

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Természetföldrajzi tanszék

**Morfometriai paraméterek meghatározása vulkáni
kúpokon a San Francisco vulkáni terület
(USA, Arizona) példáján**

(Diplomamunka)

Készítette: Bata Tamás
geográfus, V. évfolyam

Témavezetők: Karátson Dávid egyetemi docens (Természetföldrajzi Tanszék)
Székely Balázs tudományos munkatárs (Geofizika Tanszék)

Budapest

2007.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés, elzmények, célkitzések	2
2. Korábbi vulkánmorfológiai munkák	2
3. A SFVF föld- és felszínalaklata	5
3.1. A terület földtani felépítése	5
3.2. Paleomágnesség	9
3.3. A terület rövid jellemzése	11
3.4. Geomorfológia	17
4. Módszertan, alkalmazott módszerek, levezetett térképek áttekintése	25
4.1. A vonatkoztatási középpont meghatározása és az alaktani besorolás	27
4.2. A salakkúpok korának meghatározása	30
4.3. A kúpalapzat körülhatárolása, magassági adatok létrehozása	30
4.4. A terület, kerület, kerekítettség értéke	32
4.5. A salakkúpok átmérője, és a W_{co}/H_{co} paraméter	32
4.6. Az elméleti, az átlagos és a maximális lejtőszög meghatározása	33
4.7. A krátermélység, a kráterátmérő, a kráterterület, -kerület, -kerekítettség	33
5. A SFVF salakkúpjainak morfológiai elemzése	34
5.1. Korcsoportok elemzése	39
5.2. A kúpmagasság (H_{co}) összefüggései	46
5.3. Kúpátmérővel (W_{co}) való korrelációk	52
5.4. Kúpmagasság és kúpátmérő hányadosa (H_{co}/W_{co})	55
5.5. A lejtőszög korrelációi	57
5.6. A kráterrel rendelkező kúpok korrelációi	67
6. Konklúzió	72
7. Köszönetnyilvánítás	74
8. Irodalom	74
9. Melléklet	79

1. Bevezetés, elzmények, célkitzések

Dolgozatomban a vulkáni salakkúpok geometriai elemzésével vizsgálom a kúpok at ért morfológiai hatásokat, valamint a lepusztulás mértékét. Azt, a már többek által megállapított tényt kívánom alátámasztani, hogy a San Francisco vulkáni területen (Arizona, USA) a salakkúpok magassága, átmérje, e kett aránya, valamint a kúpok lejt szöge id vel csökken. Dolgozatom célja továbbá, a San Francisco vulkáni terület (SFVF) kúpjainak geomorfológiai bemutatása az ismert (pl. WOOD, 1980b) morfológiai paraméterek meghatározásával. A területre rendelkezésre álló geológiai - vulkanológiai térképek, valamint az Internetre ingyenesen letölthet SRTM adatbázis felhasználásával sikerült a terület kúpjairól eddig még nem készített morfológiai adatbázist létrehoznom. Ebben az adatbázisban a bazalt kúpok kor szerinti, alaktani, méretbeli hasonlóságaira, vagy éppen különbségeire hívom fel a figyelmet, melyekben megpróbálok vulkanológiai következtetéseket levonni, valamint adatokkal próbálok alátámasztani a lepusztulási fokuk kor és méretbeli összefüggéseit. Vizsgálataim során a következő paramétereket használtam: a kúplábak átlagos tengerszint feletti magassága, területe, kerülete, kerekítettsége, a kúpok magassága, zárt kráterek esetében azok területe, kerülete, kerekítettsége, mélysége, valamint meghatároztam a kúpok, illetve a kráterek átmérjének hosszát és irányát. Ezen adatok ismeretében a terület bazalt kúpjai morfológiailag már könnyen összevethetők más vulkáni terület hasonló formáival.

2. Korábbi vulkánmorfológiai munkák

A területre készült korábbi kutatások közül elsőként Colton (1967) munkáját érdemes kiemelni. Volt az első, aki különböző osztályokba sorolta a terület bazalt kúpjait és lávafolyásait a lepusztulás mértéke és a mállás alapján. Ez volt az első összehasonlító vizsgálat a salakkúpok lepusztulási fokát tekintve. Néhány szerző összehasonlító morfológiát alkalmazott a terület vizsgálatához, melyet relatív korokkal támasztottak alá. Scott és Trask (1971) a Lunar Crater vulkáni területen (USA, Nevada) a következő morfológiai paramétereket vizsgálták: maximális lejt szög, valamint a kúpok sugarának és magasságának aránya. Ezekkel a paraméterekkel relatív morfológiai korokat állapítottak meg 15 kúpra. Az egyik legátfogóbb vulkán morfológiával foglalkozó tanulmány Pike 1978-ban írt cikke, melyben 655 vulkán méretét vizsgálta. Később Martin del Pozzo (1982) határozott meg geomorfológiai paramétereket és relatív korokat több, mint 140 kúpra, különböző vulkáni területeken. Dohrenwend et al. (1986) részletes geomorfológiai

tanulmányában K-Ar vizsgálatokkal határozta meg 11 kúpnak a korát a Kalifornia államban levő Cima vulkáni területen, amely kitűnő példája a sivatagi éghajlaton pusztuló salakkúpoknak, hiszen a Mojave sivatagban található. Tanaka et al. 1986-ban írt cikkében salakkúpok paleomágnesességét vizsgálta, K-Ar kormeghatározással, kizet- és rétegtani vizsgálatokkal kiegészítve, amely során a vulkáni tevékenység vándorlását határozták meg a SFVF-en. Több mint 600 kúpon végeztek el vizsgálatokat, amely során 243 Brunhes (<0,73 m.y.), 220 Matuyama (0,73-2,48 m.y.) és 147 pre-Matuyama (2,48-5,0 m.y.) korú kúpot állapítottak meg. Vizsgálták továbbá a területen található salakkúpok elhelyezkedésében fellelhető esetleges mintázatot, a kiszórt vulkáni anyag mennyiségét. Eredményeikkel a SFVF összehasonlíthatóvá vált egyéb vulkáni területtel, ugyanakkor vizsgálatukkal az észak-amerikai lemez viszonylagos mozgására is következtetni lehet.

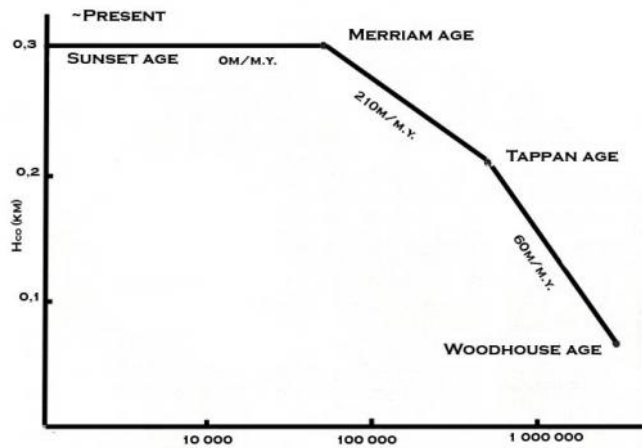
Azt a tényt, hogy a vulkáni kúpok lejtőszöge, valamint a kúpátmérő/kúpmagasság aránya idővel csökken, ezt Scott és Trask mondta ki először 1971-ben. Porter 1972-ben írt cikkében, a Hawaii szigetek Mauna Kea friss salakkúpjain végzett kutatásai alapján rámutatott a kúpátmérő (W_{co}), a kráterátmérő (W_{cr}), valamint a kúpmagasság (H_{co}) közötti összefüggésre, mely alapján: $H_{co} = 0,18W_{co}$ ($n = 30db$) és $W_{cr} = 0,40W_{co}$ ($n = 62db$). Néhány évvel később Wood is hasonló eredményre jutott.

Wood (1980b) kiterjedt geometriai méréseket végzett a SFVF kúpjain annak érdekében, hogy bebizonyítsa, következtetni lehet a salakkúpok hozzávetőleges korára pusztán egyszeri morfológiai vizsgálattal. Könnyen érthető modelleket készített továbbá, hogy a kúpok erózió általi vagy egyéb tömegmozgás miatti lepusztulásának folyamatát tanulmányozhassa. Nagyon fontosnak tartotta az adott terület éghajlati viszonyait, amely az eróziót teljes mértékben meghatározza. A kúpok morfológiáját tanulmányozó munkájában úgy vélte, hogy a kúpok alakja információval szolgálhat múltbeli klímaviszonyokról is. Wood (1980b) a salakkúpok lepusztulásának morfológiai elemzéséről írt alapcikkében több, a SFVF-hez hasonló vulkáni területet (Nevada, Oregon, Mandzsúria, Olaszország, Reunion) is vizsgálva azt állítja, hogy a kúpok magassága, a magasság és az átmérő aránya, valamint a kúpok lejtőszöge idővel csökken, viszont a kráterátmérő és a kúpátmérő aránya nem változik a lepusztulással. Jelen munkával ezt az állítást próbálom igazolni az SRTM domborzatmodell segítségével.

Wood szerint a kúpok lepusztulásának két fő esete van, az egyik, mely során a kúpok kialakulása után a lávafolyások körülölelték, körülölelték a kúpok lejtőjét, a másik pedig az erózió pusztító munkája. Az előbbi főként helyi hatásokat eredményez, a lepusztulásban

viszont sokkal inkább meghatározó a második folyamat. A SFVF-en több példát is lehet találni a láva által történő körülfollyásra, ezzel a környező terület magasodására, mely folyamattal együtt jár a H_{co}/W_{co} arány csökkenése is, hiszen a kúpmagasság eközben természetesen csökken. Ez a csökkenés az idősebb kúpok esetében figyelhető meg jobban, mint például a Sunset Crater kitörése következtében kialakuló Bonito lávafolyás által részben körülfollyott idősebb Lenox Crater és a V83 nevű kúp, valamint az ún. South Sheba Crater esetében is. Azonban ha a Moore és Wolfe által a területre készített geológiai térképet részletesen megvizsgáljuk, azt tapasztaljuk, hogy a SFVF kúpjaira nem kifejezetten jellemző ez a folyamat. A másik jellegzetes kúplepusztító folyamat a vízi erózió, amely viszont az előző folyamattal ellentétben éppen növeli a kúpátmérőt, az által, hogy a kevésbé stabil salakanyagot a víz folyamatosan a kúp tetejéről leszállítja a kúp lábához. A folyamat révén az átmérő növekedése mellett a lejtőszög és a kúpmagasság csökkenése figyelhető meg. Wood 1980-ban írt cikkében megállapítja továbbá, hogy a vízi erózió során a kúpmagasság gyorsabban csökken, mint ahogy az átmérő növekszik, viszont $0,05 H_{co}/W_{co}$ felett ez megfordul, és egységnyi idő alatt az átmérő gyorsabban nő, mint amennyire a magasság csökken.

A két folyamat ellentétes hatást fejt ki a kúpátmérről: a vízi erózió hatására, az anyagátrendeződések eredményeképp az átmérő jelentősen nő, míg a lávakörülfollyás következményeként a környező területek megemelkedése mellett a salakkúp átmérete csökken. Wood a terület salakkúpjainak átméretét megvizsgálva azt tapasztalta, hogy az idősebb kúpoknak kb. 5 százalékkal nagyobb az átlagos kúpátméretük, mint a fiatalabb kúpoknak, tehát a SFVF területén jelentősebb lepusztító folyamat a vízi erózió. Ugyanakkor az erózió rátája az idővel csökken, ahogy ezt Wood a Sunset Crater lepusztulásának modelljén is ábrázolta (1. ábra). Ez a modell a salakkúp korának függvényében ábrázolja a kúpmagasságot, amely szerint a Sunset Crater közel 50 ezer évig változatlan méretű marad, az erózió nem pusztítja jelentős mértékben, ezt követően azonban kb. 500 ezer év múlva a kúp magassága 305 méterről 210 méterre csökken, $210 \text{ m}/10^6 \text{ év}$ sebességgel. Az ezt követően 2,5 millió év alatt a kúpmagasság csökkenése lassulni fog $60 \text{ m}/10^6 \text{ év}$ sebességre, amikor is a Sunset Crater már csupán egy Woodhouse korúhoz (0,8 - 3,0 m.y.) hasonló maradvány lesz.



1. ábra: A Sunset Crater elméleti lepusztulás története.

Az ábra a SFVF kúpjainak korábbi lepusztulás tendenciája alapján készült. (forrás: Wood, 1980b)

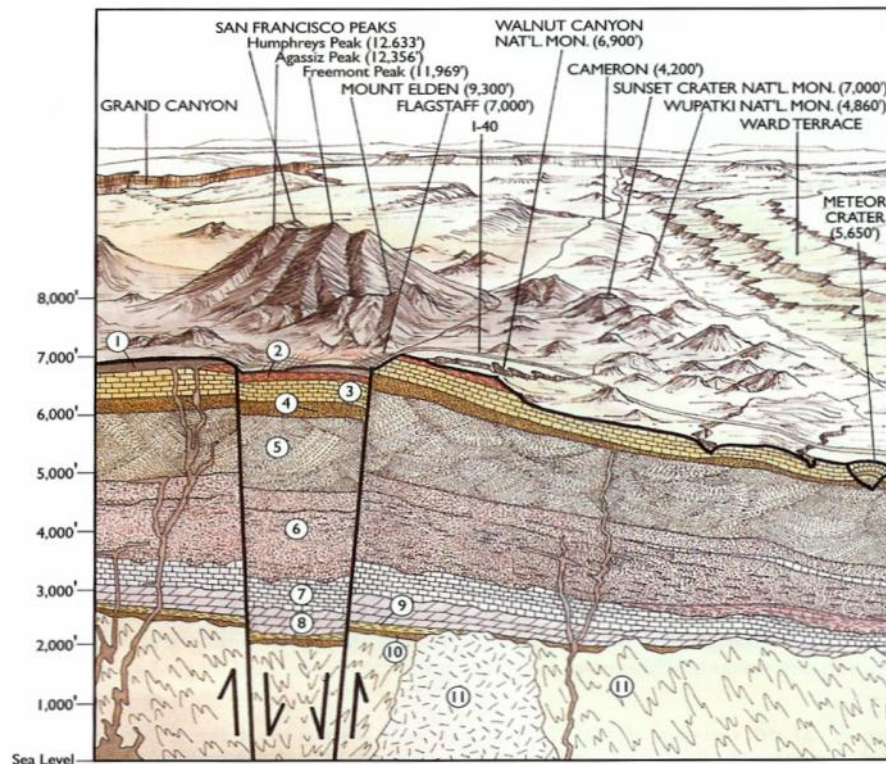
Hooper és Sheridan (1998) összehasonlító morfológiai vizsgálatokat végeztek a félsivatagi klímájú SFVF és a t le dél-keltre található Springerville vulkáni területek salakkúpjain, valamint modellezték a felszínen lejátszódó eróziós folyamatokat egy ideális salakkúpon. Elemzésük alapját a kúpok magassága; a magasság és az átmérő, a krátermélység és a kráterátmérő aránya és a lejtő szög kiszámítása alkotta. Úgy vélik, hogy az idővel folyamatosan csökken morfológiai paraméterek alkotják az alapját az összehasonlító morfológiával történő relatív kormeghatározásnak.

3. A SFVF föld- és felszínalaktana

3.1. A terület földtani felépítése

A terület geológiai története a *prekambriumban* kezdődött, amikor az óceán fenekére és az akkor meglévő szigetekre különböző vulkáni és egyéb üledékes kőzetek rakódtak le (2. ábra). Ezek a kőzetek később nagy mélységbe süllyedtek, ahol a megváltozott nyomás- és hőmérsékleti viszonyok hatására metamorfizálódtak. A legidősebb kőzeteket tehát a Plató ezen része alatt elhelyezkedő, az Észak-amerikai lemez alját képező 1,7 - 1,8 milliárd éves, prekambriumi gránit és kristályos palák alkotják, melyekre vízszintes rétegekben óidei homokkövek, mészkövek és palák települtek. Ezek ma a Grand Canyon legmélyén a felszínen vannak (REYNOLDS, 1982). A területet 1,1

milliárd éve sekélytenger borította, mely során bazalt láva kitörések és benyomulásokból származó üledékekkel együtt az ún. Grand Canyon Supergroup formáció jött létre.



2. ábra: Geológiai keresztmetszvény a SFVF környéki területre 1.

1. Harmad- és negyedid szaki vulkáni üledékek; 2. Moenkopi formáció; 3. Kaibab formáció; 4. Toroweap formáció; 5. Coconino homokk ; 6. Supai csoport; 7. Redwall mészk ; 8. Muav mészk ; 9. Bright Angel pala; 10. Tapeats homokk ; 11. Prekambriumi gránit és kristályos pala.(forrás: BEZY, 2003)

A térség ezek után az óidei vet dések és deformációk során a nyugati bels - medence része lett az észak-amerikai kontinens nyugati szélének közelében. A sekélytengeri üledékképzés hatására nagy vastagságú agyagpala, homokk, iszap és mészk üledékek rakódtak le. A kambriumot képviseli az 500 -520 millió éves **Tonto csoport**, amely három, jól elkülöníthető rétegből áll. Legfelül a **Muav mészk**, középen a **Bright Angel pala**, majd a **Tapeats homokk** legalul. A Muav egy foltos, rögös, palás, sárgás-szürke mészk néhol vöröses foltokkal, fossziliákkal, valamint több helyen gerinctelenek lábnyomával. A három közül ez a réteg ülepedett le a legmesszebb a tengerparttól. A Bright Angel pala a legzölde szín agyagpalából – amely igen gazdag fossziliákban –, valamint finomszemcsés, sötétebb homokk ből áll. A Tapeats igen masszív barna színű, 515 millió éve tenger közelében lerakódott durvaszemcsés homokk

réteg (<http://www.canyondave.com/Layers.html>). A 340 millió éves, *mississippi* korú, alapvetően szürke színű **Redwall mészkő**, a felette levő, a vas oxidtól vörös színű Supai rétegben a kimosódó oxidok miatt sok helyen vörösen foltos. A Redwall mészkőben igen gyakran található tengeri csillag, korall, mohaállat vagy foraminifera lenyomatát. Ez a vastag pados mészkő a tengerparttól távol, kb. 100 méterrel a tenger alatt ülepedett le. A *pennsylvaniani*, 275 - 320 millió éves **Supai csoport** négy különböző formációt foglal magában, melyek felépítésközött a rozsdavörös homokkőből az iszaprétegek és agyagpalákon át, a tiszta mészkőig igen sokféle anyagú rétegeket találunk. A Supai csoport nagyon változatos körülmények között ülepedett le, de a legjellemzőbb a tengerpart menti sivatagi környezet kialakulása volt, hasonlóan a mai Mexikói-öböl képeéhez. A 280 millió éves **Coconino homokkő** sivatagi, szél fújta homoktengeri körülmények között jött létre a Pangea korában. A homokkő réteg, valamint az iszap homokkőnek dél felé kibillentek, melyből az akkori északi uralkodó szélirányra lehet következtetni. A homokkő rétegekben sok helyen látni akkor élt különböző gerinctelen élőlények és hüllők lábnyomát (<http://www.canyondave.com/Layers.html>). A **Toroweap formáció** szintén permid északi, a Kaibab és a Coconino formációk között található. Igen sok fajta kőzet építi fel: homokkő, gipsz, mészkő, dolomit. Tengerpart közeli környezetben, a sekély beltenger többszöri visszahúzódnási vonala mentén ülepedett le, a mai Kaliforniai-öböl kialakulási körülményeihez hasonlóan; a Toroweap formáció ezért fossziliákban szintén igen gazdag. A világos szürke, sárgásbarna színű **Kaibab formáció**, amely a permid szakban, körülbelül 270 millió éve keletkezett, mészkőből, homokkőből és a rá jellemző tiszta mészkőből épül fel, melyek sekélytengeri körülmények között rakódhattak le. A Kaibab mészkőben és a dolomitban sok helyen előfordulnak tengeri élőlények, csigák, kagylók vázának maradványai, melyek jól konzerválódtak az idő folyamán.

