll (SAR).....	7
2.3. A reziduális dózis fogalma folyóvízi üledékekben	9
2.4. A folyóvízi hordalék virtuális sebességének fogalma	10
3. Vizsgálati terület	13
4. Módszerek	16
4.1 Mintagyűjtés	16
4.2 Laboratóriumi feltárás	18
4.3 Méréstechnika	20
5. Eredmények	24
5.1. A vizsgált minták lumineszcens tulajdonságai	24
5.2 A reziduális dózis értékek nagysága.....	25
5.3. A reziduális dózis paraméterek folyásirányban megfigyelhető változása	27
5.4. A hordalékmozgás relatív sebességének változása a hossz-szelvény mentén..	28
6. Következtetések.....	30
7. Összegzés	32
8. Hivatkozások jegyzéke	33

1. Bevezetés

1.1. Problémafelvetés

A vízfolyások fejlődése szempontjából a hordalékszállítás sebessége, mértéke és jellege kiemelkedően fontos. Hordalékszállítás térbeli és időbeli mintázata egy folyón belül jelentősen változhat az esés viszonyok, vagy épp az éghajlat változása következtében. Így elkülöníthetők olyan szakaszok, ahol az erózió vagy éppen az akkumuláció dominál. Mindez hatással van a vízfolyás hasznosíthatóságára, geomorfológiai és ökológiai folyamataira. Ugyanakkor a hordalékszállítás sebessége és nagysága további fontos információkat is hordoz, többek között utal a hegységi vízgyűjtő lepusztulási ütemére (Bridge 2003, Knighton 2014).

Magashegyi környezetben a szállított hordalék tömegének legnagyobb részét a görgetett hordalék teszi ki. Jelentős esés mellett igen dinamikusan mozog a mederben, így a klasszikus értelemben vett módszerekkel való méréssel is komoly akadályokba ütközhetünk (Kiss et al. 2008, Právetz et al. 2017).

Közép-Ázsia magashegységeiben, így például a Nyugati-Tien-san területén a közeljövőben a környezet jelentős átalakulására lehet számítani. A gleccserek olvadása, a lejtők stabilitásának csökkenése az üledékes folyamatok várható változását idézik elő.

A vízfolyások hordalékszállításának vizsgálatára számos módszer létezik, melyek a hordalék csapdázásán, esetleg a mederanyag hosszabb távú egyenlegének medermorfológiai felmérésével történő becslésén alapszik. A fent említett környezetben ezen módszerek időigényessé és körülményessé válnak (Knighton 2014). Ezért a vízgyűjtő szintű folyamatok feltárásához olyan eljárási módra van szükség, amely segítségével a szemcsék üledékes előtörténete is meghatározható.

Az újabb, lumineszcens vizsgálatokon alapuló módszerek alapvetően az üledékszemcsék utolsó napfényre kerülése, azaz a szemcse lerakódásának ideje állapítható meg (Murray és Wintle 2003). A módszer alkalmazása folyóvízi környezetben sok esetben bonyolult, mert a szemcséket nem éri elegendő napfény, így nem lesz teljes a kioltódásuk (Rittenour 2008). Ez azonban utalhat a hordalékszállítás sebességére és dinamikájára, így a kioltódás hiányának mértékével lehetőség nyílhat a hordalékszemcsék virtuális sebességének, azaz a szemcsék által a mederben egységnyi idő alatt megtett távolság meghatározására.

Az ez irányú, lumineszcens vizsgálatokon alapuló módszerek jelenleg is fejlesztés alatt állnak, kevés konkrét alkalmazás ismert egyelőre (Gray 2018).

1.2. Kutatási célok

Vizsgálataim célja egy új, optikailag stimulált lumineszcencián (OSL) alapú módszer tesztelése a Nyugati-Tien-san területén található Zaravshan völgy mentén. Hosszan elnyúló vízgyűjtője, viszonylag homogén kőzettani felépítése és a magashegységi körülményekből adódó intenzív lepusztulás által kiemelkedően jó lehetőséget biztosít a módszer tesztelésére. Az egyszemcsés pIRIR (post-infrared infrared stimulated luminescence) méréseket több, különböző hőmérsékleten is elvégeztem és a kapott eredményeket összehasonlítottam.

További kutatási célom volt, az üledékszemcsék természetes kioltódásában felismerhető térbeli mintázatok feltárása a folyó mentén, illetve azon szakaszok kijelölése a mérések segítségével, melyeket az erózió, illetve az akkumuláció jellemez. Célul tűztem ki továbbá annak megvizsgálását, hogy az adatok alapján milyen lehetőségei és korlátait vannak a mintaterületen a hordalékszállítás dinamikáját leíró virtuális hordaléksebesség kiszámításának, melynek segítségével a későbbiekben következtetni lehet a geomorfológiai folyamatok intenzitására és a hegység lepusztulási ütemére.

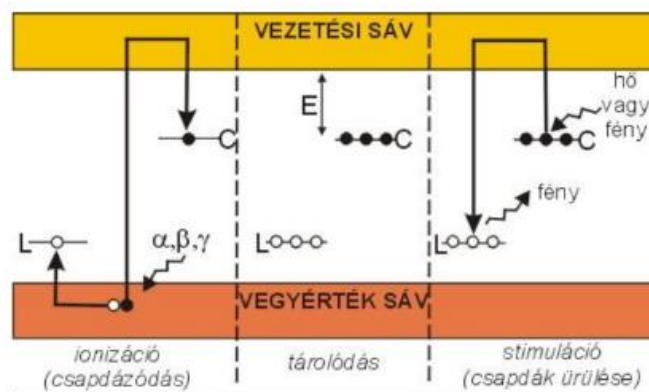
2. Előzmények

2.1. A lumineszcens kormeghatározás fizikai alapjai

A lumineszcens kormeghatározást főként a földtudományok és a régészet terén alkalmazzák. Az eljárás segítségével elsősorban a szervetlen, félvezető ásványok korát, valamint kerámia, téglá és ezen anyagokból készült tárgyak kiégetésének időpontját lehet meghatározni (Novothny és Újházy 2000). A végeredményben kapott időintervallum általában 10-300 000 év közé tehető, egyes esetekben 700 000-800 000 évre is kiszélesíthető (Novothny és Újházy 2000). A kormeghatározás során két módszert lehet alkalmazni: a kerámiák esetében a hővel stimulált azaz Termolumineszcenciát (TL), az üledékek kapcsán pedig a fény segítségével, azaz Optikailag Stimulált Lumineszcenciát (OSL) (Novothny és Újházy 2000).

A nemzetközi szakirodalmat és a hazánkban végzett kutatásokat megvizsgálva igen szélesebb körben alkalmazható a lumineszcens kormeghatározás. Például paleoklimatológiai kutatásokra, múltbeli környezet rekonstruálására, geomorfológiai folyamatok intenzitásának és idejének vizsgálatára. Magyarország esetében a hazai löszfeltárások datálása (Borsy et al. 1979, Frechen et al. 1997, Novothny et al. 2002) és a pleisztocén végi, holocén futóhomok mozgások és fluviális tevékenységek során alkalmazzák leginkább (Újházy et al. 2003, Kiss et al. 2006, Thamó-Bozsó et al. 2007, Sipos et al. 2009) ezt a kormeghatározási módszert.

A vizsgálatot legtöbbször kvarc és földpát ásványi szemcséken szokták elvégezni. Ezen félvezető ásványok esetében a kristály rácsszerkezetéből adódóan az elektronok a vegyérték sávban tartózkodnak (Wintle 2008). A környezet radioaktív sugárzása, viszont az alapjában a vegyérték pályákon elhelyezkedő elektronokat magasabb energia szintre, a vezetési sávba juttatja (1. ábra). A gerjesztés során rekombinációs lyukakat hagynak maguk után az töltések, amelyekkel később (a gerjesztési állapot megszűnésével) egyesülnek (Wintle 2008, Aitken 1982, Novothny és Újházy 2000).



1. ábra: A lumineszcencia folyamatának energiaszint diagramja (Aitken 1998 alapján)

A félvezető kristályrács hibái miatt (hiányzó negatív ion, pozitív töltésű szennyeződés) a mozgó elektronok „csapdába” is eshetnek a két sáv között (1 ábra). Ez a folyamat addig tart, amíg a csapdák nem telítődnek teljesen. A telítődési szint határozza meg a módszer felső mérési határát (Aitken 1982, Novothny és Ujházy 2000). Ezt követően az elektronok hő vagy fény általi stimuláció (Termolumineszcencia, TL, illetve Optikailag Stimulált Lumineszcencia, OSL) válnak szabaddá és rekombinálnak a vegyérték pályán hátrahagyott „lyukakkal” (Aitken 1982). A fent említettek alapján megállapítható, hogy minél nagyobb intenzitást mérünk, annál több elektron került csapdába, tehát annál régebben történt a kerámiák kiégetése, vagy az üledék áthalmozódása (Sipos 2010).

A kormeghatározás során meg kell határozni a paleodózist (elemzett minta szemcséiben rögzített összes dózis) laboratóriumi megfelelőjét, az ún. egyenérték dózist (D_e) és a dózisteljesítményt (D^*) (a szemcsékben egységnyi idő alatt elnyelt dózis nagysága). ezen két mutató felhasználásával lehet megadni az üledék képződési vagy a kerámia készítési korát.

$$(1) \quad Kor (ka) = \frac{D_e (Gy)}{D^* (Gy \text{ } ka^{-1})}$$

ahol D_e az egyenérték dózis, D^* pedig a dózsteljesítményt jelöli

Az egyenérték dózis mérése a korábbiakban felvázolt mechanizmus alapján a mintákból kinyerhető, természetes és laboratóriumi mesterséges radioaktív sugárzás hatására felhalmozódó lumineszcens jel segítségével, úgy nevezett dózis lumineszcens válasz összefüggés felállításával lehetséges (Aitken 1998). A végeredményként meghatározott korokat a mérés idejétől visszaszámítva adják meg, általában ezer évben (ka) (Sipos 2010).

Mindkét tényező megadásához összetett mérések szükségesek. Meghatározásukat számos külső környezeti tényező befolyásolja, köztük a minták egyedisége. Minden minta más és más összetételű, habár a meghatározás főbb alapelvei a legtöbb esetben megegyeznek, így is megannyi tesztet és előzetes mérést igényel a megfelelő mérési módszer kiválasztása és a mérési paraméterek beállítása (Novothny és Újházy 2000).

2.2. Méréstechnika: az egymintás regenerációs protokoll (SAR)

Az OSL kormeghatározás más technikákkal szemben nem minimum kort határoz meg az üledék lerakódása, hanem közvetlenül a lerakódás idejét adja meg (Rittenour 2008). A laboratóriumi mérések során a kormeghatározáshoz az egyenérték dózis (D_e) meghatározása kulcs fontosságú, a lumineszcens mérések gyakorlatilag erre irányulnak (Wintle 2008). Az OSL mérések során az egyenérték dózis meghatározásához előnyös a SAR protokoll használata. Célszerűnek mondható, ugyanis kevés mennyiségű minta mérésével, alacsony hibával rendelkező eredményt kapunk. Illetve a mintán belül tudjuk vizsgálni a dóziseloszlást, azaz egyenérték dózis szórását, ami az üledékképződési folyamat gyorsaságára is utalhat (Boetter-Jensen et al 2003).

A SAR protokoll különböző mérések ciklikus ismétlődését takarja (1. táblázat). Első körben a minta természetes sugár dózisból eredő lumineszcens intenzitása kerül megmérésre. Az ezt követő, ismétlődő ciklusokban, viszont már laboratóriumi besugárzás által regenerált lumineszcens válaszok mérése történik a későbbi dózis válasz görbe felállításához. A besugárzásokat az előmelegítés folyamata követi, ami egy rögzített hőmérséklet (általában 160 és 300°C között) közvetítését jelenti 10 másodpercig. A megfelelő hőmérséklet kiválasztásához előmelegítési plató teszt szükséges. Fontos, hogy az előmelegítés közvetlenül az OSL mérés előtt történjen, hogy az instabil csapdák ürüljenek (1. táblázat). Következő lépésként az OSL mérést kell végrehajtani 125°C-on 40 másodpercig, amennyiben kvarc szemcsék mérése történik kék fénnel, amennyiben földpát szemcsék mérése történik IR fénnel stimulálják a mintát. A hőhatások következtében a mérési folyamat során változhat az egységnyi dózistra adott lumineszcens jel nagysága, azaz a minta dózis érzékenysége. Így a protokoll második felében szükség van úgy nevezett teszt dózis beiktatására, melynek értéke a mérési folyamat során állandó, így a minta érzékenység változása nyomon követhető (Duller 2008).

A protokoll során 5-10 regenerációs mérési ciklust alkalmaznak, majd következik az úgynevezett rekuperációs teszt, amellyel az előmelegítés során létrejövő töltés áthalmozódást lehet vizsgálni. A következő lépésben a visszaforgatási teszt jön, amikor valamely regenerációs ciklust újra lefuttatják és megvizsgálják a két azonos dózis által generált, teszt dózissal korrigált lumineszcens intenzitás hányadosát, melynek ideális esetben közelítene kell az 1-hez. Végül kvarcok mérése esetén egy újbóli radioaktív besugárzást követően egy infravörös stimuláció is történik, amivel az esetleges földpát szennyezést lehet megvizsgálni (Murray and Wintle 2003).

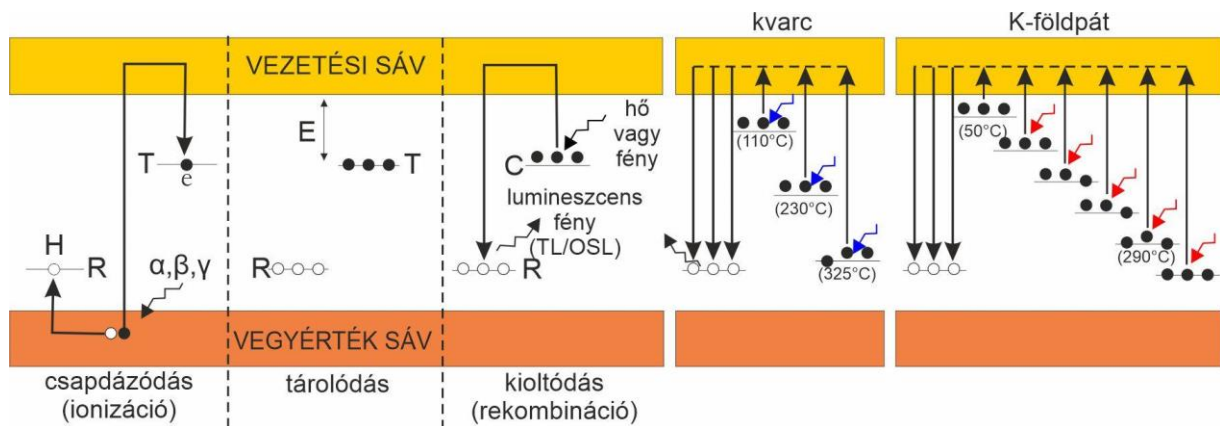
1. táblázat: *A SAR mérési protokoll felépítése Murray és Wintle (2003) alapján.*

Lépés	Kezelés	Lumineszcens mérés
1.	Dózis besugárzás	-
2.	Előmelegítés 160-300°C 10s-ig	-
3.	Optikai stimuláció 125°C-on 40s-ig	L_i
4.	Tesztdózis besugárzás	-
5.	Melegítés 160°C-ig	-
6.	Optikai stimuláció 125°C-on 40s-ig	T_i
7.	Optikai stimuláció 40s-ig előmelegítéshez képest kisebb hőfokon	-
8.	Visszatérés az első lépéshez	-

A SAR protokoll alkalmazása főleg az üledékek vizsgálata kapcsán terjedt el és vált néhány év alatt vezető szerepűvé, hiszen ezen eljárással meg lehet szüntetni, vagy legalább is ki lehet küszöbölni az érzékenység változásból adódó méréstechnikai problémákat.

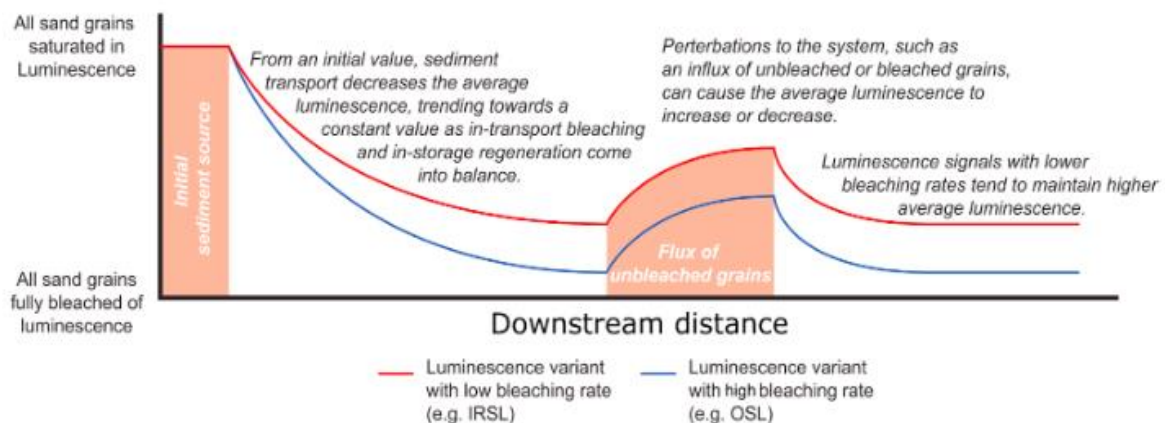
2.3. A reziduális dózis fogalma folyóvízi üledékekben

A 2. ábra hasonlóan a lumineszcencia folyamatának energiaszintjeit ábrázolja, azonban a kioltódási szakasz kiegészítésre került. Jól ábrázolja, hogy a kvarc esetében jól elkülöníthető energia szintek találhatók, így a napfény kék komponense által mélyebben elhelyezkedő csapdákból ki tudnak szabadulni az elektronok. A K-földpátnál nincsenek jól elkülöníthető csapda energia tartományok. A sekélyebben elhelyezkedő csapdákból még végbe mehet a kioltódás, a mélyebben elhelyezkedő esetében viszont hosszabb fény kitettségre vagy termális aktivációra van szükség az elektronok kioltódásához.



2. ábra: Aitken 1998 lumineszcencia folyamatának energia szint diagramjának kiegészítése

Ahogy azt láttuk, az OSL vizsgálatok alapja, hogy az üledékszállítás során az elnyelt dózisra utaló lumineszcens jel napfény hatására kioltódik. Folyóvízi környezetben ez nem minden esetben megy teljesen végbe, ennek kapcsán említhető meg a reziduális dózis (D_{res}) fogalma (Gray et al 2017, Tóth 2017), amely alatt a szemcsékben nem teljesen kioltódott lumineszcens jelnek megfelelő radioaktív dózis nagyságát értjük.



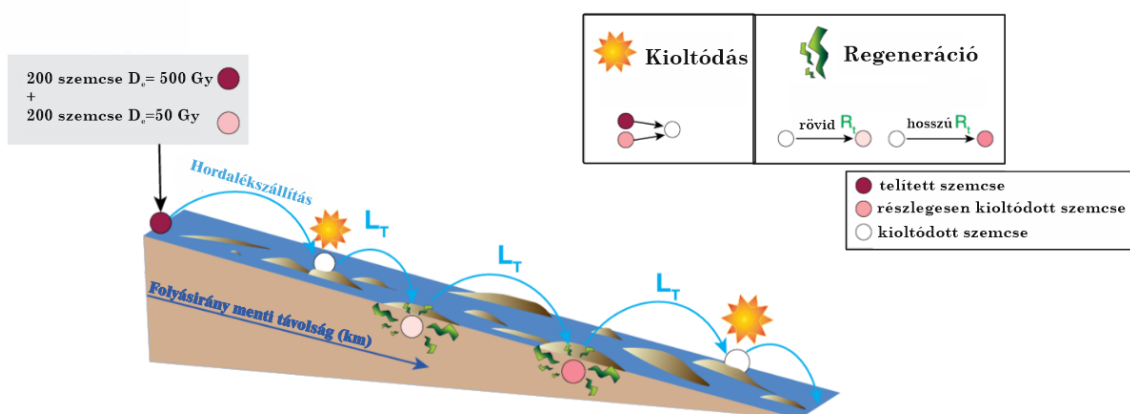
3. ábra: Lumineszcens jel változásának modellje folyásirányban (forrás: Gray et al. 2019).