A középidő elején széles tengerparti sáv volt a terület, mely során a triász korú **Moenkopi formáció** rakódott le. Az ennél fiatalabb üledékretegek nagyrészt lepusztultak, elszállítottak. A paleozoos és mezozoos üledékreteg vastagsága meghaladta a 3000 métert is, azonban mára nagyrészüket az erózió átformálta, lepusztította. Ebben a rétegzett homokkő és pala üledékben konzerválódott homokfodrokat és megkövesedett lábnyomokat találhatunk. A mélyvörös színű réteg tengerpartközeli, árapály miatt létrejött lapos területen alakulhatott ki a Kaibab formációra települve, a tenger lassú nyugat felé történő visszahúzódnása után. A triász legvégén, a Pangea feldarabolódásával és a kontinensdarabok jelenlegi helyükre kerülésével a térségben az éghajlat is megváltozott,

nedvesebbé vált. A homokbuckákat vízmosások mosták el, mocsaras fövennyé, lapálya változott a terület, melyet dinoszauruszok és más hüllők népesítettek be (<http://www.canyondave.com/Layers.html>). A krétában, körülbelül 97 millió évvel ezelőtt, Észak-Amerika nyugati szegélyénél történt újabb lemezmozgások hatására a fent említett nyugati belső-medence ismét víz alá került, mellyel a korábbi szárazföldi üledékek egy részét a tenger elmosta, elszállította nyugat, dél-nyugati irányba. A medence két oldalról is víz alá került, egyrészt az Északi-sark felől, másrészt amint Dél-Amerika és Afrika elszakadt Észak-Amerikától a Mexikói-öböl felől. A következő 13 millió év során a tengerpart vonalának változásait a magasabb térszínnek kiemelkedéséből adódó eróziós teljes lepusztulás vagy egyéb a kontinens nyugati szegélyéhez kapcsolható tektonikus mozgások okozták.

A kréta végétől a harmadid szak közepéig, a larámi orogenezis során az észak-amerikai lemez nyugati részét nagyfokú horizontális kompresszió és érte ezzel együtt a Colorado Plató szegélye mentén történő nyomóerők hatására a terület, mint egy viszonylag összefüggő egység, enyhén kiemelkedett, meggyűrődött. Ez a nyomás régi törésvonalakat újított fel, valamint újakat hozott létre. A vertikális mozgás a törésvonalak mentén több száz méterrel megemelte a prekambriumi, valamint a fiatal üledékes rétegeket, kialakítva ezzel a Colorado Platót (WOOD & BALDRIDGE, 1990). A kiemelkedés pontos idejét és okait azonban még vizsgálják a geológusok. A tenger Arizona területéről végleg visszahúzódott, ugyanakkor a Sziklás-hegység keleti része is ebben az időben emelkedett ki. A Wupatki Természetvédelmi Terület közelében levő, viszonylag nagy kiterjedésű, észak-déli irányú helyi antiklinális, a Black Point monoklin, valamint a Doney vetés is az ekkor a területet formáló eróziós vetések és gyűrődések hatására alakult ki. A helyi kiemelkedésekkel együtt intenzív erózió kezdődött, mely hatására látványos szurdokvölgyek, mint a Colorado és mellékfolyói, valamint a szél által kipreparált sziklaalakzatok jöttek létre a Plató korábbi tengeri – tengerparti üledékéből. A vízfolyások, a viszonylag puha üledékben gyakran az alapkőzetig bevágták magukat. Az orogenezis közel 35 - 40 millió éve fejeződött be, míg az erózió napjainkban is tovább tart, ezért a középidői, harmadid szak üledékek sok helyen már a lepusztultak és csak az idősebb kőzetrétegek vannak a felszínen. Heves vulkáni működés követte ezt az időszakot, elsősorban a harmadid szak végén, a San Juan - rétegvulkán, majd a pleisztocén elején kéreg alatti forró folt vulkanizmus hatására a San Francisco vulkán robbanásos kitöréséből származó piroklaszt üledékek borították be a környező területeket. A Colorado Plató délkeleti

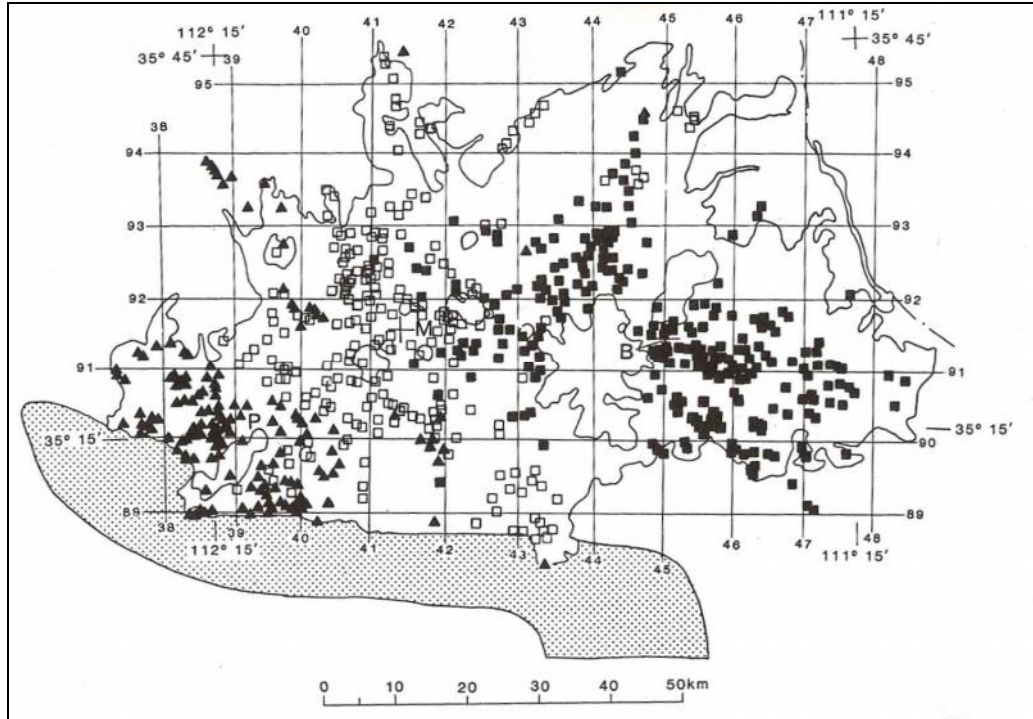
szegélyénél levő Rio Grande vetőtektonikus nyomóerő hatására ebben az időben formálódott (<http://www.canyondave.com/Layers.html>). A hegységek kiemelkedése mellett, a mállási és eróziós folyamatok erősödésével egy viszonylag sík tönkfelszín alakult ki, amely enyhén délkeleti irányba lejt és ebből az egyenletes felszínből „emelkednek” ki a vulkáni kúpok. Hozzávetőlegesen 6 millió évvel ezelőtt az újabb tektonikus mozgásoknak és törésvonalaknak köszönhetően magma-feláramlás indult meg a terület nyugati részén, a törések mentén, amely lávafolyásokként fedte be a felszínt, majd lassan átvetődött az észak-keleti, keleti részekre. A kitörés 3 millió éves periódusa folyamán évben tovább fokozódott és a paleozoós, mezozoós rétegeket beborította lávával, néhol azonban a rétegek között rekedt a magma.

A *negyedik* szak pleisztocén korszakában a klíma jelentősen megváltozott, sokkal hidegebbé és nedvesebbé vált, és a gleccserekből származó vízfolyások megnövekedett vízhozamának téli és nyári közti különbsége gyakran okozott áradásokat a területet övező kanyonokban. A vulkáni területen nagy magasságú San Francisco - rétegvulkán, az elmúlt 1,8 millió évben eljegesedett, gleccserek formálták a csúcsrégió környékét. A vízi erózió és más eróziós folyamatok, mint a fagyaprózódás, extrém módon átalakította a felszínt. Glaciális folyamatok, növekvő lefolyás, emelkedő platósínt és erőteljesebb bevágódás alakította ki a terület mai képét. A legfiatalabb kitörés, a Sunset Crater 1064-es kitörése, újabb salakkúpok, lávaárak és dómok kialakulásához vezetett a terület keleti felében. A kiömlő vulkáni anyagok a vízhálózatot is jelentősen átformálták; sok folyót, mint a Little Colorado, elmozdítottak a medrétől, azonban több új vízfolyás is kialakult, melyek a magasabb vulkáni területről sugaras irányban folynak le. A vulkáni tevékenység a területen, geológiai léptékben nézve gyakorlatilag csak pillanatnyi esemény volt, mégis napjainkban az ehhez köthető formák uralják a tájat.

3.2. Paleomágnesesség

A salak mágnesessége a titántartalmú magnetit mennyiségétől függ. Az elmúlt 5 millió év során történt időbeli pólusváltásra Mankinen és Dalrymple (1979) hívták fel a figyelmet. A kor beosztásuk pontosságát K-Ar korok statisztikai elemzésével, mágneses polaritások meghatározásával igyekeztek biztosítani. Az eredetileg Cox el al. (1964) által meghatározott Brunhes, Matuyama, Gauss és Gilbert (ez utolsó kettő együtt: pre-Matuyama) korszakok, a legfontosabb paleomágneses korszakok a SFVF területén. Tanaka el al. 1986-ban írt cikkében Luedke és Smith (1978) által összeállított K-Ar korokat felhasználva osztotta be a kúpokat a fent említett korszakokba. A radiometrikus

kormeghatározással összefüggésben a Brunhes korszak feleltethet meg a Moore et al. (1976) által használt Tappan, Merriam és Sunset koroknak. A Woodhouse korú lávafolyások és kúpok pedig a Matuyama és a Brunhes eleje korszakoknak.



3. ábra: Kés kainozoikumi paleomágneses korszakok a SFVF területén. A fekete négyzetek, Brunhes korszak; a fehér négyzetek Matuyama; a háromszögek pre-Matuyama (Gauss és Gilbert) korszakokat jelölnek. A keresztjek jelölik az egyes korszakok kiszámított középpontjait. (forrás: Tanaka et al., 1986)

A Gauss és Gilbert korszakok (kb. 5,0 - 2,48 m.y.) k zetei, salakkúpjai többnyire a SFVF nyugati végén helyezkednek el. Tanaka et al. (1986) vizsgálatai alapján 140 salakkúp tartozik e korszakba, közülük 61 normál (jelenlegi) és 79 fordított polaritású, a SFVF dél-nyugati sarkában, a szintén ekkor kialakult Bill Williams Mountain közelében helyezkednek el, összesen több, mint 300 km²-nyi területen. A 2,48 és 0,73 m.y. -t átfogó periódus, a Matuyama korszak, melynek kúpjai túlnyomórészt fordított polaritásúak. A normál polaritású Jaramillo, Olduvai és Réunion események csupán 0,32 m.y. -t jelentenek az egész korszakból. A Matuyama korú kúpok elsősorban a terület nyugati felében találhatóak, 220 vizsgált kúp közül 173 fordított és 27 normál polaritást mutatott (TANAKA et al., 1986). A 220 kúp közül jó néhány egy-egy csoportot alkotva vagy észak-kelet, észak, esetleg észak-nyugat irányú törések mentén alakult ki. E korszak alatt alakult ki a Sitgreaves Mountain nagy része, a Kendrick Peak, a Slate Mountain, valamint a

Howard Mesa. A Brunhes korszak 0,73 m.y. -től napjainkig terjedő idő szakában kialakult 243 db Tanaka et al. (1986) által vizsgált kúp a terület keleti felén található, mind normál polaritású (3. ábra). Ehhez a korszakhoz tartozik a San Francisco rétegvulkán, a White Horse Hills és a O'Leary Peak kialakulása is.

A nagy SiO₂ tartalmú kőzetekből felépülő egységek körül a SFVF területén nagyon hasonló korú salakkúpok találhatóak. Erre egy jó példa a Bill Williams Mountain, amely uralkodóan egy pre-Matuyama korszakban keletkezett dácit lávadóm és lávafolyás összessége és amelyet egy széles, észak-nyugat irányú, pre-Matuyama korú salakkúpokból álló öv vesz körül. A riolitból álló Sitgreaves Mountain szintén pre-Matuyama, korai Matuyama korszakban jött létre, a Mesa Butte törés és a pre-Matuyama - Matuyama korú salakkúpokból kialakult – a Howard Mesa és a Volunteer Canyon között létrejött – észak-nyugat irányú zóna metszéspontjában. Az átmeneti, és savanyú kőzetekből felépülő Kendrick Peak (amely nagy részt Matuyama korú), olyan terület közepén található, ahol a salakkúpok legtöbbször Matuyama korú. Ezzel szemben a San Francisco rétegvulkán és az O'Leary Peak környező salakkúpjai mind Brunhes korúak.

A SFVF területén a vulkáni aktivitás az idő folyamán észak-kelet, kelet felé mozdult. A Matuyama korszakot megelőző időben északkelet irányú, 1,2 cm/év rátájú migrációt mutatott a vulkáni tevékenység, amely 2,5 m.y. óta 2,9 +/- 0,3 cm/évre és keleti irányba váltott át. Ezzel együtt a magma produkció mértéke (75-ről 1400 * 10⁻⁶ km³/év) és a bazalt kitörések gyakorisága (1/17000-ről 1/3000 évre) is növekedett. Az utolsó 0,25 m.y. alatt a magma produkció mértéke (kb. 180 * 10⁻⁶ km³/év) és a kitörési gyakoriság is csökkent. Ez a kelet felé mozdulni látszó vulkánosság az Észak-Amerikai lemez nyugat felé történő mozgásával hozható összefüggésbe (TANAKA et al., 1986).

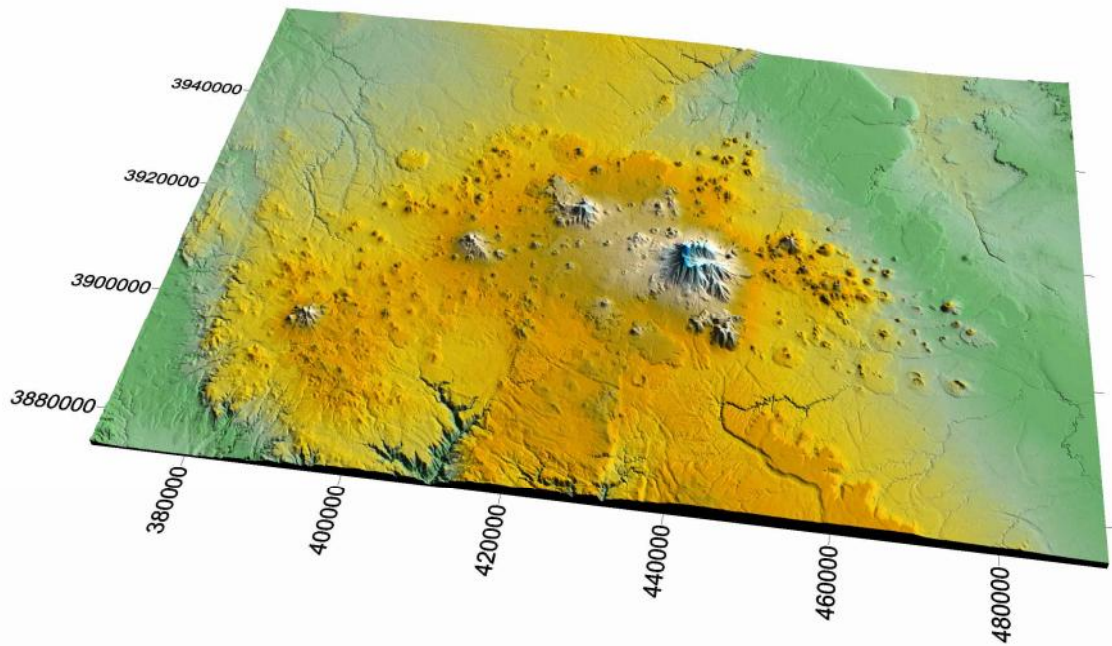
3.3. A terület rövid jellemzése

A San Francisco rétegvulkán, közel 600 salakkúp és lávadóm, számos lávafolyás, valamint kiterjedt salak és hamu üledék alkotja USA, Arizona állam Flagstaff körzetben, a hozzávetőlegesen 4500 km² területű San Francisco vulkáni területet, melyet északon a Colorado Plató, délen a Plató és a Basin and Range szerkezet közé ékelődött úgynevezett Átmeneti Zóna határol (PRIEST, 2001).

A harmadidőszak második felétől kialakult több hasonló vulkáni területet találunk Arizona államban, de a legnagyobb produktívumot adó kitörések a Plató déli szegélyéhez és az Átmeneti Zónához köthetők. A főbb vulkáni területek, melyek nagy részét bazalt építi fel, dél-kelet észak-nyugati vonal mentén szelik ketté Arizonát, ilyen például a

Mormon vagy a Springerville, valamint a SFVF is. Ezek a vulkáni területek hasonló módon is alakultak ki, mégpedig akkor, amikor az észak-amerikai kontinens ezen része a késő miocéntól kezdve elvékonyodott és a tektonikus mentén kiemelkedett (WOOD & BALDRIDGE, 1990).

Általában a nagyobb SiO_2 tartalom a lávában nagyobb viszkozitást eredményez. A bazalt láva SiO_2 -ban szegény (45-52 % SiO_2) és viszonylag hígan folyó, épp ezért az ilyen lávafolyások igen nagy távolságra is juthatnak a kürtől, viszont vékony rétegben. A bennük levő vas és magnézium pedig a rájuk jellemző sötét színért felelős. A bazalt igen finom szemcséjű, nehéz kristályos, általában csak az olivinkristályok vehetnek ki benne. Nagyobb részben földpátok, kis részben azonban olivin, piroxén illetve egyéb oxidok alkotják. A SFVF-en az uralkodó kristályos az alkáli bazalt. Az andezit általában – mészkalkáli jelleggel – a konvergens lemezszegélyek közül a kontinensperemekhez, mikrokontinens-ívekhez kapcsolódnak (OLLIER, 1988). Az andezit közepes SiO_2 tartalommal és viszkozitással bír, salakkúpokat, lávadómokat és vastagabb lávafolyásokat hoz létre. A San Francisco - vulkánon az andezit a meghatározó kristályos. Azonban nem csak lávaként, hanem jelentős részben piroklasztiként törhet a felszínre. Az andezit a bazaltnál könnyebb, üdén szürkésfekete színű kristályos. Általában apró, de látható ásványokat tartalmaz. Fő ásványos elegyrészei a földpátok, az amfibol és a piroxén. Az 52-57 % SiO_2 - tartalom között bazaltandezitről beszélhetünk. A dácitot az andezittől kémiaiilag általában 63 % SiO_2 tartalom fölött különböztetik el. Kevésbé lávaként, inkább piroklasztiként kerülhet a felszínre. Színük általában szürkésbarna, átmeneti. Jellemző ásványuk a földpát, a biotit, a kvarc és az amfibol. A dácit és riolit lávák a gazdag SiO_2 tartalmuk és a nagy viszkozitásuk miatt a kürtől kb 10 km szinte csak kipréselődnek vagy lávadómokat, valamint rövid, de annál vastagabb lávafolyásokat alkotnak. A riolitnak ezen felül tömegesen szórt piroklasztit és ignimbrit a jellemző kristályos típusa. Földpátok, kvarc, biotit és esetleg amfibol alkotja.



4. ábra: A San Francisco vulkáni terület domborzatmodellje.