Ha egy ásványi szemcse bekapcsolódik a fluviális szállítás folyamatába, akkor a benne tárolt OSL jel csökkenésnek indul. Ennek megfelelően, ha reziduális dózis a folyó hossz-szelvénye mentén vizsgáljuk, általánosságban csökkenő tendencia figyelhető meg az értékekben. Ennek egyik oka, hogy a szállítódás során többször ismétlődő fluviális mobilizáció miatt a napsugárzás általi kioltódás teljesebbé válhat (Tóth 2017). A részleges kioltódást a lerakódását megelőző szállítási idő rövideége, a víz jelentős árnyékoló hatása, vagy a szemcsék esetleges koaguláció is elősegítheti (Tóth 2017).

Ha a szemcse eltemetődik D_{res} értéke újra növekedésnek indul, feltéve, hogyha védve van a napfénytől. Az ártéren való eltemetődés ideje és a háttérsugárzás intenzitása (dóziráta) határozza meg a felépülő lumineszcens jel nagyságát. Így az ásványi szemcsékben eltárolt dózis segítségével le lehet követni a szállítás és eltemetődés többször ismétlődő ciklusait (Gray et al., 2019).

2.4. A folyóvízi hordalék virtuális sebességének fogalma

A lumineszcens jelet alapvetően kormeghatározáshoz használják. A legújabb kutatások és vizsgálati módszerek azonban rámutattak, hogy a lumineszcencia segítségével más geomorfológiai, hidrogeográfiai folyamatokat is lehet számszerűsíteni, ezek közé tartozik az üledékszállítás dinamikája vagy intenzitása a folyóvízben (Gray et al., 2017).



4. ábra: Lumineszcens jel változása folyásirányban Guyez et al., 2023 alapján.

Az hordalékszállítás dinamikáját fejezi ki gyakorlatilag az úgynevezett virtuális hordalékszálítási sebesség, amely a szemcsék által a mederben egységnyi idő alatt megtett távolságot takarja. Ezzel utalni lehet a különböző geomorfológiai folyamatok intenzitására és a lepusztulás ütemére (Brenna et al., 2019). A 4. ábra ábrázolja a szemcse folyásirányban való szállítását, amely során mozgási és lerakódási időszakok váltják egymást. Előbbi esetében a reziduális dózis érték csökkenése megy végbe, míg a lerakódási időszakok során nőhet a D_{res} értéke (Guyez 2023). A fenti folyamatokat figyelembe véve a 2. egyenlet egy kombinált üledék- és lumineszcencia-transzport modellt ír le, amely figyelembe veszi az üledék mozgását, annak időbeli és térbeli változását, a reziduális dózis szintjének emelkedését a hordalék raktározódása esetén, és a lumineszcens kioltódást a hordalék mozgása során (Gray 2018).

$$(2) \quad Q_s \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial t} + \mathcal{L} \frac{\partial Q_s}{\partial t} = -u \left[Q_s \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} + \mathcal{L} \frac{\partial Q_s}{\partial x} \right] + Q_s [f_E \mathcal{L}_b - f_D \mathcal{L} - \kappa \mathcal{L}^\beta]$$

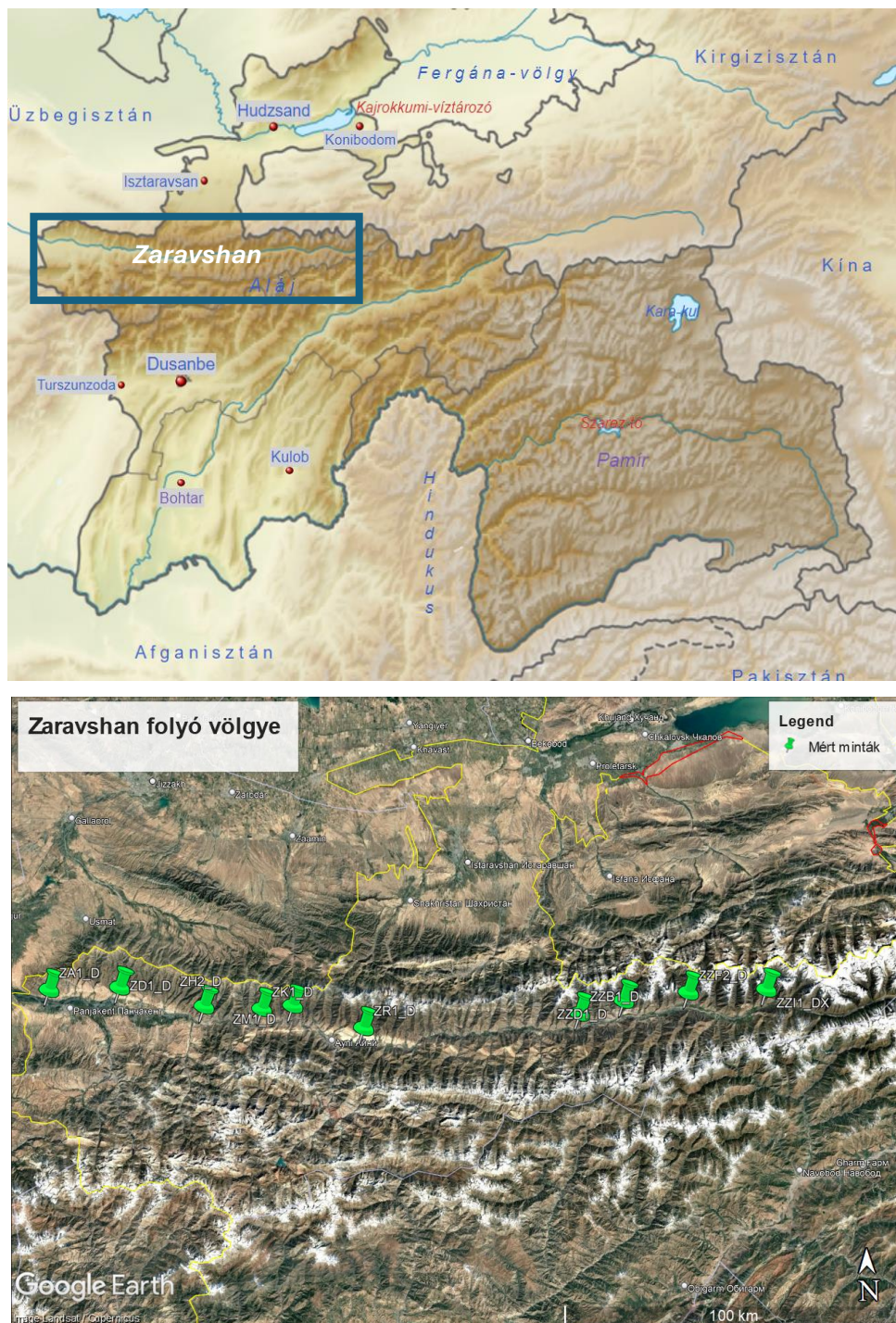
ahol: $\mathcal{L}$ (dimenzió nélküli) a hordalékszemcsékben mérhető érzékenységgel korrigált lumineszcens intenzitás a vízfolyás mentén x (m) távolságban, Q_s (m^3/s) a hordalékhozam, t (s) az idő, u (m/s) az üledék mozgási sebessége a mederben, f_E és f_D a Q_s hordalék hozam azon része ami mobilizálódik, illetve elraktározódik a mederben egységnyi idő (s^{-1}) alatt, $\mathcal{L}_b$ (dimenzió nélküli) a raktározott hordalék átlagos lumineszcens intenzitása, κ (s^{-1}) és β (dimenzió nélküli) tapasztalati úton meghatározott állandó, melyek a lumineszcens kioltódás ütemét írják le vízalatti körülmények között.

Korábbi kutatások bebizonyították, hogy a különböző ásványoknak változó időtartamú napfényre van szükségük ahhoz, hogy teljesen kioltódjanak (Murray et al. 2012). A K-földpátok esetében meg van a lehetőség, hogy ugyanabból a szemcséből származó jelek lekérése történjen, különböző optikai visszaállítási sebességek spektrumával (pIRIR, post-infrared infrared stimulated luminescence) (Stokes et al., 2001). Így az üledékes szemcsékben mért dózishoz való illeszkedés az áramlási távolság függvényében lehetővé teszi egy folyóspecifikus hosszskála létrehozását, amely jellemzi a folyami szállítási viszonyokat, és számszerűsíti a szállítási távolságot (Gray et al., 2017).

A mutató más természetes folyamatok esetében is nyújthat információkat. Tájékoztat a geomorfológiai kapcsoltság állapotáról, mivel az üledékek összekötik a folyószakaszokat folyásirányában, valamint oldalirányban a meder és az ártér között (Wohl, 2017). Emellett információt szolgáltat a különböző antropogén zavaró hatások jelentőségéről a medermorfológiai folyamatok tekintetében. Például a zavaróhatást megelőző medermorfológiáról, mivel a víz és az üledék kölcsönhatása jellegzetes folyóvízi formákat hoz létre (Wohl et al., 2015). Kiindulási pont lehet további folyóvízi meder helyreállítási tevékenységek tekintetében, képet adva a természetes hordalékszállítás jellegzetességeiről. A folyók természetes állapotának helyreállítása ugyanis a legtöbb esetben nem kivitelezhető, a virtuális sebesség, viszont útmutatást tudna adni mekkora nagyságrendű volt az üledék mozgása mielőtt azokat valamilyen emberi hatás érte volna (Wohl, 2017).