A SFVF poligenetikus vulkáni terület, mely Arizona állam legnagyobb tzhányója mellett (f csúcsa a Humphrey's Peak 3853 m) összesen mintegy 600 egyedi kitörésközpontot foglal magában

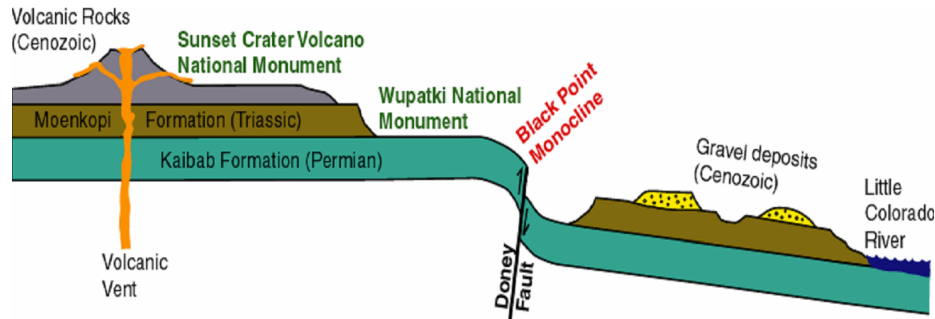
A vulkáni terület, a maga 6 millió éves történelme során több, mint 600 vulkáni kúpot és a hozzájuk kapcsolható lávafolyásokat és piroklasztit üledékeket hozott létre (COLTON, 1967; MOORE et al., 1976). Ezek közül az egyedüli rétegvulkán a 3850 m magas San Francisco tzhányó, amely hozzávetőlegesen 0,4 - 1 millió éves korú. A csúcskráter valószínűleg a Mount St. Helens 1980-as kitöréséhez nagyon hasonló módon, lejt összeomlással keletkezett.

A legtöbb vulkán általában a lemezszegélyek alábukási zónája közelében alakul ki, mint például az Egyesült Államokban, Oregon és Washington államban levő Cascade-hegység vulkánjai. Azonban Arizona állam mélyen az észak-amerikai szárazföldi lemez közepén található, nagyon hasonlóan a Yellowstone Nemzeti Park vulkáni területéhez, itt is feltehetőleg szárazföld alatti forró folt okozza a vulkanizmust, amely felett elhelyezkedő lemezdarab fokozatosan nyugatról kelet felé mozog. Hasonló folyamat játszódik le Idaho államban is a Moon Természetvédelmi Terület kúpjainál. A területen a néhány ezer éves Salakkúptól (Sunset Crater) egészen az 5 - 6 millió évnél is idősebb kúpokig (Williams Mountain) találunk anyagukban, lapultságukban, alakjukban merben eltérő formákat (4. ábra).

A vulkáni terület zömét alkálibazalt-lávafolyások, kisebb méretű bazalt salakkúpok alkotják. A bazalt köztudottan a legkisebb viszkozitású magma, így a kúpok magassága alig éri el a 300 métert. A vulkáni területen felszínen van néhány nagy viszkozitású, intermedier, illetve magas SiO₂ tartalmú dácitból, riolitból álló igen meredek oldalú lávadóm is (WOLFE et al., 1987).

A fő szerkezeti elemek a SFVF területén vetkhöz, törésekhez és monoklinokhoz igazodnak. Mivel a normál törések és a terület vulkanizmusa hozzávetőlegesen egykorú, így a legtöbb vet csak az idősebb (<0.73 Ma) lávaárat mozgította ki a helyükből (WOLFE et al. 1983, TANAKA et al. 1986). Ilyen törésvonal a Flagstaff-től északkeletre, majd délnyugatra a felszínen is megjelenő Mesa Butte törés, valamint az észak-déli irányú Oak Creek Canyon vet. Ahol ez a két vet nagyjából metszi egymást, ott formálódott a San Francisco rétegvulkán (HOLM, 1986b, SHOE MAKER et al., 1978). A Mesa Butte törés dél-nyugati vége a Chino-völgyben, míg a másik vége az ettől 150 km-re északkeletre levő Shadow-hegységben található. Ezt a prekambriumi rétegekben is meglévő vetrendszert a közepe táján fedik a SFVF negyedidőszaki lávafolyásai. A vulkáni terület nyugati részén levő, jelentős tömegű intermedier-savanyú vulkáni kúpok, mint a délnyugati Bill Williams Mountain (4.2-2.8 Ma), a Sitgraves Mountain (2.8-1.9 Ma), Kendrick Peak (2.7-1.4 Ma) valamint jó néhány bazaltkúp, mint a Mesa Butte, a Slate Mt., vagy a Red Mt. is vetkormányán sorakoznak. Néhány savanyú kúp viszont észak-nyugati irányú vetkormányán fekszik, ezek a paleozoikumi rétegekben levő törésekhez igazodhatnak. A töréseket vizsgálók közül a legtöbben a nyomóerő hatással kialakult formákat (pl.: monoklinálisok) hozzávetőlegesen 80-40 millió évesre becsülik (DAVIS, 1978), míg a húzóerő hatással kialakult normál vetkormány vagy tektonikus árkok a miocéntől alakulhattak ki. A vetkormány és törések kialakulásában általában két szakaszt lehet elkülöníteni. A fő kialakulási szakasz azelőtt történt, mielőtt a lávafolyások betérítették volna a felszínt, a második periódusban pedig vagy a meglévő vetkormány újultak meg, vagy ún. kiegészítő törések jöttek létre, átvágva és elmozdítva a lávafolyásokat (HOLM, 1986b). Néhány szerző szerint a vetdések legaktívabb időszaka a késő miocén és a korai pliocénre tehető és az elmúlt néhány száz ezer évben az ezeket kialakító nyomás jelentősen csökkent (TANAKA et al. 1986). A normál vetkormány és egyéb tektonikus árkoknak három meghatározó csapásirányát lehet meghatározni: északnyugat-délkelet, észak-dél, északkelet-délnyugat, ezt az irányt mutatja a terület egyik legszembetűnőbb törése is, ez a Doney vet (5. ábra). Itt kb. 150 - 50 ezer évvel ezelőtt a vetkormányán feláramló láva több salakkúpot is épített, ezt Doney-hegységnek nevezik. Általában megfigyelhető a vetkormány

hirtelen váltása egy-egy irányból a másikba, melyre jó példa a San Francisco-rétegvulkán észak - nyugati lábánál levő Sinagua Valley.



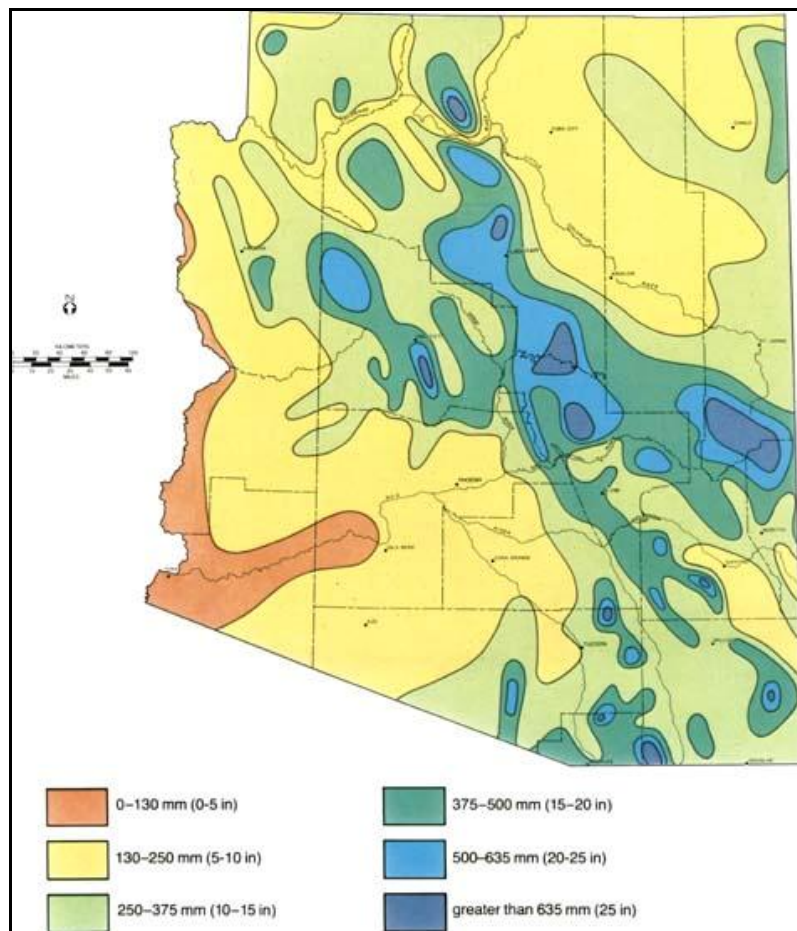
5. ábra: Keresztszelvény a Sunset Crater Természetvédelmi Területről.

Az ábrán jól kivehető a Black Point monoklin és Doney vetés, valamint a Little Colorado folyó felé leüledekes rétegek (forrás: Sunset Crater National Monument Geologic Resources Evaluation Report)

Wood (1980b) véleménye szerint a csapadék és a hőmérséklet a két legfontosabb faktor a salakkúpok lepusztulásában, ezért én is részletesen foglalkozom e két tényezével. Az éghajlat két szélet mutat. Az alacsonyabb területeken hosszú, forró nyár valamint enyhe tél, vagyis félsivatagi, nagyobb magasságokban azonban rövid hideg nyár és hosszú, hideg tél, vagyis hegyvidéki jellegű az éghajlat (SELLERS és HILL, 1974).

A csapadék mennyisége nagy eltéréseket mutat a magasság növekedésével és az évszakok váltakozásával. Az évi csapadékmennyiség Flagstaff-ben (2135 m tszf.) 500 mm körül alakul, azonban kiterjesztve a meteorológiai mérőállomások adatait, a vulkáni terület egészére, 381 mm és 635 mm éves csapadékmennyiséget kapunk (6. ábra) (DOOLITTLE, 1998). A csapadék jelentős része két időszakhoz köthető, nyári eleji és téli közepi csapadékmaximumról beszélhetünk. Június elejétől szeptember elejéig szinte napi rendszerességgel heves délutáni zivatarok tapasztalhatók a magasabb térszíneken. Ezek a konvektív áramlások meglehetősen rövid életűek és a nedves, trópusi légtömegek hatására alakulnak ki, melyek a Mexikói-öböl vagy ritkábban a Kaliforniai-öböl felől nyomulnak be Arizona állam területére. A csapadékmennyiséghez jelentősen hozzájárulnak a téli viharok is, amelyek nyugatról törnek be a területre, miután nedvességet vettek fel a Csendes-óceánból. Ezek nagyrészt hócsapadékot szállítanak, jellemzően november és március között. A San Francisco-rétegvulkánon ezek a hóviharok gyakran 2,5 méter vastag hóréteggel borítják be a felszínt. Flagstaff körzetében a csapadékos napok száma 70 körül alakul évente. Tavasszal és ősszel ritkán fordulnak elő zivatarok és a tavasz legvége

különösen száraz (<http://www.wrcc.dri.edu/narratives/ARIZONA.htm>). Néha a Kanada felől érkező hideg légtömegek is behatolnak a területre, mögöttük jóval nulla fok alatti hőmérsékletet eredményezve a platókon, magasabb térszíneken. Az év leghidegebb hónapja a január, ekkor a havi középhőmérséklet $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a San Francisco-vulkán tetején. A nappalok és éjszakák hőmérséklete között nagyok az eltérések. A száraz évszakban a napi maximum és minimum között akár $10\text{-}15\text{ }^{\circ}\text{C}$ is lehet a különbség. Ez a nagy hőingás igen jelentős hatással van az amúgy sem tömör salakkúpok lepusztulására, megkönnyíti a szél általi deflációt és a vízi eróziót egyaránt. A területen növényzeti szempontból az alacsonyabb magasságban a borókafenyő, a magasabb régiókban – ami a San Francisco-vulkánt foglalja szinte kizárólag magában, – az erdeifenyő, a ponderosa fenyő és a földalatti legidősebb fái között számon tartott bristlecone fenyő uralja a tájat.



6. ábra: Arizona állam évi átlagos csapadékmennyisége
(forrás: <http://southwest.library.arizona.edu/azso/index.html>)

3.4. Geomorfológia

3.4.1. Elden - hegy

A Flagstafftól északra elterülő, 700 méter magas Elden - hegy egy meredek oldalú dácit kúp, amely 500 - 600 ezer évvel ezelőtt formálódott nagy SiO_2 tartalmú magmából. Az igen viszkózus magma az idős üledékes és egyéb vulkáni rétegeket áttörve,



kipréselődött a felszínre, azonban viszkozitásából eredően nem tudott nagy távolságokra folyni, ezért a gyorsan lehűlő láva felszíne hamar megszilárdult. Ezt az alulról felnyomuló további magma összetörte. Ahol a kúp felszíne felnyílt, ott egy-egy lávafolyás nyomát láthatjuk (BEZY, 2003). Amint a 7. ábra is szemlélteti, az Elden magaslat déli oldalának jellegzetes képét is ezek az egymásra folyt lávanyelvek adják.

7. ábra: Légifelvétel a Mount Elden-ről.

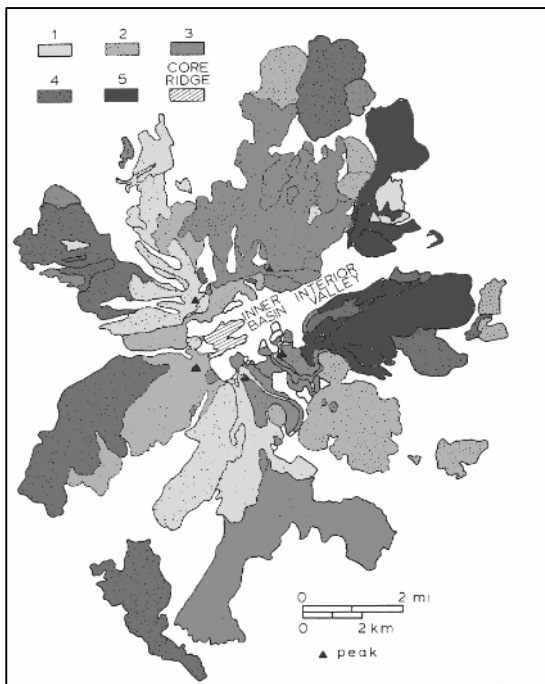
A 730 m magas dácit lávadóm oldalában jól kivehető a viszkózus lávafolyások hagymahéj-szerű egymásra épülése (forrás: BEZY, 2003)

Emellett a magasból leomló vulkáni görgetegek vagy a meredek oldalú lávafolyások összeomlásából származó gáz és dácit blokkok tovább növelték a kúp peremét (PRIEST et al., 2001). Az Elden - hegyhez nagyban hasonlító, több dácit és riolit kúp is található a vulkáni területen, mint például az O'Leary - csúcs, Északi - Cukorsüveg - hegy, vagy a Cukorsüveg - hegy.

3.4.2. San Francisco rétegvulkán

A San Francisco tüzőzhányó egyike Délnyugat nagy vulkáni hegyeinek. A rétegvulkán a vulkáni terület középpontjában foglal helyet, csúcsa a 3854 méter magas Humphreys - csúcs egyben Arizona legmagasabb pontja. A tüzőzhányó felépítésében folyamatos rétegsor figyelhető meg, a kis Si-tartalmú andezitektől az alkáliriolitokig. A dácit lávadómok a központi és a peremi részeken, valamint a kúplábon egyaránt felszínre törtek, míg az

andezitből álló lávafolyások csak a központi, kúpépít kráterekből származtak (HOLM, 2004). A vulkán kialakulása körülbelül 1,8 millió éve kiömlési szakasszal kezdődött, melynek nyomait ma dacitként az Északi - Cukorsüveg - hegyen ($2,78 \pm 0,13$ Ma), valamint riolitként a kalderában (Inner Basin, $1,82 \pm 0,16$ Ma) találjuk (8. ábra). Az első kitörés által a vulkáni kúp már kb. 1700 méter magasságba emelkedett. Amint a kitörésnek egyre nagyobb energiája lett, egyre robbanékonyabbá vált, riolit és dacit lávadómok, lávafolyások, majd andezit láva és hamu növelte a kúp méretét, a korábbi 50 km^3 térfogatról 95 km^3 -re, ami 2100 méteres magasságot jelentett. Ezzel kialakult a San Francisco-hegy rétegvulkáni képe. A második kúpépít szakasz nyomai az Agassiz csúcs



környékén találhatóak. A harmadik szakaszban pliniuszi kitörés során újabb dacit, riolit horzsakövek növelték a tzhányó méretét, ennek nyomait ma a Reese, a Doyle és a Fremont csúcs környékén találjuk.

8. ábra: A San Francisco tzhányó 5 kialakulási fázisának nyomai.

A legfiatalabb szakasz a legsötétebb szín. (forrás: Holm, 1987)

Az ezt követő negyedik szakasz során, a másodikhoz hasonlóan jelentősen növekedett a kúp magassága (2500 méterre) és térfogata (108 km^3 -re). Egy központi kitörésből dacit és andezit lávafolyások indultak el a vulkán minden oldalán, kivéve a délnyugati, hiszen azt a második szakaszban felépült Agassiz csúcs elgátolta, itt a lejtő oldalából indult el egy andezit lávafolyás. Az utolsó szakaszban parazitakúpok épültek a vulkán észak-keleti oldalán. A vulkáni működés nagyjából 220 ezer éve szünt meg, egy utolsó kitöréssel, amely létrehozta a kaldera szájánál levő, riolitból álló Cukorsüveg-hegyet. A San Francisco vulkán teljes eredeti térfogata 110 km^3 -re becsülhető, ebből az andezit 85, a dacit 12, a riolit 1 %-kal készült (HOLM, 1987). A kutatások alapján ma még nem teljesen tisztázott a központi kaldera kialakulása, azonban feltehetően a San Francisco - rétegvulkán keleti lejtője a Mt. St. Helens vulkánhoz hasonló módon, egy a

vulkán oldalán lejátszódó kitörés során robbanhatott le. A vulkán keleti lejtését az idő folyamán a vízfolyások és a jég erózió teljesen kimélyítette, szélesítette.

A San Francisco - t zónájában és annak tektonikus alakú belső kalderája, az éles gerincekkel, csúcsokkal, a félkör alakú cirkusz völgygel mind -mind az 1,8 millió éve tartó jégkorszak jellegzetes nyomai, melyeket a mozgó jég, valamint a káosz tereteket szétrepesztő gyakori fagyás-olvadás jelenségek okoztak (9. ábra). A jégkorszak nedvesebb és hidegebb periódusaiban a tartós hóhatár, vagyis az a magasság, ahol nyáron kevesebb hó olvad el, mint amennyi hócsapadék télen esik, a hegységben 3393 méteren lehetett (BEZY, 2003). A jég a tartós hóhatár fölötti területek völgyében felhalmozódott, belemarta magát a káosz felszínbe, a jég fölött magasodó gerincek pedig a fagy okozta aprózódás miatt fokozatosan hátráltak, keskenyedtek. Így jöttek létre a korábbi vízfolyások völgyében a kiszélesedett, félköríves, meredek falakkal határolt kárfülkék. A vastag jég réteg mélyén uralkodó nyomás a jeget képlékennyé teszi, ami így megindul a lejtés irányába. A jégmozgás irányáról a sziklákat karistoló jégkarok tanúskodnak. A kárfülkékből lefelé induló gleccserek az eljegesedés előtt kialakult folyóvölgyeket foglalták el, azonban a folyókkal ellentétben, amelyek pusztító ereje a meder környékére összpontosul, a gleccserek az egész általuk kitöltött völgy keresztmetszeteket átalakították. Nem csak szélesítették, de mélyítették is völgyeiket. A hegység 3 nagyobb eljegesedéséről tudunk, melyek közvetve meglehetősen nagy hatással lehettek salakkúpokra is, hiszen a nyári olvadáskor a salak átnedvesedve könnyedén lefolyhat a kúp oldalán, ezzel elősegítve az alatta levő réteg erodálhatóságát is.