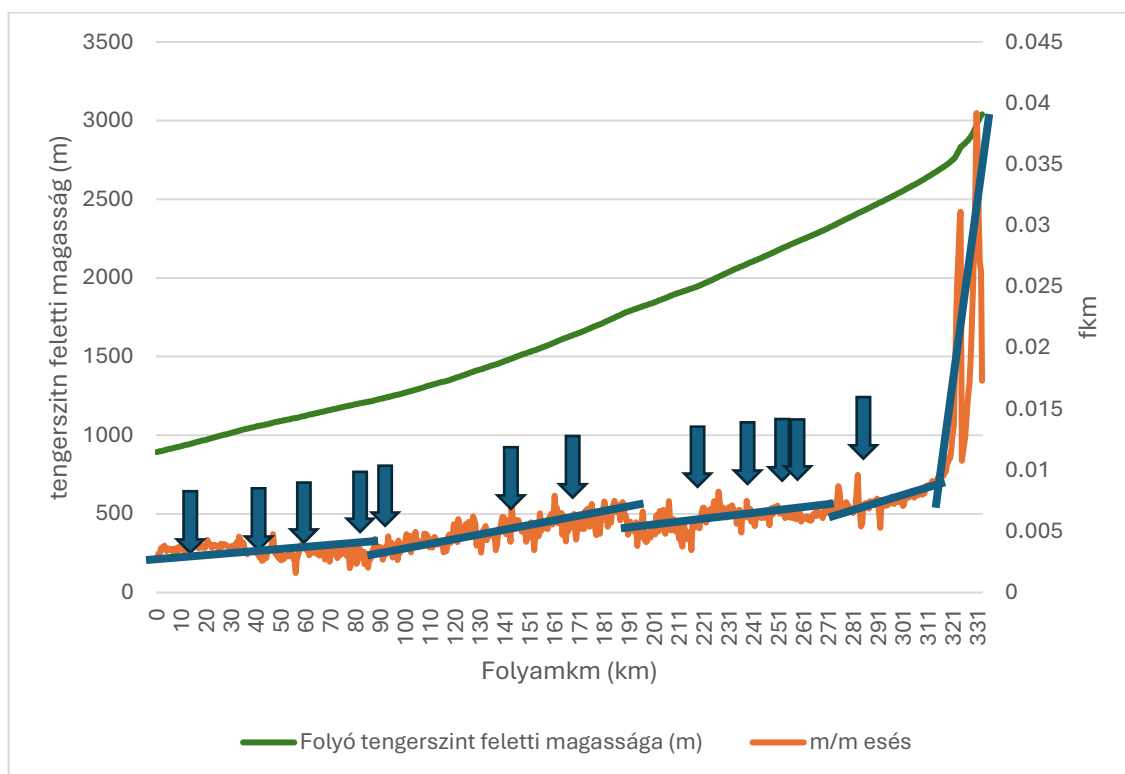
3. Vizsgálati terület

A Tien-san hegység az Eurázsia-hegységrendszer tagjaként Közép-Ázsiában található. A hegység öt részre tagolódik: Belső-, Központi-, Keleti-, Északi- és Nyugati-Tien-san részre. A vizsgált Zaravshan folyóvölgy a Nyugati-Tien-san hegységben található, Tádzsikisztán északnyugati területén (6. ábra).



6. ábra: A Nyugati-Tien-san elhelyezkedése, valamint a vizsgált Zaravshan völgy a mintavételi pontokkal

A Nyugat-Tien-san területén az éghajlati körülményeket a nyugatias szelek határozzák meg. Évi átlagos csapadékmennyisége 400-450 mm/év. A csapadék nagy része a téli hónapokban esik le hóformájában, a nyári hónapokban szinte egyáltalán nincs. Évi közepes hőmérsékletét nagyban befolyásolja az Indiai óceántól való nagy távolság. A legmelegebb és leghidegebb hónapok átlaghőmérséklete között akár 20 °C-os különbség is kialakulhat (Opala et al. 2017).



7. ábra: A Zaravshan folyó esésgörbéje és az 1 km-es szakaszonként bekövetkező esés változás (Vincze 2023), amely alapján különböző szakaszokra tagolható a folyó. A függőleges nyilak a mintavételi helyeket jelölik.

A Zaravshan folyó völgy hossza 334 km, a folyó vízgyűjtő területe hozzávetőleg 12000 km². A legmagasabb hegycsúcsok a vízgyűjtőn 5000 m felett találhatók. A Zaravshan gleccser körülbelül 2900 m magasságban végződik, a vizsgált folyóvölgyi szakasz 1000 m magasságban található az Üzbegisztáni határtól. Az átlagos esés a vizsgált szakaszon 0,0064 m/m (7. ábra).

A víz nagy részét a vízgyűjtő területre lehulló csapadékból szerzi, így az árvizek és a lefolyás mértéke nagyban függ a magasabb területen található hó, illetve gleccserek olvadásától. A folyó vízjárása ennek megfelelően évszakos ingadozást mutat az év során, a nagyvizek jellemzően tavasztól egészen nyár közepéig tartanak. Általában nyáron is bő vízhozam figyelhető meg, de a klímaváltozás következtében csökken a hóban tárolt vízkészletek, ami a korai őszi vízhozamok jelentős csökkenéséhez vezethet (Opala et al. 2017).

4. Módszerek

4.1 Mintagyűjtés

A mintavételi pontok felkeresése és a mintagyűjtés 2023. augusztus 23-30 között történt a Zaravshan folyó mentén a Szegedi Tudományegyetem tádszikisztáni expedíciója keretében. A gyűjtés kisvíz idején zajlott, a mederben felszínre kerülő oldalzatonyokon (8. ábra). A mintavételi helyek koordinátái rögzítésre kerültek, a mintavételi pontok elhelyezkedését a 6. ábra mutatja. A mintavételi pontok kijelölése során a morfológiailag megfelelő helyek azonosítása mellett az egyenletes eloszlás is fontos szempont volt, így hozzávetőleg 20 kilométerenként történt a mintagyűjtés a folyóvölgy jellegzetesen elkülönülő, szűkebb és tágabb szakaszain.

Jelen dolgozatban 12 minta mérése történt meg (2. táblázat). A vizsgált minták változatos morfológiájú szakaszokat képviselnek, vannak köztük olyanok, ahol a völgy szűk, meredek, a folyó kanyarogva bevágódik és vannak széles völgytalpú, fonatos mintázatú szakaszok is.

A méréshez felhasznált homokos üledék körülbelül 20-30 cm mélységből lett begyűjtve. A bolygatatlan mintákat 5 cm átmérőjű és 15 cm hosszú PVC csővel gyűjtötték (8. ábra). Ahhoz, hogy megfelelő anyagmennyiség álljon rendelkezésre az elkülönítésre szánt különböző ásványi frakciók tekintetében párhuzamos mintavétel történt két PVC csővel.

2. táblázat: *A vizsgált mintagyűjtési pontokhoz tartozó adatok*

terepi azonosító	laboratóriumi azonosító	hossz-szelvény menti távolság (km)	morfológiai jellemzők
ZA1_D	OSZ 2708	13	széles völgytalp, fonatos szakasz
ZD1_D	OSZ 2722	40	széles völgytalp, fonatos szakasz
ZH2_D	OSZ 2725	73	széles völgytalp, fonatos szakasz
ZK1_D	OSZ 2728	95	kiszélesedő völgytalp, átmeneti mintázat
ZM1_D	OSZ 2731	107	szűk, meredek völgy, kanyarogva bevágódó szakasz
ZR1_D	OSZ 2737	141	közepesen szűk teraszos völgy, kanyarogva bevágódó szakasz
ZV1_D	OSZ 2753	168	szűk, meredek völgy, kanyarogva bevágódó szakasz
ZZ1_D	OSZ 2759	239	közepesen szűk teraszos völgy, kanyarogva bevágódó szakasz
ZZB1_D	OSZ 2760	223	szűkülő völgy teraszokkal, kanyarogva bevágódó szakasz
ZZE2_D	OSZ 2781	254	szűkülő völgytalp, fonatos szakasz
ZZF2_D	OSZ 2785	261	széles völgytalp, fonatos szakasz
ZZI1_DX	OSZ 2796	289	széles völgytalp, átmeneti mintázat



8. ábra: *Mintagyűjtés a Zaravshan folyó völgyében*

4.2 Laboratóriumi feltárás

A minták feldolgozása kisnyomású nátrium lámpák sárga fénye mellett történt a direkt fényhatás kivédése érdekében. A minták bolygatatlan mintatartóban, egy PVC csőben kerültek a laboratóriumba. A PVC cső mindkét vége műanyaganyagsapkával légmentesen le volt zárva. A henger két végénél eltávolításra került a felső kb. 5 mm vastag homokréteg, mivel ezeket a részeket érte már napfény. Ezután többszöri átmosás segítségével leválasztottam a homokfrakciót, majd kiszárítottam a mintákat.

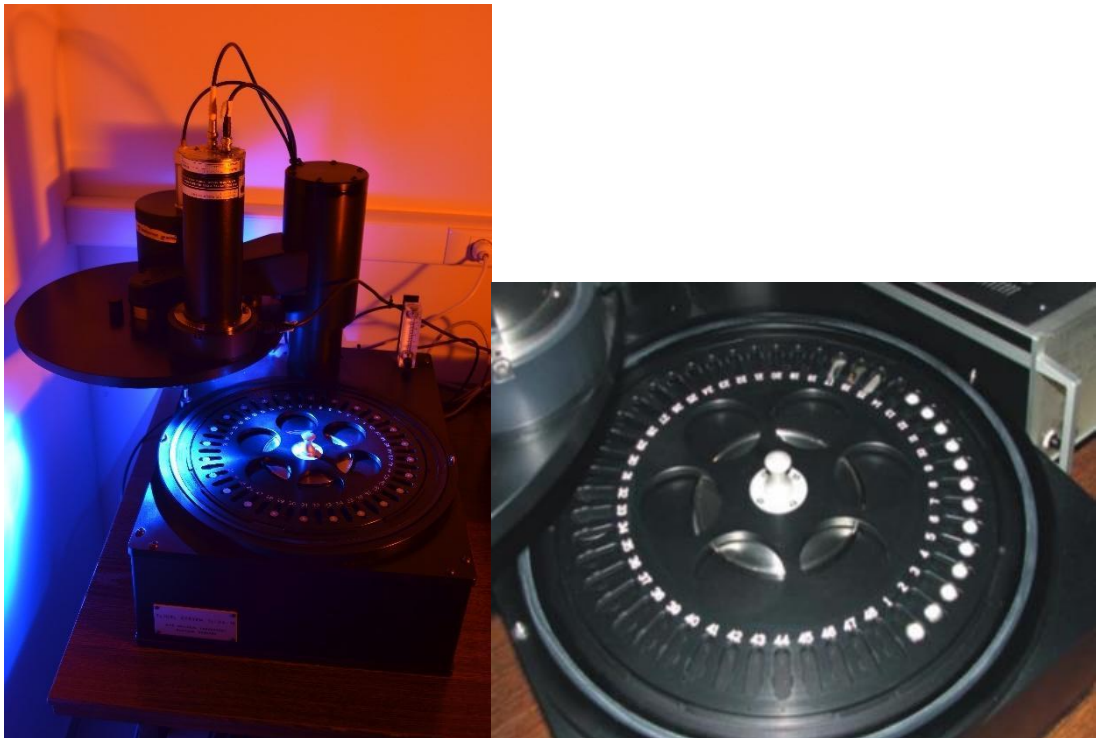
A szitálás során 212-300 μm közötti átmérőjű szitákat használtam. Minden egyes használatbavétel után alaposan megtisztítottam a szitákat egy ultrahangos fürdő segítségével. Ezt követően savas kezelésen estek át a minták. Először 10%-os sósavat (HCl) alkalmaztam az esetleges mésztartalom eltávolítása érdekében. A folyamatot addig ismételtam, amíg a pezsgés nem szűnt meg. Később 10%-os hidrogén-peroxiddal (H_2O_2) folytatódott a savas kezelés, mivel kevés szerves anyagtartalom volt a mintákban, ezt a folyamatot elég volt egyszer elvégezni. A folyamatos savas pH jelenlét miatt a fakulás jelensége léphet fel, így a minták pH-ját semlegesre állítottam 2 M-os NaOH segítségével.

A sűrűség különbségen alapuló ásvány szeparációhoz nehézfolyadékot, azaz nátrium-politungsztanátot (LST) használtam. A folyamat során a különböző sűrűségű (2,53 és 2,58 g/cm^3) nehéz folyadék oldatokkal leválasztottam a könnyű és nehéz ásványokat. Ezt követően a kémcsöveket 1 napig állni hagytam. Ekkor a kisebb sűrűségű ásványok felülre, a nagyobb sűrűségű ásványok alulra mozogtak. Két kör segítségével a kívánt sűrűségtartományba eső ásványok leválaszthatóvá váltak.

Ezután a káliumföldpát 40 percig tartó maratása következett 10%-os hidrogén-fluoriddal (HF). Majd a minták 10%-os HCL és metanollal való átmosása, pH értékek beállítása. Végezetül a mintákat szilikon spray-vel befűjt hordozó alumínium korongokra helyeztem.

4.3 Méréstechnika

Az OSL mérésekhez a RISO TL/OSL DA 20 típusú mérőműszert használtam. A műszer dózisteljesítménye $0,109 \text{ Gy/s}$, amelyet egy $90 \text{ Sr}/90 \text{ Y}$ béta sugárforrás szolgáltat (9. ábra). Az elvégzett mérések célja a különböző minták szemcséiben lévő reziduális dózis meghatározása volt. Ehhez először egy standardizált dózis lumineszcens válaszgörbét (standardised growth curve – SGC) kellett felállítani. Egy módosított pIRIR SAR protokoll segítségével, mindez többszemcsés (multigrain) mérés keretében történt ez meg. (3. táblázat)



9. ábra: OSL méréshez használt lumineszcens mérőműszer (jobb oldali kép) és az OSL méréshez használt mintatartó (baloldali kép) – SZTE

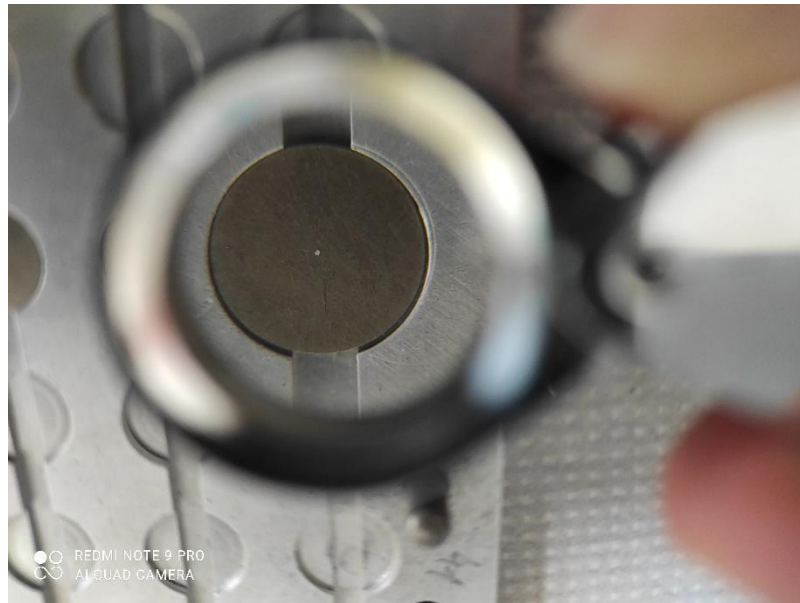
3. táblázat: *A standardizált dózis lumineszcens válaszgörbék (SGC) felállításához használt teljes körű lumineszcens mérés SAR mérési protokollja*

Lépések	Kezelés	Lumineszcens mérés
1.	Dózis besugárzás: *D ₀ , D ₁ 600s, D ₂ 100s, D ₃ 1100s, D ₄ 2600s, D ₅ 4600s, D ₆ 600s	-
2.	Előmelegítés 300°C-on 60s-ig	-
3.	Optikai stimuláció 50, 200, 290°C-on 210s-ig	L _i
4.	Teszt dózis besugárzás: 600s	-
5.	Melegítés 300°C-ig 60s-ig	-
6.	Optikai stimuláció 50, 200, 290°C-on 210s-ig	T _i
7.	Optikai stimuláció 200s-ig 325°C-on	-

* D₀: a természetes jel mérésénél nem adunk regenerációs dózist

Összesen 6 minta került megmérésre, amely segítségével felállításra került az SGC görbe. Első körben az OSZ2725, OSZ2728, OSZ2331-es mintákból, majd az OSZ2737, OSZ2760, OSZ2785-ös mintákból lett 3-3 korong felhasználva. A korongok nagyságát kimaszkolással állítottam be, ami ebben az esetben 2 mm átmérő volt. A mérések több, különböző hőmérsékleten: 50, 200, 290 °C-on is el lettek végezve. Az alkalmazott dózisok a mérések során: 100s, 600s, 1100s, 2600s, 4100s voltak. A regenerált dózisokhoz tartozó L_x/T_x értékeket renormalizáltam a 600 s (53 Gy) hosszú regenerációs dózis L_x/T_x értékét felhasználva. Az így kapott, különböző mintákra, azonos regenerációs dózis felhasználásával előállított L_x/T_x értékeket átlagoltam, meghatároztam szórásukat, mely megadta az SGC görbe adatpontjainak bizonytalanságát, hibáját.

Ezt követően a kioltódás mértékére utaló paraméterek kerültek meghatározásra módosított egyszemcsés módszerrel (10. ábra, 4. táblázat). Reziduális dózis mérése során rövidített méréseket alkalmaztam, melynek során mindösszesen a természetes lumineszcens jel mérése történt meg, illetve az ennek normalizációjára és renormalizációjára szükséges lumineszcens intenzitások. Az így kapott értékekből az SGC összefüggés felhasználásával meg lehetett határozni az egyes szemcsékben tárolt reziduális dózis nagyságát. A mérésekhez használt protokoll a 4. táblázatban látható. A méréseket minden minta esetében 24-24 korongon, illetve szemcsén végeztem el. Az eredmények közül leválogatásra kerültek a 10 Gy alattiak, és a telített szemcsék. Kiszámításra került a reziduális dózis mintánkénti átlaga és a szórás értéke. Ezt követően megvizsgáltam az értékek völgy mentén tapasztalható különbségeit és térbeli mintázatát.



10. ábra: *Egyszemcsés méréshez használt korong*

4. táblázat: *A minták reziduális dózisának meghatározásához használt egyszemcsés mérések során alkalmazott rövidített mérési protokoll*

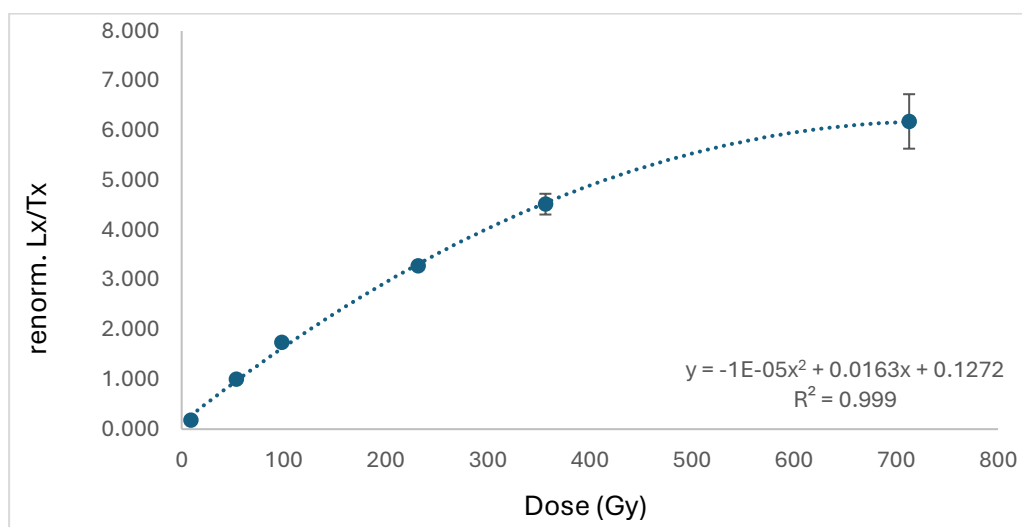
Lépések	Kezelés	Lumineszcens mérés
1.	Dózis besugárzás: *D ₀ , D ₁ 600s	-
2.	Előmelegítés 300°C-on 60s-ig	-
3.	Optikai stimuláció 50, 200, 290°C-on 210s-ig	L _i
4.	Tesztdózis besugárzás: 600s	-
5.	Melegítés 300°C-ig 60s-ig	-
6.	Optikai stimuláció 50, 200, 290°C-on 210s-ig	T _i
7.	Optikai stimuláció 200s-ig 325°C-on	-