9. ábra: Légifelvétel a San Francisco rétegvulkán kalderájáról

A cirkuszvölgyek (A), moréna (B) és az U alakú belső völgy, az Inner Basin (C)
(forrás: BEZY, 2003)

Az első és egyben a legkiterjedtebb (Lockett Meadow Glaciation) eljegesedés 212 és 125 ezer évvel ezelőre tehető. E során hét völgyből egybeült, 200 méter vastag gleccser indult lefelé a kalderából kb. 6,3 km hosszan. A második hideg periódus (Core Ridge Glaciation) során már csak egy 150 méter vastag és 4,2 km hosszú gleccser alakult ki kb. 100 ezer évvel ezelőtől. A legutóbbi 25 - 30 ezer évvel ezelőtől, harmadik gleccser elrenyomulás (Snowslide Spring Glaciation) csupán 210-250 méter vastag és 2,2 km hosszú lehetett, mégis ennek a nyomait lehet a hegységben legjobban megfigyelni (DUFFIELD, 1997). A morénaanyag teljesen osztályozatlan, benne a lisztfinomságú kőzetportól az asztallap nagyságú kőtömbig minden megtalálható (BORSY, 1998). A Core Ridge eljegesedés morénái a legmagasabbak, mégis a Snowslide Spring periódus morénáit a legkönnyebb észrevenni, hiszen azok voltak a legrövidebb ideig kitéve az erózió pusztításának. Ezek a jégfolyások jelentős mértékben átformálták a tájképet. A gleccser aljába, oldalába fagyott szikladarabok karcolják, csiszolják a korábbi folyóvölgyek sziklamedreit ezáltal alakítva ki a mai széles belső medencét (Inner Basin). A kaldera vastag porózus és áteresztő glaciális üledékében található víz ma is igen fontos forrás Flagstaff életében.

3.4.3. A Sunset és az SP Craterek

A vulkáni aktivitás a terület keleti részén geológiai értelemben nagyon fiatalnak mondható. A Sunset és az SP kráterben és a hozzájuk tartozó lávafolyásokban az erózió általi lényeges változás nem vehető észre, úgy tűnik, mintha tegnap alakultak volna ki. Azonban a kúpok és lávafolyásaik vizsgálata alapján kiderítették, hogy ez a domborzatukat tekintve nagyon hasonló két salakkúp teljesen eltérő kitöréseket produkált.

A salakkúpok teljes egészében laza vulkáni törmelékkel: salakból, hamuból (piroklasztit) álló kúpok, egyben a legáltalánosabb és Wood (1980a,b) szerint a legegyszerűbb vulkáni formák, amelyek megjelenhetnek különálló vulkánként bazalt láva területen, vagy parazita kúpként pajzs- illetve rétegvulkánok oldalában. A salakkúpok általában monogenetikusak, azaz életük folyamán egyszer törtnek csak ki, ellentétben a réteg- vagy a pajzsvulkánokkal. A kúp akár 700 méter magasra is emelkedhet, de leggyakrabban 30 és 300 méter közötti magassággal találkozunk. A kúpoknak nagyon meredek, több mint 35 fokos lejtője van, azonban az erodált, idősebb kúpoknak természetesen már lapegységű, kb. 15-20 fokos lejtő meredeksége. A fiatalabb, még kevésbé erodált salakkúpok tetején található egy öblös, tál alakú, a kúp kis méretéhez képest viszonylag nagy átmérőjű kráter. A salakkúpok szinte kivétel nélkül Stromboli típusú kitörés során alakulnak ki.

A Stromboli típusú kitörés olyan bazaltos magmára jellemző, amely a hawaii típusúnál több oldott gázt tartalmaz, s ez a gáz kioldódva gyorsabban is szabadul fel. A magma mozgása ugyanakkor még mindig elég lassú – viszkozitása is nagyobb a hawaii típusúnál –, ezért a kürtben, a magma oszlop tetején a buborékok felhalmozódnak, vagy akár össze is olvadhatnak, majd megfelelő feszítés során az összegyűlt buborékok váratlanul, lökészerűen széttörnek a kissé megszilárdult olvadékokat. A buborékok feláramlásának sebessége az illótartalomtól, és azok gőznyomásától függ. A gázzal telített láva hevesen az ég felé tör (több 100 méterre is akár), majd a levegőben kihűlés részük visszahullnak a kürt köré, ezáltal kör vagy ovális alakúvá formálják a lasan felépülő kúpot. A Stromboli kitörés legfőbb jellegzetessége, hogy a folyamat periódikusan ismétlődik, néhány tizedmásodperces vagy órás szünetekkel. A Stromboli típusú kitörések nem túlzottan hevesek: a kibocsátott, felszínre került anyag össz mennyisége nem éri el a km^3 -t sem. A kis intenzitásból következik a jellemzően kúpépítő módosulás. A kitöréstermékek lehetnek hamu, lapilli vagy bomba méretű alkotórészek. A salak színe üdén szürkésfekete, kékesfekete, de utólagosan – pl. feláramló gázok, gőzök hatására, a Fe-oxidálásával – vörössé alakulhat. Innen ered a Sunset Crater elnevezés is. A salakon túl egyéb jellegzetes kitöréstermék még a Stromboli típus esetében a kerek bomba, vagy a laposabb blokk is. A bombák a buborékosabb, azaz képlékenyebb anyagból keletkeznek, míg a blokkok a kürtben lévő olvadék felszínének megszilárduló-félben lévő anyagát képviselik, amelyet a felszökő buborékok széttörnek (OLLIER, 1988). Esetleges lávaöntési periódus tagolhatja a salakszórást, amint a gáztartalom már nem elegendő a kitöréshez.

A Sunset Crater a vulkáni terület legfiatalabb salakkúpja, alig valamivel több, mint 1000 évvel ezelőtt volt az utolsó heves kitörése, egész pontosan a dendrokronológián alapuló kormeghatározás alapján ez 1064/1065-re tehető (SMILEY, 1958; AMOS et al., 1981). A kitörés során létrejött közel 300 méter magas aszimmetrikus salakkúp a San Francisco - vulkán keleti lábánál található (SMILEY, 1958). A központi kráter több, mint 120 méter mély, amelyben egy kisebb 50 méteres mellék kráter található (HOLM, MOORE, R.B., 1987). A salakkúp úgy alakult ki, hogy a forró ($1100 - 1200^\circ\text{C}$ -os hamu és salak kilövellt a magasba, majd a repedés vagy a lyuk köré visszaszóródott. Ez a vető a kitörés központjától kb. 5 km hosszan futhatott észak-nyugati irányban, a Janus krátertől a Yaponcha kráterig, azonban ma már a Sunset kráter elfedi ezt a repedést (SMILEY, 1958).

(10. ábra)



10. ábra: A Sunset Crater és környezete.

Az el térben a Sunset Crater jellegzetes vörös kráterével, t le balra az apró Lenox Crater, mögötte a sötét fekete Bonito lávafolyás (forrás: Google Earth)

A kúp salak anyaga laza, gyengén osztályozott. Az átlagos részecskeátmér 4 mm, mely nagyon finom hamuval és szórt lapillivel (átmér je 32 mm feletti) vegyül (HODGES, 1962). A salakkúpok kitörésének igen gyakran velejáráó folyamata a sötét szín bazalt lávaömlés is. A Sunset Crater esetében egy nagyobb északnyugati és egy vékony, kisebb északkeleti nyelv r beszélhetünk. A kisebb az ún. Kanaa, míg a nagyobb a Bonito. A lávafolyások valószínű sítet en átszakították az eredeti kráter peremét és úgy folytak le a kúp oldalán, ezzel alakítva ki a kissé aszimmetrikus kúpformát. A lávát ezt követ en még további hamuréteg borította be. Az alkáli olivin bazalt kúp és a lávafolyás kb. 8 km² -t, míg a kiszórt, majd leülepedett hamu és salak közel 2000 km²-t borított be.

Az SP Crater kialakulása kb. 70 - 75 ezer évvel ezel ttre tehet . Kialakulásában andezit magma is szerepet játszott. A kúpépít periódus végs stádiumában a kráter belsejében egy láva tó duzzadt fel, ebb l repültek ki a csepp , bomba vagy fonál alakú vulkanitok. Az SP Crater kialakulása során kevés hamu keletkezett, hiszen a hamu rendszerint a heves, robbanásos kitöréseknél játszik nagy szerepet, mint a Sunset Crater esetében.

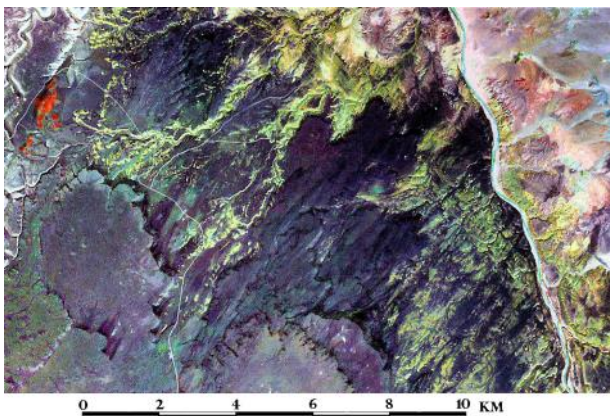


11. ábra: Légifelvétel az SP Craterról és a lávafolyásáról
(forrás: BEZY, 2003)

A kúp kb. 230 méter magas és 440 méter az átmérője a talpánál. A kráter 75-90 méter mély, pereme jól konzerválódott az erózióknak jól ellenálló olvadt vulkáni anyagnak köszönhetően. A hozzá tartozó közel 7,2 km hosszú lávafolyás a kúp lábánál levő nyílásból bukkant el (11. ábra). Eltérően a Bonito lávafolyásaa és pahoehoe lávájától, itt andezit blokkokból kialakult enyhén görbe hátakat találunk. Ahogy a távolsággal csökken a láva gáztartalma, úgy lesz egyre viszkózusabb, s rbben folyó lesz a lávafolyás, olyannyira, hogy a legészakabbi pontján 61 métert is eléri a vastagsága. A lávafolyás jellegzetességét az adja, hogy két kisebb nyelv folyt bele egy tektonikus vetbe a f folyás nyugati oldalából.

3.4.4. A salakdűnék

A Sunset Crater kb. 1000 éve történt szórványos kitörései során a magasból



hamu- és salakanyagokat a szél a krátertől északra, keletre és délre elhordta és ott 2100 km² területet beborított vulkáni törmelékkel. Ennek a hatalmas területnek egy viszonylag nagy részén jól láthatóak az es víz és a délnyugati irányú szél által kialakított nyomai (12. ábra).

12. ábra: Felvétel a szél által formált észak-kelet irányú salakdűnékről
(forrás: BEZY, 2003)

A krátert 1 keletre található területen a sötét-fekete szín , észak-keleti irányú d ne alakú formák kialakulásában a szél erodáló és felhalmozó munkája, az itt található vulkáni anyagokat, salakot, lapillit megvizsgálva egyértelm en megmutatkozik. A szélfúvást bizonyítja, hogy ezek a piroklasztitok csiszoltak, karcoltak és éles peremmel rendelkeznek. A salakban lev hólyagokat is a szél megnyújtotta, ezáltal rovátkák alakultak ki bennük.

3.4.5. A Grand Falls vízesés

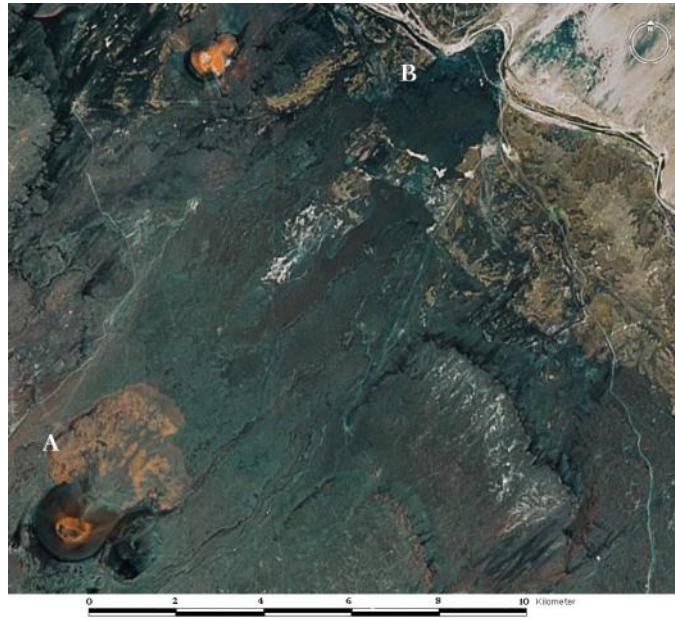
A Little Colorado folyó eltorlaszolója nagyjából 19 ezer évvel ezel tt a Merriam Crater lávafolyása által történt, így jött létre Arizona állam egyik gyöngyszeme a Grand Falls vízesés (13. ábra).



13. ábra: A Grand Falls lépcs zetes vízesés.

A Little Colorado folyó a Merriam Crater lávafolyását kikerülve zúdul korábbi kanyon medrébe (forrás: <http://web.umr.edu/~rogersda/umrcourses/geo372/>)

A SFVF, a Sunset Cratert leszámítva legfiatalabb (lumineszcenciás kor: 19.6 ± 1.2 ka) és egyben második leghosszabb lávafolyása a Merriam Crater környéki kisebb hasadékból tört a felszínre. Hozzávet legesen 10 km-t megtéve északkeleti irányba, a f lávafolyás (mert legalább 5 különálló nyelv lehetett) a Little Colorado folyó 65 méter mély szurdokvölgyébe zúdult, majd azt megtöltve, még 1 km-t tovább haladt északkeletnek (DUFFIELD et al., 2006). Egy kisebb nyúlvány pedig a folyóvölgyben haladva közel 25 km-t tett meg (14. ábra). Id vel a felduzzasztott folyó, megkerülte a lávafolyás végét, és bezúdult a régi szurdokvölgyébe, kialakítva ezzel a Grand Falls -t. A folyó azóta is folyamatosan erodálja a Kaibab rétegeket, így jött létre a jellegzetes lépcs s szerkezete.



14. ábra: r felvétel a Merriam Craterr l (A) és a Grand Falls vízesésr l (B) .
(forrás: BEZY, 2003)

4. Módszertan, alkalmazott módszerek, levezetett térképek áttekintése

A digitális domborzatmodellem alapjai az SRTM topográfiai adatbázisából letöltött n35w112 és n35w113 .hgt állományok voltak. Az amerikai NASA (National Aeronautic and Space Administration), a szintén amerikai DoD/NGA (National Geospatial-Intelligence Agency – korábban NIMA), a német DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Germany) és az olasz ASI (Agenzia Spaziale Italiana) 1996-ban kezdte meg az SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) programot, amelynek célja a Föld felszín jelent s részének nagy felbontású, digitális domborzati térképezése volt, rrepül gép fedélzetén elhelyezett radarrendszer felhasználásával. A program pénzügyi alapját a NIMA (National Intelligence Mapping Agency), majd kés bb az NGA, a SIR-C felszerelést, a felbocsátást, a földi érzékel ket, a munkafolyamatot és az adatátvitel zökken mentességét a NASA biztosította. A DLR és az ASI pedig az X-SAR-hoz szükséges felszereléseket, valamint szintén a földi érzékelésben és az adatok tovább ításában segítkezett. Az r sikló fedélzetén kett s képkalkotó radar (angol elnevezéséb l rövidítve: SIR -C, 5,6 cm) és kett s X sávú szintetikus appertúrájú radar (angol elnevezéséb l rövidítve: X -SAR, 3,1 cm)

alkotja a bázisvonalú interferométert, egyidejűleg két felvételt készítve (WINKLER et al., 2006). Ezen felvételekből háromdimenziós képek állíthatók elő. Több halasztás után, 2000 februárjában hajtották végre a mindössze 11 napig tartó mérési kampányt, az Endeavour elnevezésű repülőgépre szerelt berendezések segítségével.

Az repülőgépek 57 fokos pályaelhajlásából következik, hogy a mérés a poláris területeket nem érintette, a térképezett terület így a 60 fokos északi, valamint az 57 fokos déli szélességi körök közé esett, mellyel a Föld felszínének mintegy 80 százalékát sikerült térképezni. A mérés 5,6 centiméter hullámhosszúságú radarjelekkel történő radar-interferometrián alapult (TÍMÁR, 2003). Az interferenciát két, egymástól fix távolságra elhelyezett vevő biztosította. A kinyílt repülőgépben egy 60 méter hosszú tartószerkezet nyílt ki, melynek végén helyezkedett el a másik érzékelő. A kapott adatokat a fedélzeten rögzítették, ezért rádió-telemetriára nem volt szükség (WERNER, 2001). Az repülőgépről történő méréseket 70 000 km hosszúságban GPS-mérésekkel végzett földmérési szelvényezés egészítette ki a függőleges pontosság javítása érdekében. Ezen kívül adott pozíciójú mesterséges visszaverő felületekkel - amelyeket a ritkán lakott területeken helyeztek el, - igyekeztek javítani a vízszintes pontosságot. A mérést követő adatfeldolgozás, több mint 18 hónapot vett igénybe, amely után az Egyesült Államok geológiai szolgálata, a USGS (United States Geological Survey) az eredményként kapott adatokat kezelte, archiválta és tette bárki számára elérhetővé a 3 szögmásodperc felbontású (ill. az USA területét ábrázoló 1 szögmásodperc felbontású) adatokat az Interneten. A program során tehát két felbontásban készült elő a térképezett területre a digitális domborzatmodell. A pontosabb 1 szögmásodperc, a kevésbé pontos 3 szögmásodperc felbontású, de még ez utóbbi is óriási javulást jelent az idáig elérhető legpontosabb globális domborzatmodellhez, a GTOPO30-hoz képest (RABUS et al, 2003). Az 1 szögmásodperc felbontású adatok 3x3 fok kiterjedésű foktrapézonként a `*.hgt` állományokban, melyek így foktrapézonként tehát 3601x3601 pixelt tartalmaznak. A pixelértékek magassági adatokat tartalmaznak, az alkalmazott alapfelület pedig a WGS'84 földi ellipszoid. A magasságok a szintezett magasság becslései, amelyek a mérésekből származtatott WGS'84 ellipszoidi magasság és egy globális modellből vett helyi geoidunduláció-érték különbségeként álltak elő (TÍMÁR, 2003). Mivel az adatok radar-technológiával készültek, így figyelembe kell venni az ebből adódó problémákat, és esetleges hamis adatokat. Ilyenek például a vízfelületekről, a hullámzás miatt bizonytalanul érkező jelek. Ezek java részét az adatfeldolgozás során már kiszűrték és úgynevezett NULL generáltak ezeknek. Ilyen értéket kaptak a hegyvidéki, mély szurdokvölgyek egy-egy

pontjai is, amelyek a radar számára árnyékban voltak, és nem érkezett felületükre visszavert radarjel. Az esetleges hiányzó értékeket más, gyengébb felbontású domborzatmodelllel pótolhatjuk, vagy, ahogy a dolgozatomban is tettem, a 3DEM szoftver „patch missing data” parancsával interpolálhatunk értékeket. További hibája az adatbázisnak, hogy az 5,6 centiméter hullámhosszú rádiójelek nem hatolnak át a növények lombzatán, a szilárd épületek burkolatáról, tetejéről pedig visszaverődnek, így ezek megjelennek a magassági adatokban. Azonban ezek a hibák is bizonyos mértékig korrigálhatóak. Az SRTM program legnagyobb előnye, azon túl, hogy ingyenesen hozzáférhető mindenki számára, abban rejlik, hogy távoli, külföldi területek geomorfológiai vizsgálatait teszi lehetővé azáltal, hogy ország- és kontinens-független adatbázisról van szó, ráadásul vizsgálatainkat igen jó felbontásban tehetjük. Ezek eddig csak kevés esetben és nagy költséggel voltak megoldhatóak.

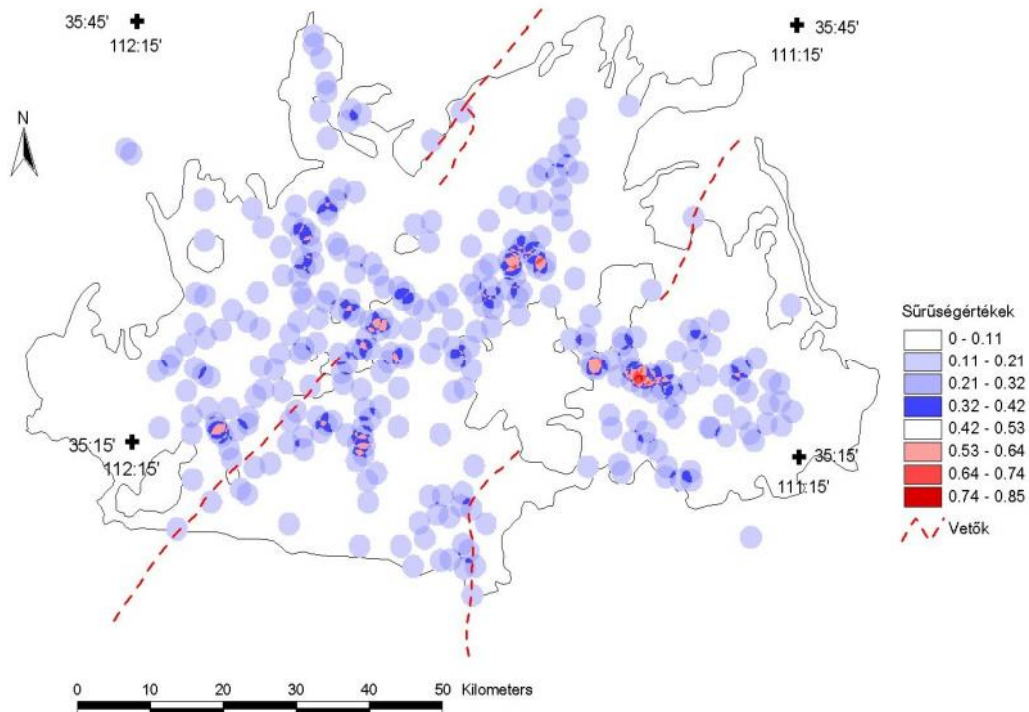
4.1. A vonatkoztatási középpont meghatározása és az alaktani besorolás

A létrehozott digitális domborzatmodellt ERDAS Imagine nevű programmal UTM vetületbe forgattam, majd ezek után kezdetem el a bazalt kúpok helyét kijelölni, bedigitalizálni Arc View-ba. Először a kúpok vonatkoztatási **középpontjait** jelöltem ki, hogy lássam hány darabbal lesz dolgom, valamint, hogy már az elején különböz **alaktani csoportba** tudjam sorolni őket. Colton (1967) a SFVF salakkúpjait lepusztulásuk alapján 5 osztályba sorolta (1. táblázat). A legfiatalabb kúpok (5. állapot) meredek és ideiglenes vízfolyások bevágása nélküli lejtővel rendelkeznek, továbbá a salak részecskék csak kis mértékben oxidáltak. A 4. állapot a nagy mértékű erózió hiányát tekintve nagyon hasonló az 5-höz, de az oxidáció már kellően elterjedt a salakot ahhoz, hogy gyér vegetáció megjelenjen a lejtőkön. A bevágódások jellemzik Colton 3. lepusztulási csoportját, míg a második csoportra kúpjait már oly jelentős erózió érte, mely során felszínre kerültek a belső kőzetlegrések, gerincek, továbbá a talajképződés miatt érett vegetáció is megjelent a lejtőkön. A teljesen lepusztult kúpok esetében (1. állapot) Colton szerint már csak egy dugóhoz hasonló formát találunk. Ez a beosztás nagyon hasonló a Kear (1957) által használtakhoz, melyeket az új-zélandi nagy rétegvulkánok esetében alkalmazott. Colton csoportosításában tehát nagy szerepe van az oxidációs folyamatnak és a növényzet megjelenési, elterjedési fokának. E két jellemző közül egyiket sem tudtam vizsgálni a meglévő SRTM domborzatmodell használatával, ezért új, általam generált lepusztulási csoportokat használtam.

Colton csoportjai	Moore et al. (1976)	Kor (m.y.)	Mágnesesség
5	Sunset kor	0,001	Brunhes - Normál polaritás
5	Merriam kor	0,05	Brunhes - Normál polaritás
4	Tappan kor	0,2 - 0,7	Brunhes - Normál polaritás
3	Woodhouse kor	0,8 - 3,0	Matuyama - Fordított polaritás
2	Rim Basalts kor	3,0 - 4,0	Matuyama - Fordított polaritás
1	Cedar Ranch kor	5,5 - 6,0	pre-Matuyama

1. táblázat: A SFVF salakkúpjainak csoportosítása különböző kormeghatározások alapján

Hat morfológiai osztályt alakítottam ki, a lepusztulási foknak megfelelően. A legkevésbé lepusztultak csoportja, a kúp alak zárt kráterrel, ezt a kúp alak nyílt kráterrel, majd a kúp alak, kráter nélkül és a gyengén definiálható kúp alak csoport követi. A leginkább lepusztult kúpok pedig a hiányzik a kúp alak, illetve a kúp alak nélküli, alig definiálható morfológia nevű csoportba kerültek. A középpontok kijelölésénél D.M. Hooper és M.F. Sheridan 1998-as cikkében vizsgált több mint 216 darab kúpot én is figyelembe vettem. További 56 darabot E.W. Wolfe et al. 1987-es, a területre készült térképének segítségével, valamint 43 darabot sajátként jelöltem ki. Így tehát 333 darab megvizsgálható salakkúpot kaptam. Ahogy McGetchin et al. 1974-ben írt cikkében leírja, egy salakkúp kialakulásának négy szakasz lehet. Az Északkeleti Krátert (Etna, Olaszország) és a Paricutint (Mexi kő) vizsgálva állapította meg, hogy egy teljesen kifejlődött salakkúp magassága 30-40 méter. Ezért a 30 méternél alacsonyabb kúp alakú formákat kizártam a morfológiai vizsgálatból, mert ezeket teljes bizonyossággal nem lehet elkülöníteni a fröccskúpoktól, valamint néhány kúrt alakú mélyedés ezek közül valószínűleg nem érte el a teljesen érett formáját. Így a vizsgálható kúpok száma 316 db lett (15. ábra).



15. ábra: A SFVF salakkúpjainak sűrűsége 1500 méter sugarú kör esetén. A salakkúpok többsége viszonylag szétszórtnak, nem a savanyú kúpok vagy a törések közelében alakult ki.

A salakkúpok általában egymás közelségében, egy csoportban, vagy egy vonalban jönnek létre, így az őket felépítő kőzetanyag és a kialakulásuk kora is nagyon hasonló, ahogy igaz ez a Sunset Crater-re és a hozzá tartozó, tőle északnyugatra levő néhány kúpra, melyek bizonyítottan kb. 200 év időintervallumon belül keletkeztek (CHAMPION, 1980). Ezért az általam kijelölt kúpok korát ezen elvek alapján a hozzájuk legközelebbi Hooper és Sheridan által meghatározott korú kúpoknak megfelelően adtam. A vulkáni terület többi kúpját azért nem vizsgáltam, mert vagy a kora nem volt biztonságosan meghatározható, vagy a kúp egy részét vagy a teljes egészét egy későbbi lávafolyás betemette, ezért morfológiailag a vizsgálatra alkalmatlan volt.

4.2. A salakkúpok korának meghatározása

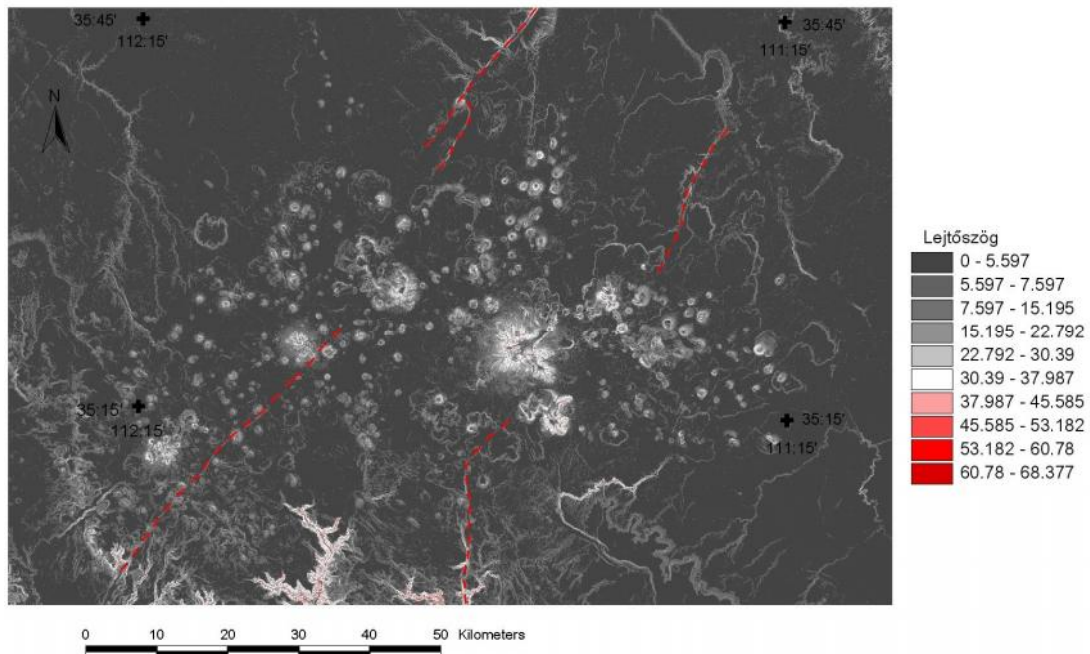
A területen az amerikai geológiai szolgálat (USGS) kezdett el egy geotermikus kutatási programot 1976-ban, a térség részletes feltárása érdekében. A vulkáni k zetekben lev mágnesesség alapján 650-nél több vulkanikus kúpot sikerült megkülönböztetni (TANAKA el al., 1986). A mágneses polaritás vizsgálatához járult még a K -Ar kormeghatározás, k zettani vizsgálatok, rétegtani összefüggések, valamint a lávafolyások és a salakkúpok bizonyos fokú megóvásának el terjesztése. Az adatokat ö t darab 1:50 000 méretarányú geológiai térképen jelenítették meg, azonban sajnos ezek közül csak egy geológiai térkép állt rendelkezésemre, ezért a salakkúpok **korcsoport** szerinti beosztásánál a területre l készült egyéb szakirodalomban használt beosztást használok. Ezek alapján a vulkáni terület keleti és központi részén lev lávafolyásokat és salakkúpokat f leg rétegtani vizsgálatokon alapuló öt osztályba lehet sorolni. Ez az öt csoport a következők :

1. Holocén - Kés Pleisztocén (0 - 0.16 m.y.)
2. Középs Pleisztocén (0.16 - 0.73 m.y.)
3. Kora Pleisztocén (0.73 - 2.0 m.y.)
4. Kora Pleisztocén - Kés Pliocén (2.0 - 2.48 m.y., de ide tartozik még néhány, 0.73 - 2.48 m.y. korú kúp is, melyeknek nem határozhatóak meg egész pontosan a koruk)
5. Kés Pliocén (2.48 - 5.0 m.y.)

Ezen korcsoportok más szakirodalomban talált beosztással is nagy mértékben összefüggnek, ahogy Moore et al. 1974-es cikkében is írja (Cedar Ranch, 6-5 m.y.; Woodhouse, 3.0-0.8 m.y.; Tappan, 0.7-0.2 m.y.; Merriam, <0,150 m.y.; Sunset 1064 A.D.).

4.3. A kúpalapzat körülhatárolása, magassági adatok létrehozása

Ezt követte a kúpok talpának körülhatárolása, ezeket poligonoknak hívom. A poligonokat úgy határoltam körbe, hogy készítettem a DDM-b l egy lejt szög térképet (slope) az Arc View DEMAT programjának segítségével (16. ábra).



16. ábra: A San Francisco vulkáni terület lejt viszonyai.

A terület túlnyomórészt sík, ebből emelkedik ki a több mint 600 salakkúp, néhány nagyobb dácit, riolit lávadóm és a San Francisco rétegvulkán.

A terület viszonylag vízszintes volta miatt e levezetett térképpel könnyen lehatárolhatók lettek poligonok. Azokon a salakkúpokon, amelyeken zárt vagy már az erózió által kinyílt kráter perem volt található, ott azokat is bedigitalizáltam. A magassági adatokat a DDM-ből ezen pontok és vonalak mentén az Arc View segítségével 3D .shp fájlokat generálva, a következő scripttel sikerült kinyernem:

```

aNezet=av.GetActiveDoc
a3Dtema=aNezet.GetActiveThemes.Get(0)
azFTab=a3Dtema.GetFTab
If = LineFile.Make( "C:\Tom\dolg\ArcView\3Dshapeexport.txt".AsFileName, #FILE_PERM_WRITE )
azShMz=azFTab.FindField("Shape")
azIDMz=azFTab.FindField("Name")
for each iii in azFTab
azSh=azFTab.ReturnValue(azShMz,iii)
aNev=azFTab.ReturnValue(azIDMz,iii)
If.WriteElt(aNev.AsString)
If.WriteElt(azSh.AsString)
end
If.Close

```


Az így nyert adatokat .txt, majd .xls formátummá alakítva tudtam használni. A magassági adatokból meg tudtam határozni a kúpok, kúplábak átlagos és tengerszint feletti magasságát, a zárt kráterek mélységét. A **kúpmagasság** (H_{co}) számításnál az alaknak már meghatározó szerepe volt, leginkább a kettős kráterrel rendelkező kúpok esetében, ezeknél ugyanis csak a magasabbik kúp tengerszint feletti magasságát vettem figyelembe és ebből vontam ki az átlagmagasságot, hiszen a salakkúpok talpmagassága minden esetben a poligonok átlagmagassága volt. A kráterrel rendelkező kúpok esetében a kráterperem legmagasabb pontja és a kúpláb átlagmagasságának különbsége, azoknál pedig, amelyeknél már lekopott a kráterperem, ott a kúp legmagasabb pontja és a kúpláb átlagmagasságának különbsége adta a magasságot.

4.4. A terület, kerület, kerekítettség értéke

Ezek után újabb oszlopokba az Arc View calculate programjával kiszámítottam a kúplábak **területét** (=Shape.ReturnArea), **kerületét** (=Shape.ReturnLength) és a **kerekítettségét** (=kerület*kerület/terület).

4.5. A salakkúpok átmérője, és a W_{co}/H_{co} paraméter

A poligonok leghosszabb átmérőjét, valamint az erre merleges rövidebb átmérőt a következő elv alapján dolgozó programmal számítottam ki. Egy koordináta-rendszert megadott algoritmus szerint a poligonok középpontja körül forgatva a program elmentette a legnagyobb kiterjedést mutató hossz tengelyt, az erre merleges rövidebb tengelyt, valamint az ehhez tartozó forgatási szög értékét. A hosszú és a rövid tengely átlaga alapján megkaptam a poligonok **átmérőjét** (W_{co}). Ugyanígy határoztam meg a kráterek átmérőjét is. Majd a kúpmagasság (H_{co}) és az átmérő (W_{co}) hányadosának kiszámításával pedig megkaptam az egyik legfontosabb morfológiai paramétert (H_{co}/W_{co}). A salakkúpok átmérőjét egy másik elv alapján is kiszámítottam, ezt **geometriai átmérőnek** neveztem. Ezt az értéket a salakkúpok területével azonos területű kör képletéből számítottam ki, azaz

$$r = \sqrt{T/\pi}$$

ahol r a kör sugara és T a kör területe. A kapott értéket kétszer szorozva a kúpok átmérőjét kapjuk. A salakkúpok hossz tengelye és az elméleti átmérő hányadosa, mérettől függetlenül megadja a kúpok köralaktól való eltérését.

4.6. Az elméleti, az átlagos és a maximális lejt szög meghatározása

A magasság és az átmérő megéléte után, az **elméleti lejt szöget** számoltam ki. Az ép kráterrel rendelkező kúpok esetében:

$$S = \text{tg}[2 * H_{\text{co}} / (W_{\text{co}} - W_{\text{cr}})] \quad (1)$$

Ahol, az S a lejt szöget, a H_{co} a kúpmagasságot, a W_{co} a kúpátmérőt, a W_{cr} pedig a kráter átmérőt jelöli. Az idősebb, kráterrel már nem rendelkező kúpok esetében pedig:

$$S = \text{tg}(2 * H_{\text{co}} / W_{\text{co}}) \quad (2)$$

képletet használtam, azonban, ahogy DOHRENWEND et al. (1986) megállapította, hogy az ilyen és ehhez hasonló morfológiai adatok vizsgálata során +/- 10-15 % lehet a bizonytalanság.

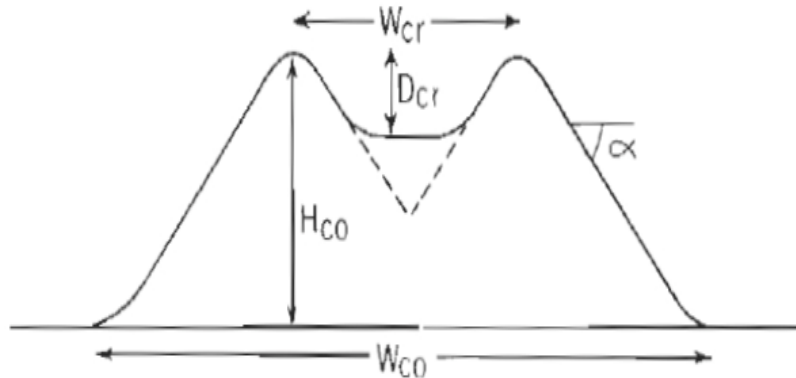
Az **átlagos lejt szöget** az Arc View Spatial Analyst kiegészítő programjával nyertem ki a DDM-ből. Először készítettem egy lejt szög térképet 1 fokos beosztással, majd a kúpok által lefedett területre egy hisztogramot készítettem, melynek adatai képezték a számolásom alapját. A hisztogram azt mutatta meg, hogy a kúpalap által bezárt területen, egy fokként meghatározott lejt kategóriákba hány pixel tartozik. Ezeket normalizálva megkaptam az átlagos lejt szöget korcsoportra és kúpokra külön-külön.

A **maximális lejt szöget** () az Arc View Spatial Analysis programjának segítségével úgy határoztam meg, hogy minden egyes kúp egyfokos lejt szög-hisztogramjának elkészítése után megvizsgáltam, hogy egy-egy kúpnak hány fokos a legmeredekebb oldala.

4.7. A krátermélység, a kráterátmérő, a kráterterület, - kerület, - kerekítettség

Azokra a kúpokra, amelyek rendelkeznek zárt kráterrel, azokra kiszámítottam a **krátermélység** (D_{cr}), - **átmérő** (W_{cr}), - **terület** (T_{cr}), - **kerület**, és - **kerekítettség** értékeket is. A krátermélység, a kráterperem legmagasabb pontja és a kráter közepe (amely jelen esetekben a kráter legmélyebb pontja is volt) közti különbsétként adódott. A kráterátmérőt a kúpátmérőnél használatos program elve alapján számítottam ki, ahogy a terület (=Shape.ReturnArea), kerület (=Shape.ReturnLength) és a kerekítettség (=kerület*kerület/terület) esetében is a már említett módszereket használtam.