* D₀: a természetes jel mérésénél nem adunk regenerációs dózist

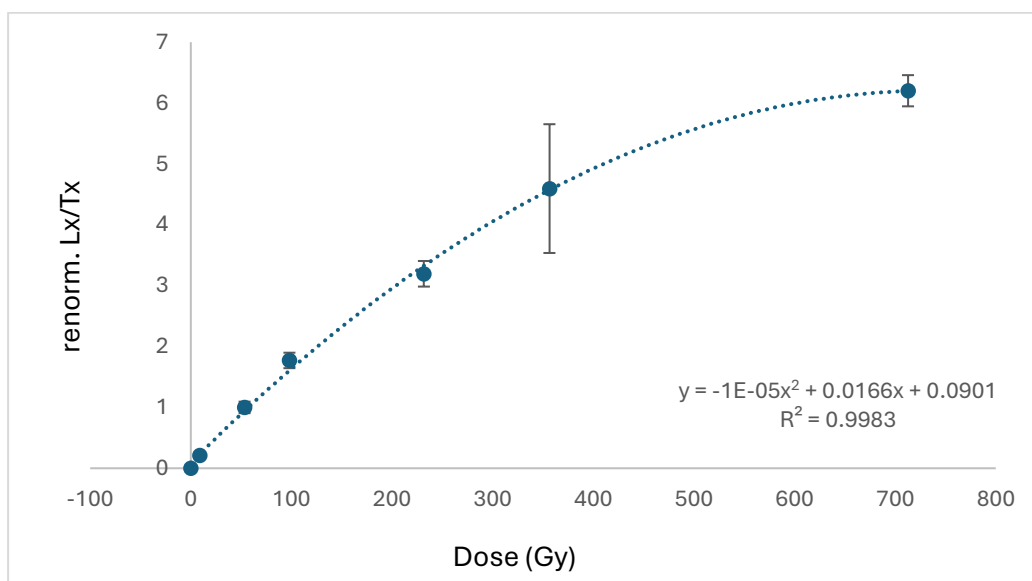
5. Eredmények

5.1. A vizsgált minták lumineszcens tulajdonságai

A mérések során 3 hőmérsékleten: 50, 200, 290°C vizsgáltuk a mintákat, minden egyes hőmérséklet esetében felállítottuk a SGC görbét. Az összefüggés felállításához görbe az adatpontokra másodfokú polinomiális összefüggést illeszttem. Megállapítható, hogy az 50 °C-on és a 290 °C-on végzett mérések Lx/Tx pontjai nagymértékben, szinte teljesen illeszkednek a függvényre (11. és 12. ábra), a determinációs együttható (R^2) értékei rendre közelítenek az 1-es értékhez

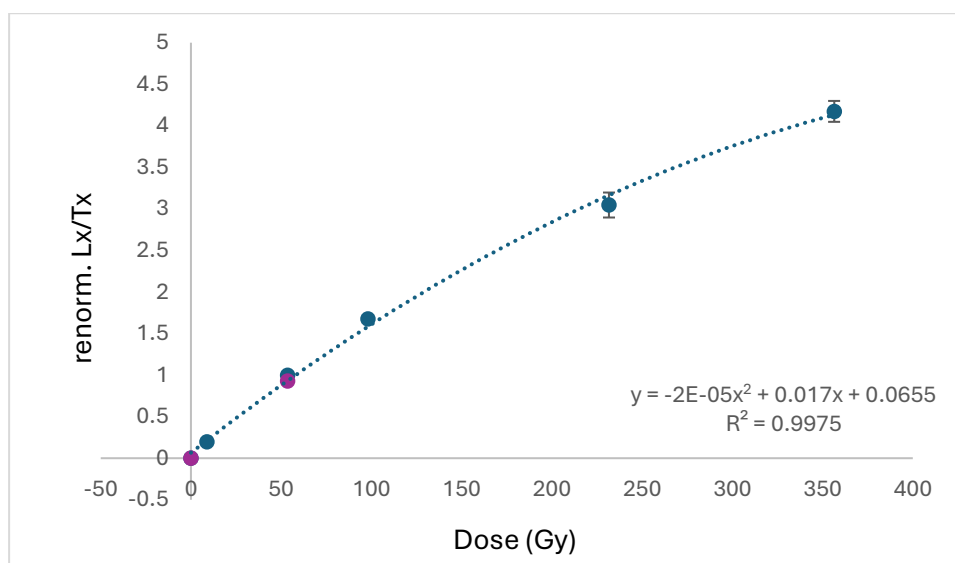


11. ábra: IR 50°C-os lumineszcens válaszok alapján felállított SGC görbe



12. ábra: PIRIR 290°C-os lumineszcens válaszok alapján felállított SGC görbe

A 200°C-os pIRIR mérésekhez tartozó Lx/Tx pontok kis mértékben rosszabbul illeszkednek az összefüggésre ($R^2=0,9975$), ugyanakkor elmondható, hogy ez esetben volt a legkisebb a különböző minták méréséből származó Lx/Tx értékek szórása, azaz ebben az esetben a legkisebb az adatpontokhoz tartozó bizonytalanság (13. ábra). Összességében a vizsgálat további részében mindhárom hőmérsékleten elvégzett mérések Lx/Tx adatai lettek alkalmazva az üledékszállítás dinamikájára mutató különbség megállapítása érdekében.



13. ábra: PIRIR 200°C-os lumineszcens válaszok alapján felállított SGC görbe

5.2 A reziduális dózis értékek nagysága

Az 5. táblázat összefoglalóan mutatja be a mérések során kapott reziduális dózisokat, melyeket egyszemcsés pIRIR mérésekkel került meghatározásra, a korábbiakban felállított SGC görbék felhasználásával. A reziduális dózis értékét a mérések átlaga és szórása alapján lett megadva. A legnagyobb értékek a következők voltak: IR 50°C – 143,6 Gy, PIRIR200°C – 306,66 Gy, PIRIR290°C – 361,57°C, míg a legkisebb értékek: IR50°C – 31,1 Gy, PIRIR200°C – 63,17Gy, PIRIR290°C – 388,7 Gy. A mérések alapján a különböző hőmérsékleten mért IR50°C és PIRIR200°C reziduális dózisok között átlagosan 58%-os, PIRIR200°C és PIRIR290° 38%-os különbség mutatható ki, ami jól mutatja, hogy a különböző mélységű csapdák eltérő mértékben oltódnak ki az üledék szállítása során. A reziduális dózisok értékeken túl az egy-egy mintában előforduló telített, illetve teljesen kioltódott szemcsék arányát is vizsgáltuk (5. táblázat és 14. ábra).

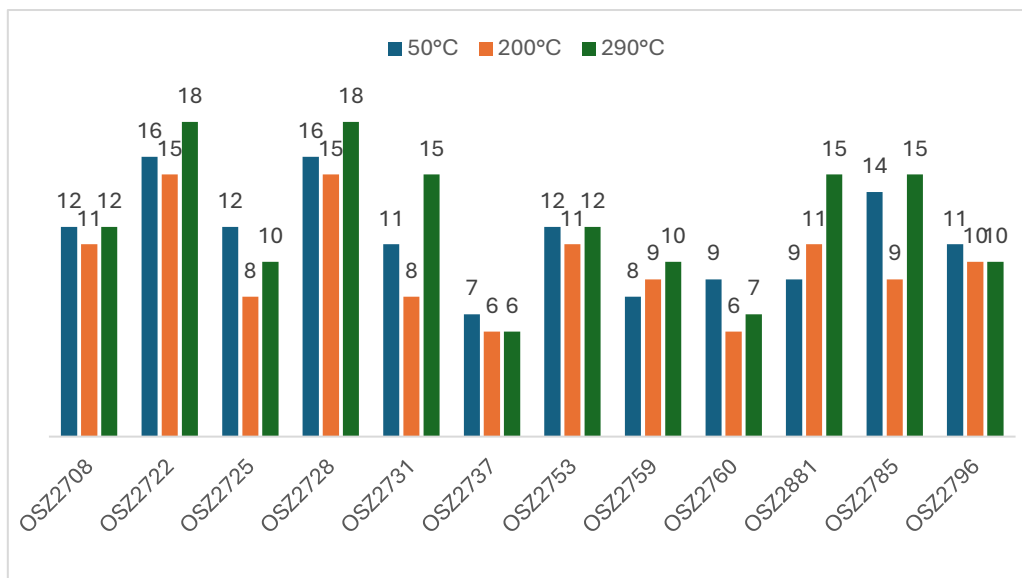
Míg telített szemcse minden mintában előfordult, addig teljesen kioltódott szemcse csak a legalsó és a legfelső szakaszon volt azonosítható (5. táblázat). Amennyiben a különböző stimulációs hőmérsékletek mellett is megvizsgáljuk a teljesen telített szemcsék számát, akkor nem tapasztalunk jelentős eltéréseket, azaz a könnyen ürülő csapdák is hasonló arányban telítettek, ami arra enged következtetni, hogy ezek a szemcsék nem, vagy alig kerültek korábban napfényre (14. ábra).

5. táblázat: *A mért reziduális dózis értékek*

Terepi kód	Vizsgált szemcsék száma	Telített szemcsék száma*	Teljesen kioltódott szemcsék száma **	$D_{res} \pm SE$ IR 50°C	$D_{res} \pm SE$ PIRIR 200°C	$D_{res} \pm SE$ PIRIR 290°C
ZA1_D	24	11	3	32,60±6,54	124,78±22,4 8	213,3139
ZD1_D	24	15	0	51,40±8,18	177,90±43,7 0	188,61±34,2 5
ZH2_D	24	8	0	47,06±8,68	135,75±27,0 5	241,07±31,8 3
ZK1_D	24	15	0	58,64±7,94	202,52±41,7 9	361,57±63,9 4
ZM1_D	24	8	0	104±19,41	205,62±25,3 7	328,36±32,0 3
ZR1_D	24	6	0	62,94±22,02	148,31±29,6	225,58±38,3 7
ZV1_D	24	11	0	86,90±29,79	190,34±40,6 2	297,98±49,2 7
ZZ1_D	24	9	0	82,40±22,85	173,67±18,0 8	345,02±29,8 6
ZZB1_D	24	6	1	41,6±7,22	112,91±15,4 8	207,57±34,5 2
ZZE2_D		11	0	143,60±28,4 0	306,66±48,3 3	388,70±45,6 0
ZZF2_D	24	9	3	31,06±7,23	63,17±13,99	189,1±43,12
ZZI1_D X	24	10	0	112,78±31,3 1	207,63±41,1 2	341,50±49,3 0

*azon szemcsék száma, melyek pIRIR 200°C mellett telítettnek bizonyultak (Guyez et al. 2023)

** azon szemcsék száma, melyek reziduális dózisa 10 Gy-nél alacsonyabb pIRIR 200°C (Guyez et al. 2023)

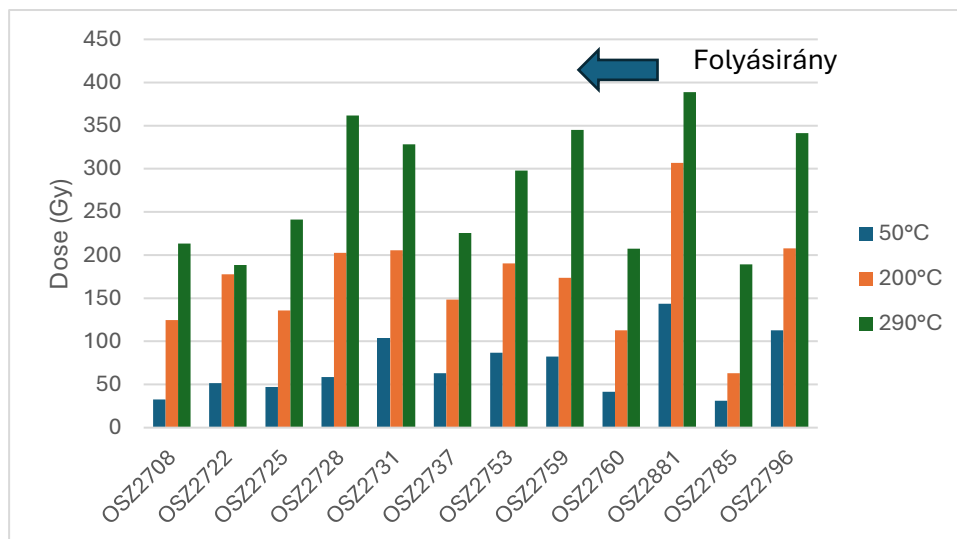


14. ábra: Telített szemcsék száma különböző stimulációs hőmérsékletek mellett.

5.3. A reziduális dózis paraméterek folyásirányban megfigyelhető változása

A vizsgált folyószakaszon a reziduális dózis értékek markáns növekedése figyelhető meg 261 és 254 fkm, 223 és 168 fkm, valamint 141 és 95 fkm között. A várakozásoknak megfelelően a nehezen üríthető csapdákhoz köthető pIRIR 290°C reziduális dózis mutatta a legnagyobb értékeket (15. ábra). A sekélyebb, ezáltal könnyebben kioltható csapdák mérésére szolgáló pIRIR 200°C mérés átlagosan 38%-kal kisebb reziduális dózist mutatott. Ennél alacsonyabb jellemzik az IR 50°C-on mért reziduális dózisokat, ezek jelentősen, 74%-kal kisebb értékeket adtak, ugyanakkor megfigyelhető, hogy nem egységesek a fenti arányszámok, azaz például hasonló pIRIR 200°C reziduális dózissal rendelkező minták esetében is egészen eltérő IR 50°C eredmények születtek (15. ábra).

Az egyes reziduális dózis paraméterek maximumai ugyanabban a pontokban figyelhető meg. Így mind a pIRIR 290 °C, a pIRIR 200°C és IR 50°C esetében is 254 fkm-nél volt a legnagyobb érték (15. ábra).

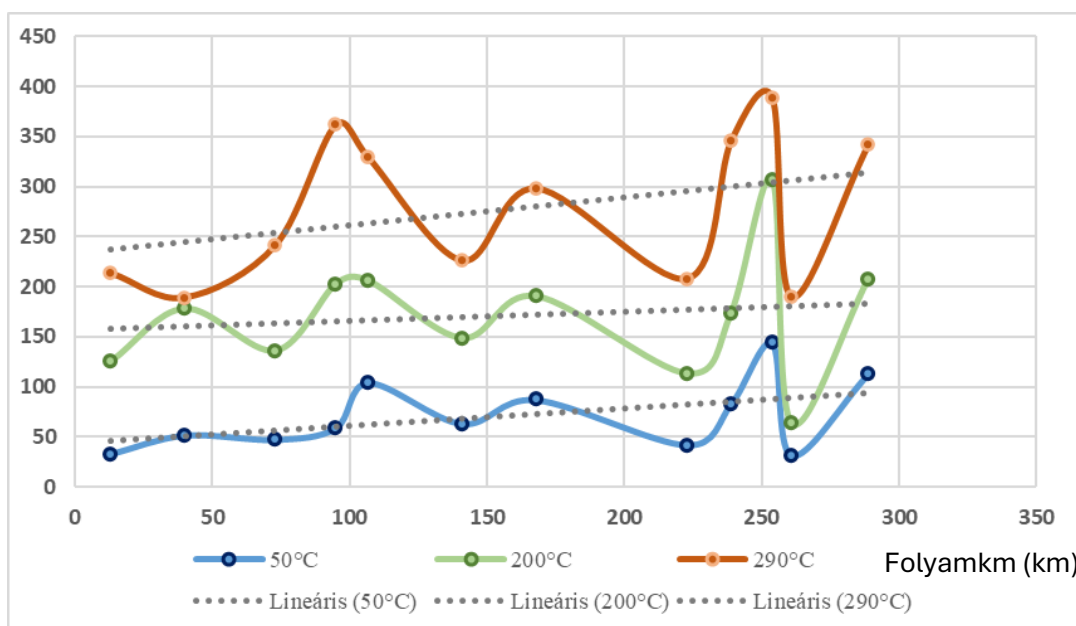


15. ábra: A reziduális értékek ábrázolása mindhárom hőmérsékleten

5.4. A hordalékmozgás relatív sebességének változása a hossz-szelvény mentén

A 16. ábra a 3 hőmérsékleten mért reziduális dózis értékeit ábrázolja a folyamkilométer függvényében. Ez alapján elmondható, hogy a folyóvölgy vizsgált szakaszán a mért dózisok értéke folyamatosan változik, növekvő és csökkenő tendenciával jellemezhető szakaszok váltakoznak mindhárom vizsgált hőmérsékleten. A völgy felső szakaszán először csökkenés, majd hirtelen növekedés figyelhető meg, lejjebb még két csúcs jelentkezik. Csökkenés ott figyelhető meg, ahol az üledék szállítása során bekövetkező reziduális dózis csökkenés felülmúlja azon, magas reziduális dózissal rendelkező szemcsék hatását, melyek a Zaravshan fő- és mellékvölgyeiben végbemenő erózió által kerülnek nagy valószínűséggel a hordalékba. Ezzel szemben a növekedés a telített szemcsék nagyobb mobilizációjára, azaz a fő és mellékvölgyekben az erózió növekvő mértékére utal.

A minták közötti távolság alapján megadható, hogy egységnyi távolságon mekkora növekmény, illetve csökkenés jellemzi a reziduális dózis értékét. 289 és 261 fkm között a pIRIR 200°C reziduális dózis csökken 5,16 Gy/fkm-rel. Ezt követően a 261 és 254 fkm között 34,79 Gy/fkm lesz a növekmény, majd újra csökkennek az értékek. 254 és 239 fkm között 12,92 Gy/fkm a csökkenés, míg 239 és 223 fkm között 3,80 Gy/fkm. A következő szakaszon 223 és 168 fkm között 0,30 Gy/fkm a növekmény. Ezután 168 -141 fkm között újra csökkenés, majd emelkednek a D_{res} értékek. 141 – 107 fkm közti szakaszon 1,69 Gy/fkm a növekmény, 107 – 95 fkm között 0,26 Gy/fkm. Ezt követően, pedig a vizsgált szakasz végéig csökkenés lesz 95 – 73 fkm között 3 Gy/fkm, 73 – 40 fkm között 1,28 Gy/fkm.



16. ábra: Reziduális dózis értékének változása a távolság függvényében

6. Következtetések

A módszertani vizsgálatok alapján elmondható, hogy a különböző pontokon gyűjtött minták mérése alapján felállított standardizált dózis lumineszcens válasz görbék nagyon magas determinációs együtthatóval rendelkeznek. Az adatpontok bizonytalansága is csak egy két esetben számottevő. Ez alapján elmondható, hogy a teljes völgyre vonatkozóan érvényes összefüggéseket sikerült felállítani, mely megfelel a Mueller és Preusser (2022) tanulmányában azonosított kritériumoknak. Ennek segítségével az egyszemcsés mérések során elegendő a természetes lumineszcens intenzitás mérése, mely alapján a reziduális dózis értéke könnyen meghatározható. Az általunk kifejlesztett módon, többszemcsés mérőműszeren elvégzett egyszemcsés mérésekre vonatkozóan szakirodalmi említést nem találtunk. A kialakított módszertan a későbbiekben nagy mértékben hozzá fog járulni a reziduális dózis adatok mennyiségének növeléséhez.