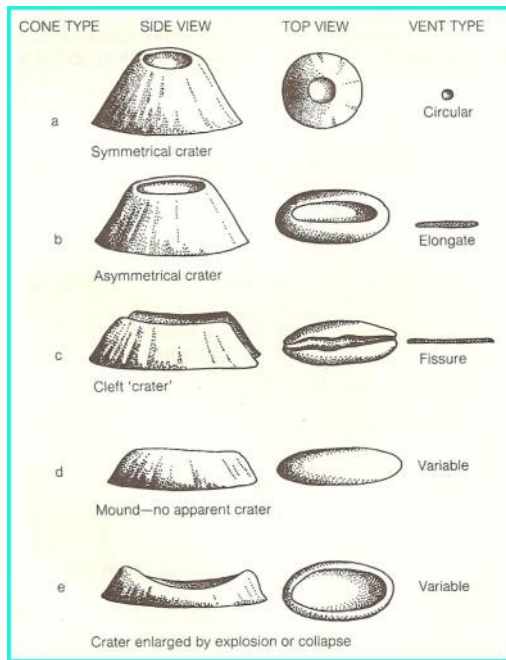
A morfológiai paraméterek Porter (1972) által is használt ábrán könnyen érthetővé válnak (17. ábra). A kúpok legtöbbszörre megfeleltethető ez az ábra, kivételt csupán néhány, vetkimentén elnyúlt salakkúp alkothat.



17. ábra: Sematikus ábra egy salakkúpról a vizsgált értékekkel (PORTER, 1972 alapján)

5. A SFVF salakkúpjainak morfológiai elemzése

Wood, (1980b) cikkében körülbelül 40 darab a területen található salakkúp morfológiáját vizsgálta, ebből vonta le következtetéseit. Úgy gondolom ez kevésbé fedt le az egész terület morfológiáját, ezért eredményeinek helyessége megkérdőjelezhető. A SFVF területén nagyon vegyes a kúpok alakutani képe, vagyis a legszabályosabb, kör alapú, 30 fokos lejt meredekség salakkúptól kezdve, az egészen amorf alakú, elnyúlt, vagy ellaposodott, esetleg összenőtt, vagy betemetődött kúpokig bezárólag lehet kúpokat látni, ahogy ezt Breed (1964) is megállapította korábbi vizsgálatait során (18. ábra). Ezt a képet átfogni nehezen lehetséges pusztán 40 kúp vizsgálatával, ezért én a lehető legtöbb kúpot igyekeztem a vizsgálatomba bevenni. Az általam elemzett 316 db salakkúp 78 százaléka két korcsoportban található: 44,3 % (140 db) a közép-pleisztocénben, 34,8 % (110 db) a kora pleisztocén - és pliocénben létrejött vulkáni formának tekinthető. 8,8 %-kal a pliocén, 8,5 %-kal a kora pleisztocén és 3,4 %-kal a holocén - és pleisztocén korú kúpok alkotják a következő korcsoportokat.



8. ábra: Kráteralak szerinti salakkúp-csoportok Breed (1964) szerint.

a, Szimmetrikus kráter;

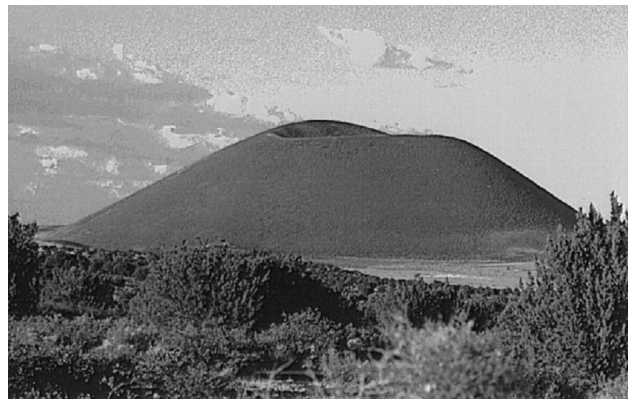
b, Aszimmetrikus, megnyúlt alakú kráter;

c, „Hasadék” kráter;

d, Salakdomb, nincs szemmel látható kráter;

e, Robbanás vagy beomlás során megnövekedett változó alakú kráter.

A salakkúpok korának növekedésével az alakjuk egyre lepusztultabbá válik az eróziós folyamatok következtében, a következőképpen. A vulkáni kitörés végeztével egy tipikus salakkúpnak kúpos vagy kissé elnyúlt alakja van (19. ábra).



19. ábra:

A Merriam Crater északkeleti oldala. A maga 403 méteres magasságával, meredek lejtővel, szimmetrikus alakjával és éles kráterperemével a Merriam Crater, a San Francisco vulkáni területen tipikus fiatal, kés pleisztocén korú salakkúp képét mutatja (forrás: Hooper és Sheridan, 1998)

A csúcskráter igen gyakran tál alakú mélyedés, de elliptikus vagy megnyúlt is lehet. Néhány kúp krátere már a kialakulása közben is átszakadhat, köszönhetően az egyenetlen kráterperem magasságának, vagy egyéb rendellenességnek. A kúp oldalából a piroklaszt anyag elszállítása több folyamat eredménye, ilyen lehet például az es csepp eróziója, vagy

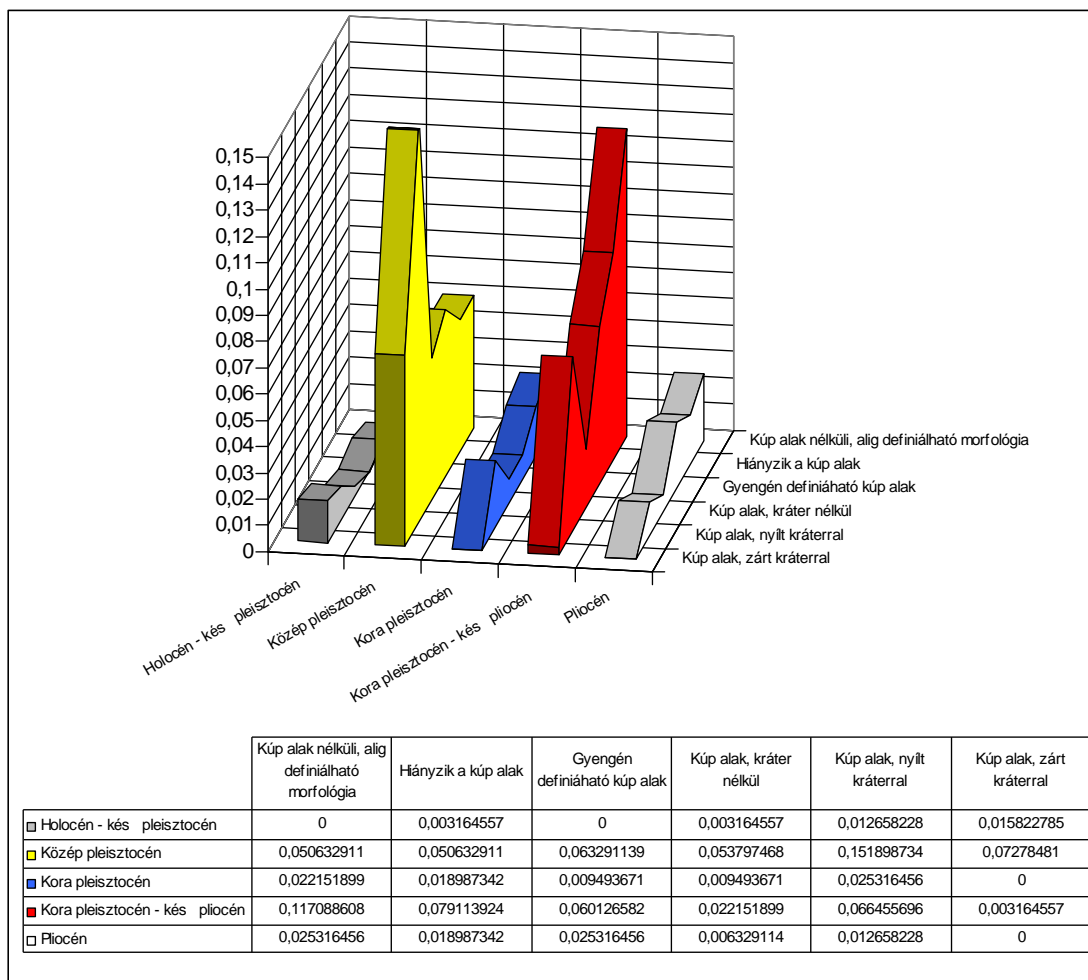
a kisebb-nagyobb időszakos vízfolyások erodáló munkája. Különböző patakok és törmelékfolyások is hozzájárulhatnak az eróziós átalakításokhoz (DOHRENWEN D et al., 1986). A salakkúp lábához történő természetes anyagszállítás jelentősen növeli a törmelékcsoknya tömegét és ezzel a kúp átmérőjét is. A változás a kráteren belül is megnyilvánul. A kráter mélysége csökken az oldalfalak, illetve a kráter perem beroskadásával, törmelékfolyással. Ehhez hasonló lepusztulást figyelt meg Inbar et al. (1994) is, aki 10 méternyi feltöltést írt le a Paricutin (Mexikó) kráterében 1957-óta. Közben a kráter különböző eróziós folyamatok által részben feltöltődik, vízmosságok fokozatosan átvághatják és alacsonyíthatják a kráterperemet. A salakkúp magassága egyre inkább csökken, egészen addig a pontig, amíg a kráter teljes mértékben el nem erodálódik, és a kúp egy salakdombra nem fog hasonlítani. Az egyszerűség kedvéért megállapíthatjuk, hogy a fiatalabb salakkúpok rendelkeznek kráterrel, míg az idősebbeknek már elerodálódott. A fiatalabb salakkúpokon nem találhatóak vízmosság által történő bevágódásra utaló nyomok, mert a beszivárgási kapacitás igen nagy, ezért lefolyás nem fordul elő. Kezdeti vízmossági képződmények eleinte apróbb erek, patakocskák formájában, rendszerint a lejtők alsóbb részén, a kúpok lábánál jelentkeznek. Idősebb kúpoknál már a vízmosságok szélesedése és mélyülése figyelhető meg, míg nem összeolvadnak nagyméretű igen széles hasadékká, vízmossággá. Ilyen és ehhez hasonló lepusztító folyamatok következtében a kúp egy alacsony lejtőszögű vagy pajzs alakú dombbá redukálódik, ahogy ezt a 20. ábra is szemlélteti.



20. ábra: Egy pliocén korú salakkúp maradványa.

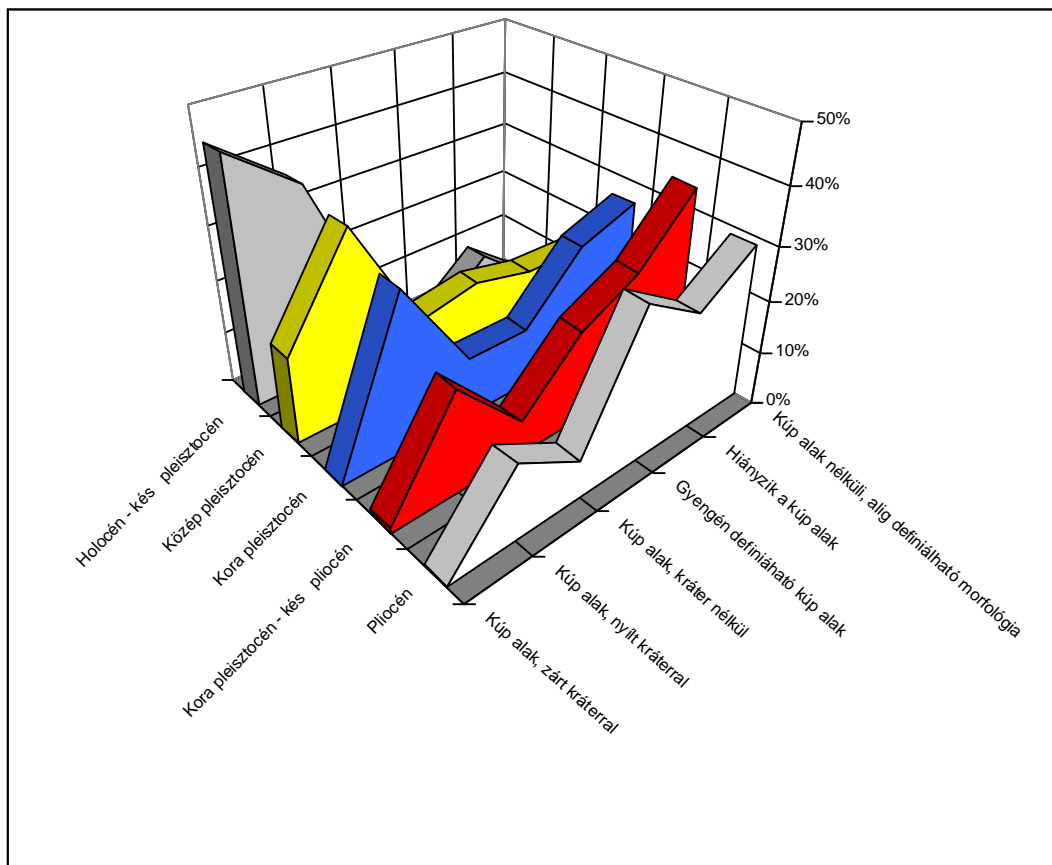
Az Ash Folk közelében készített felvételen egy névtelen, a SFVF peremén található salakkúp látható. A pliocén korú, jellegzetesen idős kúp képződményéről már az eróziós folyamatok során lepusztult a kráter, és magassága is csupán 67 méter (forrás: Hooper és Sheridan, 1998)

Ez a lepusztulási folyamat az általam vizsgált kúpok esetében is megfigyelhető. Az egészen fiatal holocén korú kúpok nagy részénél találni még át nem vágott kráterperemet, amelyek a közép pleisztocén kúpoknál már nagyrészt átvágott formában találhatók. Ebbe a kategóriába tartozik a vizsgált kúpok legtöbbször, szám szerint 48 db. A kora pleisztocén kúpok esetében ugyanakkor kráter perem is - igaz átvágott formában, - és kúp alak nélküli, alig leírható morfológiájú kúp is szinte egyenlő arányban fordul elő. A viszonylag ép kúpformák és az igen lepusztult kúpmaradványok aránya a kora pleisztocén - és pliocén korban változik meg látványosan, olyannyira, hogy ebben a korcsoportban a leglepusztultabb kúpok alaktani kategóriájába, a 316 darab kúp 11,7 %-a tartozik. A pliocén kúpok között pedig a holocén társaik szinte tükörképeként, kráterrel rendelkező kúp alig, míg teljesen lepusztult kúp nagymértékben fordul elő (21. ábra).



21. ábra: Az össz-kúpszámhoz viszonyított alak és kor százalékos megoszlása

Ezt az imént említett tükörképet szemlélteti a következő ábra, amely az adott korcsoportban található kúpok számát száz -százaléknak véve, ábrázolja a kúpok alaktani megoszlását. E szerint a holocén kúpok 45,5 százaléka zárt kráterrel, 36,4 százaléka nyílt kráterrel rendelkezik. Ennek ellenpólusa, hogy a pliocén korcsoportban közel 30 százalék az alig definiálható morfológiájú kúp. 21,5 százaléka kúp alak nélküli és szintén 30 százaléka gyengén definiálható kúp alakkal rendelkezik, valamint néhány zárt kráter kúpot is találni e korcsoportban. A két legtöbb taggal rendelkező korcsoport is szinte egymás ellenpólusa. A közép pleisztocén csoportban 16,5, valamint 34,3 százalékot tesznek ki a zárt, illetve a nyílt kráterrel bírók, 12 -14-11-11 százalékot pedig az egyre lepusztultabb kúpok. Ezzel ellentétben a kora pleisztocén - és pliocén csoport kúpjai közül 33,6 százaléknak nem is határozható meg teljes bizonyossággal az alakja, míg 22,7 százaléknak nincs, 17,3 százaléknak pedig gyengén definiálható. Mindemellett a korcsoportot alkotó kúpok 20 százaléka rendelkezik nyílt kráterrel. A középső, kora pleisztocén korcsoport kúpjainak morfológia szerinti besorolása egyfajta átmenetet képez az ép és a teljesen lepusztult kúpok között. Ezt leginkább abban láthatjuk, hogy a két középső alaktani kategóriában, amelynél elválik a nyilvánvaló kúpalak, vagyis a „gyengén definiálható kúp alak” és a „kúp alak, kráter nélkül” csoportokban egyenlő számban vesznek részt a kúpok. Továbbá e két egyező értéknel az épebb és a lepusztultabb kúpok is nagyobb számban vesznek részt. 29,6 százalékkal a nyílt kráterrel rendelkezők, és 22,5 százalékkal a kúp alak nélküliek csoportja követi, míg 25,9 százalékot képviselnek az alig körülírható kúpalakkal rendelkező kora pleisztocén korú salakkúpok. (22. ábra). Ez a váltás, amely tehát a kúpalak „elvesztésére” utal, a kora pleisztocénban következik be. Az ennél idősebb kúpok esetén nehezen leírható a kúpalak, míg az ennél fiatalabbak esetében viszonylag könnyen meghatározható.



22. ábra: Egy-egy korcsoportban lev kúpok alak szerinti százalékos megoszlása

5.1. Korcsoportok elemzése

A salakkúpok morfológiája erősen függ a kúpok korától, ezért vizsgálatom során nem a kúpok véletlenszerű kiválasztása, hanem korcsoportonként történő elemzése volt a cél (23. ábra).

A legidősebb, kés pliocén (2.48 - 5.0 m.y.) korú 28 darab kúp, az általam vizsgált kúpok 8,83 %-a, területük súlyozott átlaga 2,357 km², és 7,79 %-kal részesednek az összterületből, amelyek közül a legnagyobb 4,54 km²-rel a tíz legnagyobb kúp között található. A legkisebb pliocén kúp viszont, a maga 0,278 km² területével a 316 kúp közül az 5. legkisebb is. A vulkáni terület nyugati részén található zömében ezek a pliocén kúpok, amelyek a terület észak-nyugati részén jól látható módon törések mentén jöttek létre. Alakjukat tekintve a három leginkább lepusztult csoportba tartoznak. Az alig definiálható kúpalak csoportjába tartozik 8 darab, amely az összes kúp 2,52 százaléka, a kúpalak nélküli csoportba 6, míg a gyengén definiálható kúpalak csoportba 8 darab tartozik. Ebbe a három csoportba tartozik a pliocén kúpok több, mint 80 százaléka. Természetesen az erősen

lepusztulás miatt zárt kráter nem fordul elő a pliocén korú salakkúpoknál. Nyílt kráterrel viszont négy kúp is rendelkezik. A pliocén salakkúpok esetében előfordul a területi átlagnál akár két és félszer magasabb kúp is, azonban ez az a néhány meglehetősen nagy területű kúp, amelyek kiemelkednek méretükkel a korcsoportból. A magassági átlag (87,44 m) nem ebben a csoportban a legkisebb. Az átméret tekintve az 1431,76 méteres összátlagot a pliocén kúpok közül csupán 11 darab éri el. A korcsoport átlaga 93,65 %, amely 1340,97 méternek felel meg. A kúpmagasság és a kúpátméret aránya a 0,0352 és a 0,0902 közti szélső értékek között szóródik, 0,0611-es átlaggal. A 2,48 millió évnél idősebb, leginkább lepusztult kúpok igen lankás lejtőszöggel rendelkeznek, mely az elméleti lejtőszög tekintetében átlagosan 12,28 fok és a nagyméretű, magas kúpok esetében sem éri el a 20 fokot. A kúpok átlagos lejtőszöge 8,17 fok, míg a maximális lejtőszögek átlaga 22,61 fok.