A mérések alapján a mintákból meghatározott átlagos reziduális dózis értékek térben nagy változatosságot mutatnak. Ugyan általánosságban csökkenő tendencia rajzolódik ki, a szakirodalmi megfigyelésekhez igazodva, miszerint, ha a folyó többször is átdolgozza a hordalékát, így a napsugárzás általi kioltódás is teljesebb lehet (Tóth 2017, Gray 2017). Ugyanakkor megfigyeléseink alapján egy-egy szakaszon belül akár jelentős növekmény is előfordulhat. A növekedés hátterében az erózió mértéke, a szakasz morfológiája és a kapcsolódó mellékvölgyek állnak. Azokon a szakaszokon, ahol a völgy szűk, meredek és a folyó kanyarogva bevágó jelleget ölt a D_{res} értéke egyértelműen növekszik. Ezen szakaszok a 261-254 fkm, 223 – 168 fkm és 141 – 95 fkm között találhatók. Ahol morfológiai szempontból széles völgytalp és fonatos szakaszjelleg figyelhető meg, kisebb az erózió mértéke ott jobban át tud dolgozódni az üledék és csökkenő tendencia mutatkozik a reziduális dózis értékeiben.

Ha azt feltételezzük, hogy a vizsgált szakasz mentén a mellékvölgyek hozzájárulása a hordalék keverékhez hasonló, mivel a mellékvölgyek vízgyűjtő területe és esése is hasonló, akkor a reziduális dózis értéke utal a fővölgyben mozgó hordalék virtuális sebességére. Ez alapján elmondható, hogy 141 fkm - 95 fkm és 261 – 239 fkm között gyorsabban mozog a hordalék, a völgy többi szakaszához képest.

A fentiek alapján ugyanakkor a (2) egyenletben vázolt virtuális sebesség modell (Gray 2018) a további vizsgálatokhoz kiegészítésre szorul. A fővölgyhöz szorosan kapcsolódó mellékvölgyekből beáramló telített szemcsék ugyanis hatással jelentős hatással lehetnek a kapott eredményekre. A továbbiakban az ezekből származó üledékek feldolgozásával lehetőség nyílik a reziduális dózisok alakulásának hátterében álló folyamatok jobb megismerésére.

7. Összegzés

Lumineszcens szempontból hasonlóan viselkednek a különböző pontokon gyűjtött minták, ezért a völgy egészére érvényes SGC összefüggés állítható fel, a másodfokú polinominális összefüggés jól illeszthető rá. Az egyszemcsés mérések alapján a különböző hőmérsékleten mért IR50°C és PIRIR200°C reziduális dózisok között átlagosan 58%-os, PIRIR200°C és PIRIR290° 38%-os különbség mutatható ki.

A várt eredményekkel szemben a völgyben sok helyen növekedett a reziduális dózis értéke. Ennek hátterében az erózió mértéke és a völgyhöz kapcsoló mellékvölgyek állnak. Azonban, ha azt feltételezzük, hogy a mellékfolyókból érkező hatás hasonló mértékű, akkor a hordalékszállítás sebességére vonatkozóan is kaphatunk információt. A legnagyobb növekményt azokon a szakaszokon tapasztaltuk, ahol a folyó szűk völgyben kanyarogva bevágódó jelleget ölt. A táguló, fonatos szakaszokon gyors csökkenésbe kezdenek a reziduális dózis értékek.

A továbbiakban a rendelkezésre álló minták vizsgálatával a mellékvölgyek hatását, illetve a fonatos szakaszokon a reziduális dózisok csökkenését szeretném részletesebben vizsgálni. Így a jövőben a részletesebb adatok fényében feltárhatóvá válik a folyó hordalékszálítási dinamikája.

A jelen kutatás alapján a földpátokhoz kapcsolódóan mérhető IR és pIRIR reziduális dózisok ígéretes eszköznek bizonyulnak a folyóvízi felszínfejlődés feltárására.

8. Hivatkozások jegyzéke

- Aitken M. J. 1998: An Introduction to Optical Dating. Oxford University Press. London.
- Boetter-Jensen, L., McKeever, Stephen W. S. Wintle, A. G. 2003: Optically stimulated luminescencedosimetry. Elsevier, 2003
- Borsy, Z., Fészerfalvi, J., Szabó, P.P. 1979: Thermoluminescence dating of several layers of the loess sequence at Paks and Mende (Hungary). – Acta Geologica Academiae Scientiarum Hungaricae 1979, 451-459.
- Brenna, A., Surian, N., Mao, L., 2019: Virtual velocity approach for estimating bed material transport in gravel-bed rivers: Key factors and significance. Water Resources Research 55, 1651-1674.
- Bridge, J. S. (2003). Rivers and floodplains: forms, processes, and sedimentary record. John Wiley & Sons.
- Duller, G. 2008: Luminescence Dating: Guidelines on using luminescence dating in archaeology
https://www.researchgate.net/publication/297669518_Luminescence_Dating_Guidelines_on_using_luminescence_dating_in_archaeology (megtekintve: 2024.05.16)
- Frenchen, M., Hortváth, E., Gábris, Gy. 1997: Geochronology of Middle and Upper Pleistocene Loess Sections in Hungary. – Quaternary Research 48, 291-312.
- Gray, H.J., Jain, M., Sawakuchi, A.O., Mahan, S.A., Tucker, G.E., 2019: Luminescence as a Sediment Tracer and Provenance Tool. Reviews of Geophysics 57, 987-1017.
- Gray, H.J., Tucker, G.E., Mahan, S.A., McGuire, C., Rhodes, E.J., 2017: On extracting sediment transport information from measurements of luminescence in river sediment. Journal of Geophysical Research: Earth Surface 122, 654-677.
- Guyez, A., Bonnet, S., Reimann, T., Carretier, S., and Wallinga, J.: A Novel Approach to Quantify Sediment Transfer and Storage in Rivers – Testing Feldspar Single-Grain pIRIR Analysis and Numerical Simulations, J. Geophys. Res.-Earth, 128

- Kiss T, Nyári D, Sipos Gy. 2006: Homokmozgások vizsgálata a történelmi időkben Csengele területén. In Tájörnyezet és társadalom, Tanulmányok Keveiné Bárány Ilona professzor asszony tiszteletére, Kiss A, Mezősi G, Sümeghy Z (szerk). SZTE, Szeged, 373–382.
- Kiss, T., Fiala, K., & Sipos, G. (2008). A terepi hordalékhozam-mérő eszközök és módszerek, I. (Hagyományos eszközök és a hazai gyakorlat). *Hidrológiai közlöny*, 88, 58-61.
- Knighton, D. (2014). Fluvial forms and processes: a new perspective. Routledge.
- Mętrak, M., Szwarczewski, P., Bińka, K., Rojan, E. 2019: Late Holocene development of Lake Rangkul (Eastern Pamir, Tajikistan) and its response to regional climatic changes Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology Volume 521, 99-113
- Murray, A.S., Wintle, A.G., 2003: The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiat. Meas.* 37, 377–381.
- Mueller, D., & Preusser, F., 2022: Investigating the applicability of a standardised growth curve approach on Middle Pleistocene sediments from northern Switzerland. *Quaternary Geochronology*, 67, 101238.
- Novothny Á., Újházy K. 2000: A termo- és optikai lumineszcens kormeghatározás elméleti alapjai és gyakorlati kérdései a negyedidőszaki kutatásokban. *Földrajzi Értesítő XLIX.* /3-4 pp. 165-187
- Novothny, Á., Horváth, E., Frechen, M. 2002: The Loess Profile at Albertirsa, Hungary - Improvements in Loess Stratigraphy by Luminescence Dating. – *Quaternary Science Review* 95-96, 155-163.
- Opała, M., Niedźwiedź, T., Rahmonov, O., Owczarek, p., Małarzewski, Ł. 2017: Towards improving the Central Asian dendrochronological network—New data from Tajikistan, Pamir-Alay Dendrochronologia Volume 41, 10-23
- Právetz, T., Sipos, G., & Ladányi, Z. (2017). Assessment of possible uncertainties arising during the hydromorphological monitoring of a Sand-Bedded Large River. *Journal of Environmental Geography*, 10(3-4), 27-33.
- Rittenour, T. M. (2008). Luminescence dating of fluvial deposits: applications to geomorphic, palaeoseismic and archaeological research. *Boreas*, 37(4), 613-635.

- Sipos Gy. 2010: A lumineszcens kormeghatározás régészeti és művészettörténeti alkalmazása I. Természet Világa 141/6, 279-282
- Sipos, Gy., Kiss, T., Nyári, D. 2009: Kormeghatározás optikai lumineszcenciával: homokmozgások vizsgálata a történelmi időkben Csengele területén. In Környezettörténet, Kázmér M. (szerk), Hantken Kiadó, Budapest, 410-420.
- Stokes, S., Bray, H., Blum, M., 2001: Optical resetting in large drainage basins: tests of zeroing assumptions using single-aliquot procedures. Quaternary Science Reviews 20, 879-885.
- Thamó-Bozsó, E., Murray, A. S., Nádor, A., Magyari, Á., Babinszki E. 2007: Investigation of river network evolution using luminescence dating and heavy mineral analysis of Late-Quaternary fluvial sands from the Great Hungarian Plain. Quaternary Geochronology, 2/1-4, 168-173.
- Tóth O., Sipos G., Kiss T., Bartyik T. 2017: Variation of OSL residual doses in terms of coarse and fine grain modern sediments along the Hungarian section of the Danube. Geochronometria 44(1)
- Ujházy, K., Gábris, Gy., Frechen, M. 2003: Ages of periods of sand movement in Hungary determined through luminescence measurements. – Quaternary International 111, 91-100.
- Vincze Ákos (2023): Folyóvízi teraszok térképezése a Középső-Pamír és a Nyugati-Tien-san területén – OTDK, Szeged
- Wintle A. G. 2008: Luminescence dating: where it has been and where it is going. Boreas 37. pp. 471-482
- Wohl, E. 2017: Connectivity in rivers. Progress in Physical Geography 41, 345-362.
- Wohl, E., Bledsoe, B.P., Jacobson, R.B., Poff, N.L., Rathburn, S.L., Walters, D.M., Wilcox, A.C., 2015: The Natural Sediment Regime in Rivers: Broadening the Foundation for Ecosystem Management. BioScience 65, 358-371.