A 111 darab **kora pleisztocén-kés pliocén** (2.0 - 2.48 m.y.) korú salakkúpok az általam vizsgált formák több, mint harmadát teszik ki. Az összterületük tekintetében is meghaladják a 30 százalékot. A korcsoport legnagyobb kúpja, 4,95 km²-rel a negyedik, míg a terület szempontjából csupán a kilencedik az összes közül, vagyis ebben az esetben a nagy méret, viszonylag kerek formát mutat. A csoport legkisebb tagja a 316 darab salakkúp között is a legkisebb, 0,181 km²-es. Az első öt legkevésbé kerek forma között is e csoport tagja, ez az arányilag sok elnyúlt és szabálytalan formájú kúpnak köszönhető. A kúpok legtöbbször keletebbre helyezkednek el, mint a késő pliocén korú társaik, továbbá meglehetősen közel egymáshoz, egy tömbben találhatóak. Kivételt képez a terület északi és déli részén található néhány kúp, melyek jól láthatóan vetők mentén alakultak ki, valamint az SP Crater szomszédságában és a San Francisco-t zónázó lábánál levő két salakkúp. E kategóriába tartozó kúpok átlagmagassága (89,94 m) néhány méterrel kisebb, mint a pliocén korúaké, de a második legmagasabb kúp mégis itt található, 351,61 méterrel. A csoport 111 tagjának 33,6 százaléka a legerodáltabb, 22,7 százaléka a kúp alak nélküli csoportba tartozik, morfológiájuk alig definiálható. A képet azonban színesíti, hogy 1 darab kúpnak jól körülhatárolható zárt krátere, másik 21-nek pedig nyílt krátere van. A kora pleisztocén-kés pliocén korú kúpok átmérete csupán 94,25 százaléka a 316 db forma átlagának, ez 1349,49 métert jelent, amely 0,0623 H_{co}/W_{co} arányt eredményez a korcsoportra. A kúpok meredekségének átlaga már meghaladja a 12,5 fokot, de kilenc esetében a 20 fokos meredekséget is túllépi, míg a maximális lejtőszögek átlaga 22,58 fok.

A **kora pleisztocén** (0.73 - 2.0 m.y.) mindösszesen 27 kúpja igen elszórtan helyezkedik el a terület középső részén. Javarásszt a Mesa Butte és az Oak Creek Canyon töréseihez, vetihez igazodnak, valamint az intermedier kőzetből felépülő Sitgreaves Mountain és a Kendrick Peak környékén sorosodnak. Területük nem éri el az összterület 10 %-át sem, de ebben a csoportban is található igen nagyméretű, az első tízben levő kúp. A területük súlyozott átlaga $2,470 \text{ km}^2$ vagyis ebben a csoportban is viszonylag nagy kúpok találhatóak. A korcsoport átlagmagassága már 103,17 méter, amely majdnem a 316 kúp átlagmagasságának felel meg. Ugyanígy az átlaghoz közeli a kúpátmérő, mely a csoport esetében 1430,95 méter, valamint az elméleti lejt meredekség értéke is, amely 14,37 fokos. Egyetlen kúp esetében nem 30 fok fölél a meredekség, de ez a Kendrick Peak oldalában fekszik, ez növeli így meg a lejt szögét. Az átlagos lejt szög 9,9, míg a maximális lejt szög a korcsoportra nézve 25,19 fok. A H_{co}/W_{co} arány szinte az átlaggal megegyezik, vagyis 0,0711. Ez a csoport tehát nem csak korban és térben, hanem minden vizsgált morfológiai paraméter tekintetében középen helyezkedik el. A 27 db kúp 60 %-a a három leger teljesebben erodált morfológiai csoportba tartozik, ugyanakkor itt is az átlaghoz hasonló tendencia mutatkozik meg, hiszen 7 db kúpna alig definiálható az alakja, míg 8 db nyílt kráterrel rendelkezik.

A legnagyobb kategóriát, 140 darab salakkúppal a **közép pleisztocén** (0,16 - 0,73 m.y.) korú csoport képviseli. Területük az összterületnek 47 százalékát teszik ki, a csoport kúpjainak súlyozott átlaga pedig $2,734 \text{ km}^2$. Ebben a csoportban találjuk a három legnagyobb területű kúpot, köztük az első a Crater 160 nevű, mely nem csak területével, de kráter-mélységével és átmérőjével is a legnagyobb a kúpok között. Azonban a harmadik és a negyedik legkisebb kúp is e csoport tagja, $0,236$ és $0,247 \text{ km}^2$ -rel. Elhelyezkedésükre jellemző, hogy néhány kivételtől eltekintve mind a San Francisco rétegvulkántól keletre, észak-keletre találhatóak. Két jellemző tengely mentén jöttek létre e korcsoport kúpjai, kelet-nyugati, valamint észak-északkelet – dél-délnyugat irányban. A salakkúpok átlagos magassága több, mint 20 méterrel magasabb az előző csoport értékénél, 123,05 méter, melyek között a legmagasabb 297,56 méter. A kúpátmérő 1488,41 méter, amely az összátlag 163,42 %-a, a H_{co}/W_{co} arány pedig 0,0901. Az elméleti lejt meredekség átlaga a korcsoportban 17,34 fok, azonban a 140 kúp közül 36-nak húsz foknál, 4-nek pedig 30 foknál is nagyobb a meredeksége. A salakkúpok átlagos lejt meredeksége a korcsoportra 10,76 fok, míg a maximális 26,97 fok. A kúpok között több olyan is van, amelyek

egymásra épültek, vagy egy átmeneti kúp lábánál jöttek létre. Ezek esetében a lejt szög kiugró értéket mutat. A csoport kúpjainak harmada nyílt, míg 16 % -a zárt kráterrel rendelkezik, és már csak a kúpok 40 % -a tartozik a gyengén, alig definiálható, illetve a kúp alak nélküliek csoportjaiba.

A legfiatalabb **holocén - és pleisztocén** (0 - 0.16 m.y.) mindössze 11 darab kúp az összterületnek csupán 5 % -át teszi ki, mégis súlyozott átlaguk a legmagasabb 3,067 km². A 11 kúp igen véletlenszerűen helyezkedik el a San Francisco vulkántól északra és nyugatra a közép pleisztocén korú kúpok között. A csoport legnagyobb területű kúpja, a 316 között az ötödik legnagyobb, ez a Merriam Crater, amely nem csak területével, de a 402,9 méteres magasságával is kitűnik a kúpok közül. A legkisebb kúp azonban csak a középső nyben található. A korcsoport átlagmagassága 197,61 méter, ez majdnem a duplája az összátlagnak, míg az átmérő esetében ez csupán 130 % és 1773,76 méter. A magasság és az átmérő hányadosa a fiatal kúpok esetében 0,1092. A salakkúpok elméleti lejt meredeksége ebben a csoportban a legnagyobb 25,74 fokkal, de mind az átlagos (13,46), mind a maximális lejt szög (33,55) itt a legnagyobb. Két kúpnak kiemelkedő, 40 fok feletti a lejt szöge: Merriam Crater 40,46°, SP Crater 42,66°, a harmadik helyet a Sunset Crater foglalja el „csupán” 31,97°-kal. Ebben a korcsoportban már több, mint 80 százalékban zárt és nyílt kráterekkel rendelkező kúpok találhatóak.

A vizsgált morfológiai paraméterek korcsoportos elemzése után, a mutatókat mind a 316 salakkúpra nézve, együttesen elemeztem a következő korrelációs táblázatot felhasználva (2. táblázat). A kiszámított adatokat korreláltattam egymással, és megkaptam az R² értékét. A táblázatból kiderül, hogy mely adatok függenek egymástól, illetve mely adatok határozzák meg a másikat. Balról jobbra haladva ismertetem a nagyobb korrelációs kapcsolatokat.



23. ábra: A korcsoportok morfometriai paramétereinek grafikonjai

A grafikonok a Hco/Wco értékek szerint van sorbarendezve, amelyhez jól illeszkedik az elméleti lejt szög görbéje is. A kora pleisztocén-kés pliocén korcsoport grafikonján, jól látható a San Francisco rétegvulkán oldalában elhelyezked , viszonylag nagyobb lejt szöggel rendelkező BT026 jelű kúp. Ez a jelenség a középső pleisztocén kúpok esetében is megfigyelhető. Az összesített ábra mutatja, hogy mind a négy morfometriai paraméter csökken az időséggel.

	Alak	Kor	Terület	Kerület	Kerekség	Hco	Wco	Geometriai átmér	Hco/Wco	Elméleti lejt szög	Átlagos lejt szög	Maximális lejt szög	Wcr	Tcr	Dcr	Wcr/Wco
Alak	1,000	0,404	-0,509	-0,517	0,078	-0,656	-0,526	-0,534	-0,578	-0,638	-0,496	-0,569	-	-	-	-
Kor		1,000	-0,161	-0,154	0,008	-0,324	-0,156	-0,155	-0,415	-0,447	-0,487	-0,457	0,190	0,154	-0,031	0,279
Terület			1,000	0,979	0,124	0,823	0,980	0,982	0,342	0,400	0,304	0,457	0,537	0,515	0,581	-0,196
Kerület				1,000	0,213	0,818	0,997	0,995	0,332	0,384	0,305	0,472	0,456	0,421	0,515	-0,297
Kerekség					1,000	0,058	0,175	0,121	-0,090	-0,074	0,136	0,084	0,226	0,157	0,259	-0,261
Hco						1,000	0,822	0,825	0,780	0,794	0,610	0,680	0,201	0,162	0,376	-0,387
Wco							1,000	0,997	0,336	0,386	0,305	0,472	0,470	0,433	0,519	-0,286
Geometriai átmér								1,000	0,345	0,395	0,296	0,473	0,463	0,433	0,515	-0,278
Hco/Wco									1,000	0,949	0,772	0,715	-0,178	-0,181	0,098	-0,323
Elméleti lejt szög										1,000	0,771	0,712	-0,004	0,005	0,236	0,084
Átlagos lejt szög											1,000	0,773	0,154	0,104	0,382	-0,164
Maximális lejt szög												1,000	0,381	0,383	0,600	-0,110
Wcr													1,000	0,970	0,912	0,485
Tcr														1,000	0,922	0,490
Dcr															1,000	0,352
Wcr/Wco																1,000

2. táblázat: A kiszámított adatok korrelációs táblázata

Magától értet d összefüggés

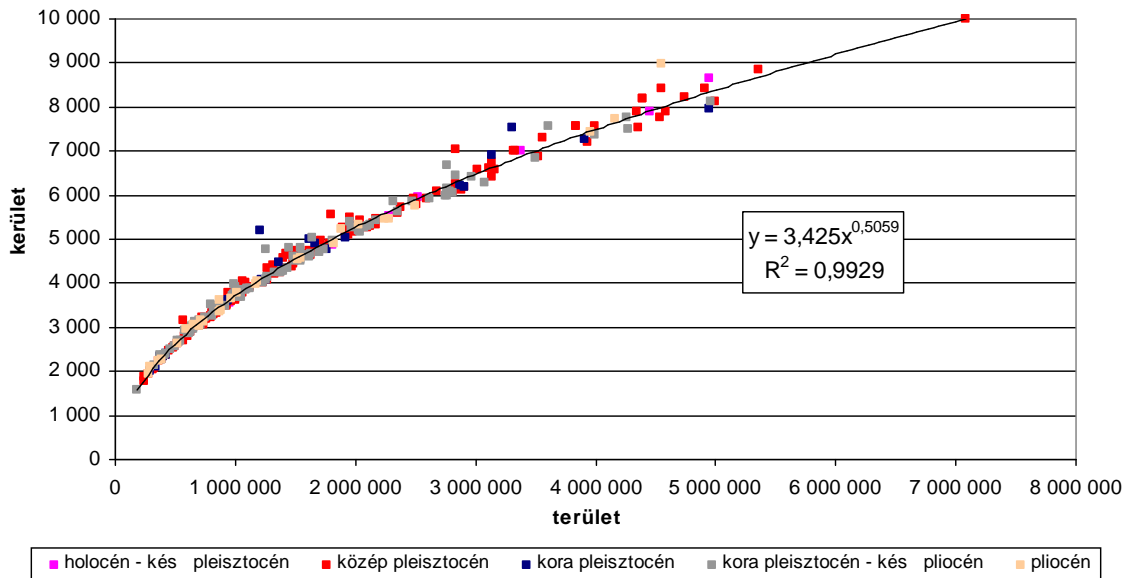
Viszonylag er s korreláció

Közepesen er s korreláció

Egyéb érdekes összefüggés

Ábra készült róla

Az egyik leger sebb korrelációt a terület és a kerület kapcsolata mutatja. A 0,979-es pozitív korreláció azt a magától értet d tényt mondja ki, hogy minél nagyobb egy kúp területe, annál nagyobb a kerülete és viszont. A grafikonon ábrázolt korrelációs görbékr l a következ megállapításokat tehetjük.



24. ábra: A terület és kerület korrelációja

Minden korcsoportban meglehetősen nagy a méretbeli változékonyság, vagyis nagy területű kúpok ugyanúgy előfordulnak a pliocén korcsoportban, mint a holocén kúpok között. A legnagyobb szórást azonban a középs-pleisztocén kúpok területi értékeiben találjuk (24. ábra). A pontok a nagyobb terület/kerület értékeknél egyre kevésbé illeszkednek a hatványgörbére. Ez annak a következménye, hogy minél nagyobbak a kúpok annál szabálytalanabb alakkal rendelkeznek, annál kevésbé kör alakúak. A kis terület/kerületnél pedig sokkal nagyobb az egymástól való függés, vagyis szabályosabb alakkal rendelkeznek, azaz minél kisebb egy kúp annál kerek ebb. Néhány kúp jól látható módon eltér az átlagtól. Ezek a legkevésbé szabályos kúpok, melyet szinte minden korcsoportban találni, általában közepesen nagyméretű, elnyúlt kúpok, gyakran valamilyen törés mentén alakultak ki, vagy a hozzájuk tartozó lávafolyással oly módon összenőtték, hogy elkülönítésük, kúp lábuk pontos kijelölése nem volt egyértelműen megoldható, és ez okozhat néhány esetben pontatlan határokat. A grafikon pontjaira a hatványgörbe illeszkedik a legjobban, hiszen a terület és a kerület között négyzetes kapcsolat áll fenn. A

legnagyobb területtel a közép pleisztocén korú 7,084 km²-es Crater 160 nevű salakkúp rendelkezik, mely az átlag 5-szörösét teszi ki (25. ábra).



25. ábra: A legnagyobb terület, mélység és átmérőjű salakkúp, a Crater 160 hatalmas krátere

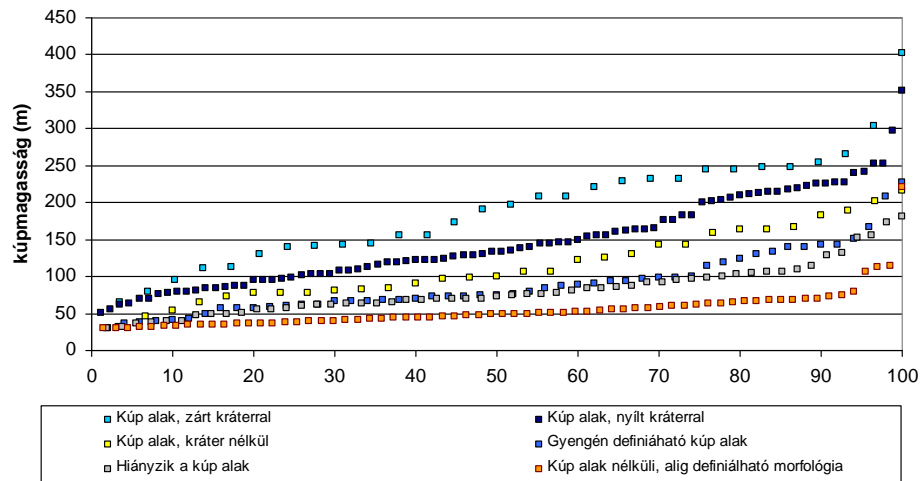
(forrás: <http://volcano.und.edu>)

Már tettem említést a korcsoport vizsgálatánál a méreteiről, de most kicsit részletesebben is írok róla. A Crater 160 egy összetett salak-, tufa- és fröccskúp is egyben. A kúp anyagában gyakran előfordulnak ultramafikus zárványok. Kialakulásában három szakasz különíthető el. A kezdeti szakaszban egy lávafolyásból fröccskúpként induló kitörés hozta létre a kúp lábánál levő és a kráter észak-keleti falán ma is látható dike-szerű képződményt. A kialakulás második szakaszában a kráter mélyült és szélesedett, valamint különböző zárványokat tartalmazó tufarétegek üledtek le benne. A kialakulás utolsó fázisában egy láva-szökőkút hozta létre a salakkúp maihoz hasonló formáját. Egyedülálló módon a kráter fenekére 72 méterrel a kúplábnál is mélyebben fekszik.

5.2. A kúpmagasság (Hco) összefüggései

A következő megvizsgált korreláció a **kúpok magassága** és az általam felállított **alaktani besorolás** közötti kapcsolat, amely -0,656 értéket mutat. Ez egy közepesen erős fordított arányt mutató korreláció, amely azt fejezi ki, hogy minél nagyobb egy kúp relatív magassága annál kisebb értékkel bíró alaktani csoportba tartozik, vagyis annál szabályosabb kúpalakkal rendelkezik. Ez persze kevésbé igaz az előző bekezdésben taglalt

nagy méretű kúpokra, hiszen azok a méretükben kifejezetten magasak, valamint ahogy említettem gyakran azok rendelkeznek a legszabálytalanabb alakokkal. A következő ábrán a különböző morfológiai csoportokba tartozó kúpok magasságviszonyait ábrázoltam (26. ábra).

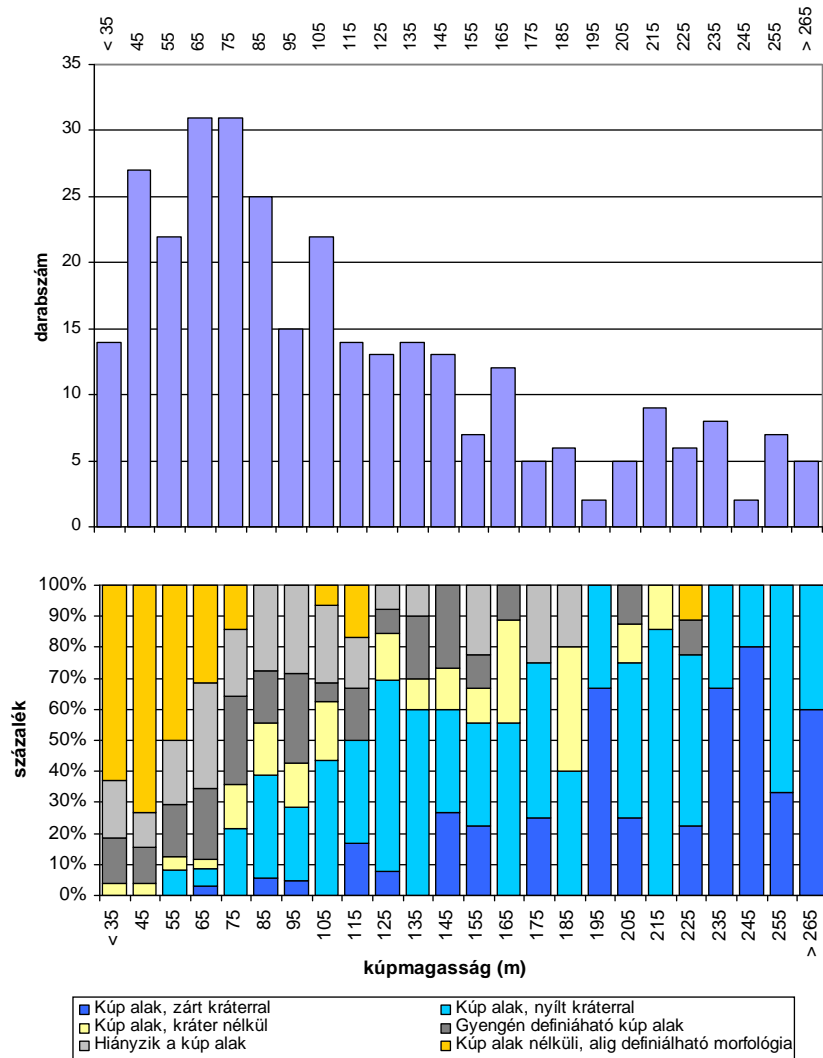


26. ábra: Egyes alaktani kategóriák kúpmagasság viszonyai

A grafikonon egy-egy alaktani csoport 100 százalékra redukálva jelenik meg, ezáltal a kúpok magasságának változása egymáshoz is viszonyíthatóvá válik

A kúpok kijelölésénél említettem, hogy a 30 méternél alacsonyabb kúpokat kivontam a vizsgálat alól, hisz azok nem különböztethetők meg teljes mértékben a fröccskúpoktól, ezért nincs az ábrán 30 méternél alacsonyabb kúp. Az ábráról leolvasható, hogy a morfológiai csoportok közül a leginkább lepusztult kúpok, melyeknek szinte nincs is definiálható morfológiájuk, közel azonos magasságúak. Négy kúp kivételével 100 méternél alacsonyabbak, az 50 méteres magasság körül alakulnak. Az ettől épőbb alaktani csoportba tartozó kúpok viszont mind-mind sokkal nagyobb változékonyságot mutatnak a kúpmagasság terén. Minden egyes kategória esetében találni néhány az átlagtól merben eltérő paraméterekkel rendelkező kúpot. Figyelemre méltó, hogy a kráter nélküli, de szabályos kúpalakokkal rendelkező formák között nincs kiugró érték. Érdekes továbbá, hogy az alacsony kúpok esetében minden kategória viszonylag sok kúppal vett részt, a nagyobb magasságoknál ez kevésbé van így. Ez a felbontás részletességének hiányából adódó probléma miatt lehet, vagyis a kisméretű kúpokat nem lehet egyértelműen bekezelni alaktani csoportokba, míg a nagyobb magasságnál, méretnél ez biztosan megállapítható. A holocén kúpok görbéjén megfigyelhető egy hullám a 150 méteres magasságban, vagyis abban a magasságban viszonylag több kúp is található, majd ez

megismétlik 250 méternél is. A legváltozatosabb magasságokkal a nyílt kráterrel rendelkező kúpok csoportja bír, már csak azért is, mert ebbe a kategóriába tartozik a legtöbb, szám szerint 85 salakkúp, ráadásul igen vegyes korösszetétellel, ezért ott a 350 m magas kúp mellett az 50 m-es is el fordul.

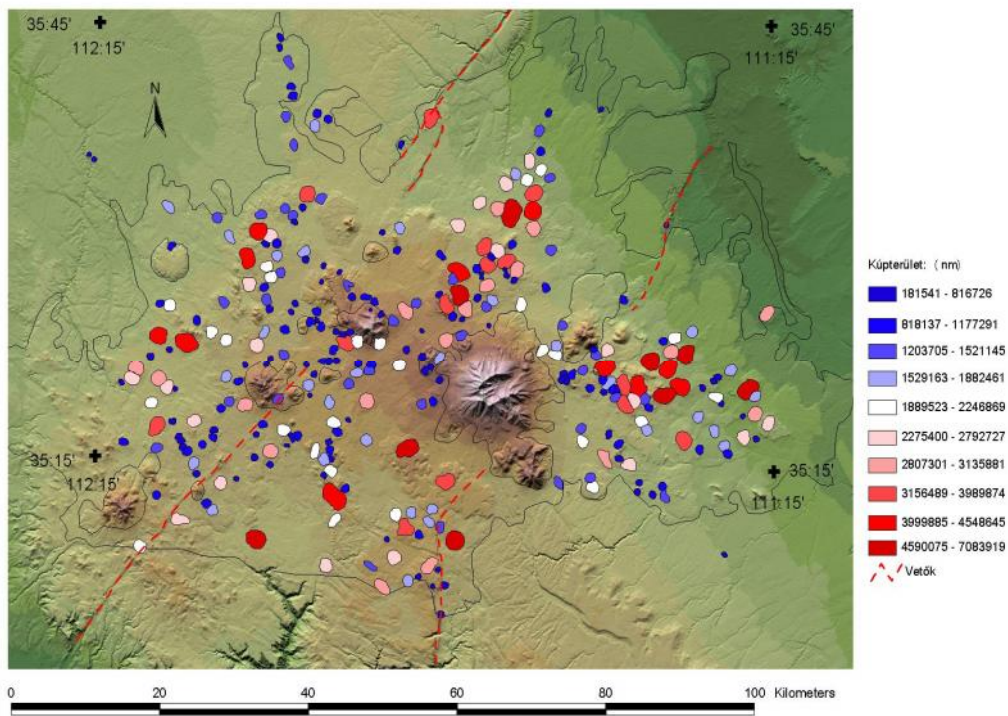


27. ábra: A kúpmagasságok gyakoriság eloszlása (fent) és a gyakoriságok alak szerinti százalékos megoszlása (lent)

A SFVF salakkúpjainak 89 százaléka 200 méternél, több mint fele 90 méternél alacsonyabb, vagyis viszonylag kis magassággal rendelkező kúp. Ezt a tényt hivatott szemléltetni a 27. ábra. Erről leolvasható, hogy az általam vizsgált kúpok közül a legtöbb 65-85 méter magas, míg 200 méteres kúp alig fordul elő. E két érték között pedig

fokozatosan csökken arányban oszlanak el a kúpok a nagyobb magasságok irányába. Ezen felül pedig a kifejezetten magas kúpok találhatóak, melyek szinte kizárólag a zárt, illetve a nyílt kráterrel rendelkező kúpok közül kerülnek ki. Az ábrák a várt eredménynek megfelelően, azt is szemléltetik, hogy a lepusztultabb salakkúpok az alacsony magassági kategóriákban gyakoriak, 100-110 méter felett csak kis mértékben fordulnak elő, míg a legépebb kúpok 60 métertől a legmagasabb kategóriáig mindenben megtalálhatóak, vagyis általánosságként elmondható, hogy a magasabb kúpok épebbek, az alacsonyak lepusztultak, míg a közepesen magas kúpok (100-200 m) meglehetősen vegyes képet mutatnak.

A **kúpmagasságtól** szinte egyenlő mértékben függ a **salakkúpok területe és a kerülete**, előbbi 0,823, míg utóbbi 0,818 értéket mutat. Ez az erős kapcsolat azt mutatja meg, hogy a magasabb kúpok egyben nagyobb területűek is, amelyek pedig a már említett korrelációjuk miatt nagyobb kerülettel is rendelkeznek. Azt az összefüggést, melyet már a kúpmagasságnál említettem itt is el lehet mondani, miszerint a kúpok legtöbbször kis méretűek. Az összterület 50 %-át 240 db, 2 km²-nél kisebb kúp adja. Ez tehát azt sugallja, hogy a területkúpjainak nagy része viszonylag kis méretű, csak néhány nagyobb méretű kúp található, melyek kilógnak a többi közül, ahogy ezt a 28. ábra is szemlélteti. Ezek sok esetben összenőtt, több kráterrel rendelkező kúpok (közép pleisztocén korúak), vagy törések mentén megnyúlt alakúak, vagy néhány idős korára ellaposodó, ezért nagy kiterjedésű kúp. A hasonló magasságú és területű kúpok térbeli elhelyezkedésében nem találtam egyértelmű összefüggést csupán annyit, hogy a terület keleti felében arányaiban több a nagyméretű kúp, de ez a fiatalabb korukból is következik.

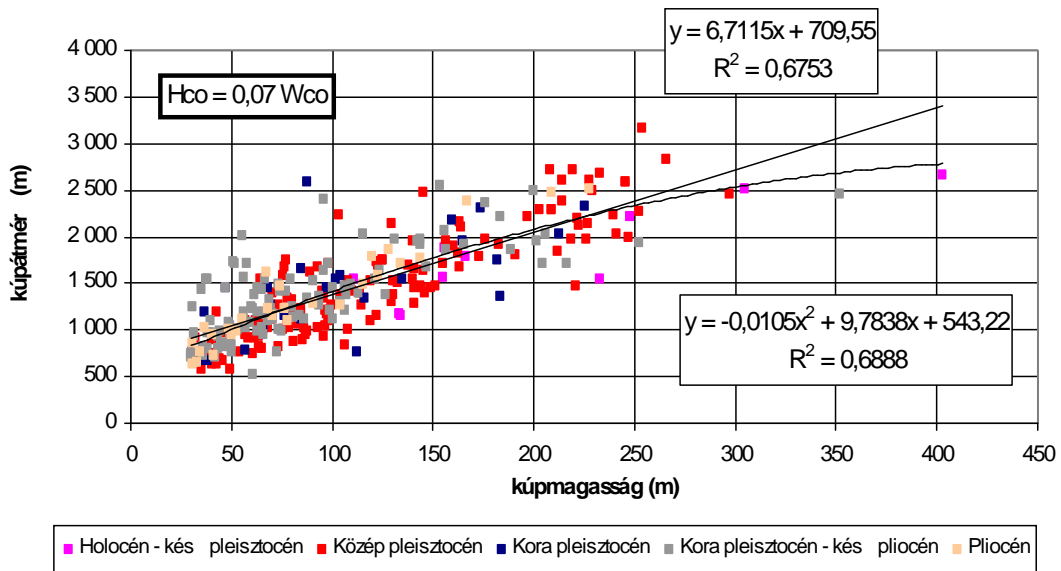


28. ábra: A salakkúpok területe.

Néhány nagyméretű kúpot leszámítva, a SFVF területén kisméretű kúpok vannak túlsúlyban, több mint 240 darab 2 km^2 -nél kisebb területtel rendelkeznek.

A következő vizsgálandó összefüggés a **kúpmagasság és a kúpátmérő** kapcsolata (korrel: 0,822). Az adatokra másodfokú polinom illeszkedik a legjobban, így is a determinációs együttható csupán 0,688. A görbe feletti kúpok az átmérőjükhez képest sokkal kisebb magasságúak, míg az alattiak esetében a nagy magasságukhoz az átlagnál kisebb átmérő tartozik. Az előbbi esetben a kisebb kúpok elterjedése, lepusztulása miatt figyelhető meg ez a tendencia, míg az utóbbiaknál a fiatal kúpok relatív ép állapota miatti magasság látható (29. ábra). Emiatt a görbe felett nem is található holocén-korú pleisztocén korú salakkúp, viszont az idősebb pliocén kúpok jelentős része a görbe alatt helyezkedik el. Ez az összefüggés sokkal inkább látható a közepes, vagy még inkább a nagyméretű kúpok esetében, a kisméretű kúpok vegyes képet mutatnak. A kúpok magasság/átmérő viszonyait vizsgálva arra az eredményre jutottam, hogy egy 50 méter magas kúpnak az átmérője kb. 1000 m, 100 méter esetében 1500 m, 200 méter esetében 2100 m, 250 méternél 2300 m, 300 méternél pedig 2500 méteres az ideális átmérő hossza, vagyis a kúpmagasság növekedésével nem egyenlő arányban nő a kúpátmérő. A vizsgált

pontokra egy egyenest is illeszttem, melynek determinációs együtthatója 0,675. A két görbe a kis- és közepes méretű kúpok esetében közel azonos, viszont jelentős eltérést mutat a nagyobb értékeknél. Vagyis a 250 méternél alacsonyabb kúpok esetében lineáris kapcsolat írható le a kúpmagasság és a kúpátmérő között, de ez nem mondható el a magas, fiatal salakkúpokra. Mind 316 kúpot figyelembe véve a kúpmagasságot az átmérő 0,07-szereseként kaphatjuk meg. Ez az érték a holocén korcsoportban a legmagasabb, 0,10 (+/- 0,02), és a pliocén korúak esetében már csupán 0,06 (+/-0,01). amint ezt a 3. táblázat is mutatja.



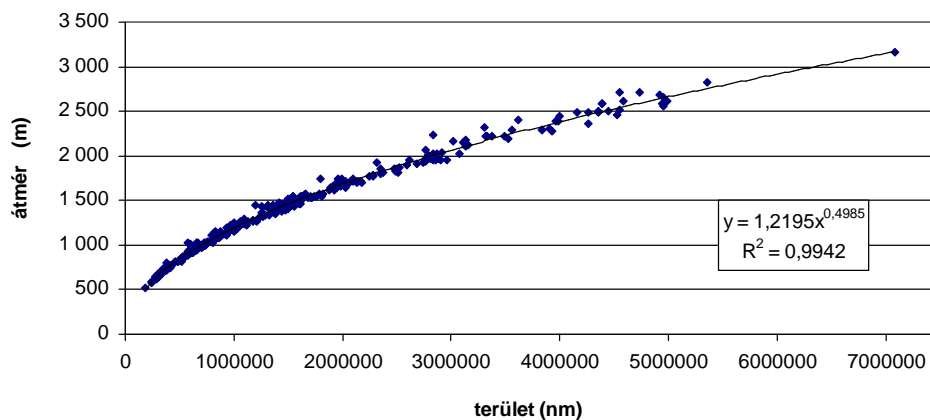
29. ábra: A kúpmagasság és a kúpátmérő korrelációja

Korcsoportok	n (db)	Hco/Wco	Maximális lejtő szög	Átlagos lejtő szög	Kúpmagasság (Hco)	Kúpátmérő (Wco)
Holocén - kés pleisztocén (0-0,16 m.y.)	11	0,109 +/- 0,024	33,5 +/- 3,1	25,7 +/- 8,6	197,6 +/- 86,3	1773 +/- 477
Közép pleisztocén (0,16-0,73 m.y.)	139	0,090 +/- 0,017	26,9 +/- 4,5	20,5 +/- 4,7	207,7 +/- 40,7	2278 +/- 312
Kora pleisztocén (0,73-2,0 m.y.)	27	0,071 +/- 0,028	25,1 +/- 4,6	14,3 +/- 5,8	103,1 +/- 56,6	1430 +/- 531
Kora pleisztocén - kés pliocén (0,73-2,0 m.y.)	111	0,062 +/- 0,022	22,5 +/- 4,5	12,6 +/- 4,7	87,3 +/- 54,2	1356 +/- 443
Pliocén (2,48-5,0)	28	0,061 +/- 0,015	22,6 +/- 5,3	12,2 +/- 3,1	87,4 +/- 52,4	1340 +/- 518

3. táblázat: A kiszámított f morfológiai paraméterek változása korcsoportonként

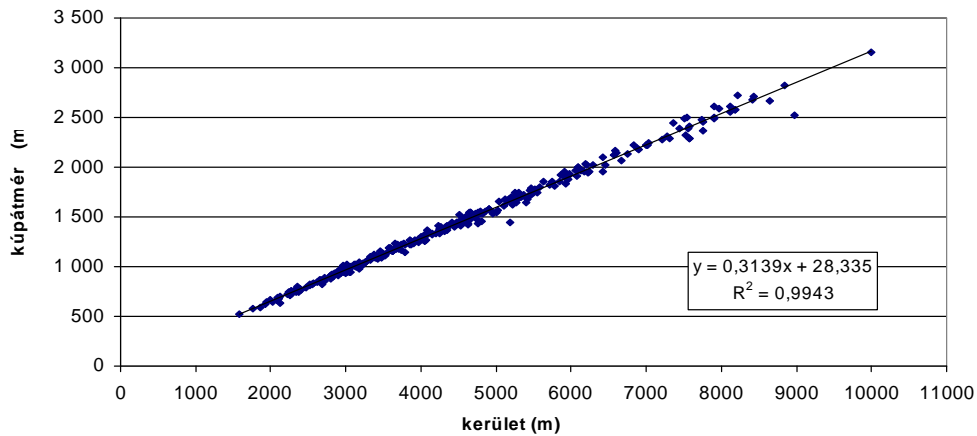
5.3. Kúpátmér vel (Wco) való korrelációk

A vizsgált és ábrázolt adatok között a legnagyobb összefüggést a **terület és a kúpátmér** 0,980-es korrelációja mutatja. E két adatsor kapcsolatának leírására készített ábra szemlélteti, hogy nincs 500 méternél kisebb átmér j kúp, a legkisebb 517 méteres, míg a legnagyobb, a sokat emlegetett Crater 160, 3150 méter kúpátmér vel rendelkezik. A determinációs együttható 0,994, vagyis a pontokra helyezett hatvány, kiválóan illeszkedik az adathalmazra (30. ábra). Ez esetben nem figyelhet meg a nagy terület kúpok esetében sem a viszonylag nagy szóródás, illetve az eltérés, azok átmér je is arányosan növekszik. A halmazból csak néhány kevésbé szabályos alakú kúp lóg ki, amelyeknek az elnyúlt tengelyükbe l adódóan, a nagy átmér jükhöz képest kisebb területtel rendelkeznek. A SFVF keleti területén lev néhány nagyobb átmér vel bíró közép pleisztocén kúp a terület lejtéséb l adódóan, a lejt irányába megnyúlva alakult ki, ez okozza az esetükben az átmér megnövekedését. A terület és a geometriai átmér közötti kapcsolat értelemszerűen nagyon erős korrelációt mutat, hiszen ezt az átmér t a területb l számítottam ki, épp ezért ezt nem is ábrázoltam, ahogy a kerület és a geometriai átmér kapcsolatánál sem teszem.



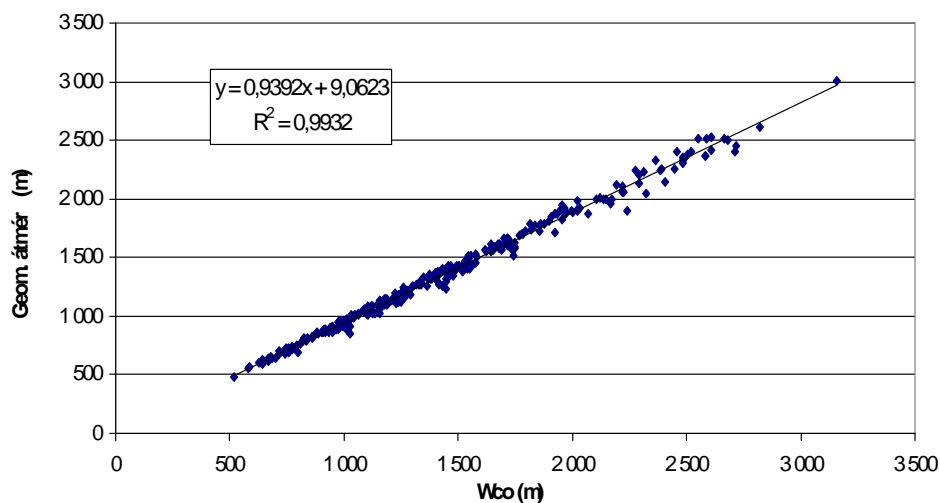
30. ábra: A kúpterület és a kúpátmér kapcsolata

Az egyik legmagasabb összefüggést a **kerület és a kúpátmér** viszonya adja. Ez a nagyon magas, egyenes arányú, 0,997-es korreláció a két változó között kortól független lineáris arányú kapcsolatot mutat (31. ábra). Csupán két salakkúp tér el ett l kiugróan az aránytól. E két kúpnak konkáv a kúpalakja, viszont mindkett geológiai térkép alapján lett körülhatárolva, tehát nem a pontatlanságból származik ez az eltérés. Az adathalmazra 0,99 determinációs együtthatóval bíró egyenes illeszthet. Ez az egyenes arányú kapcsolatot támasztja alá a két változó között, valamint azt, hogy e kapcsolat méret és kor független.



31. ábra: A kerület és a kúpátmér korrelációja

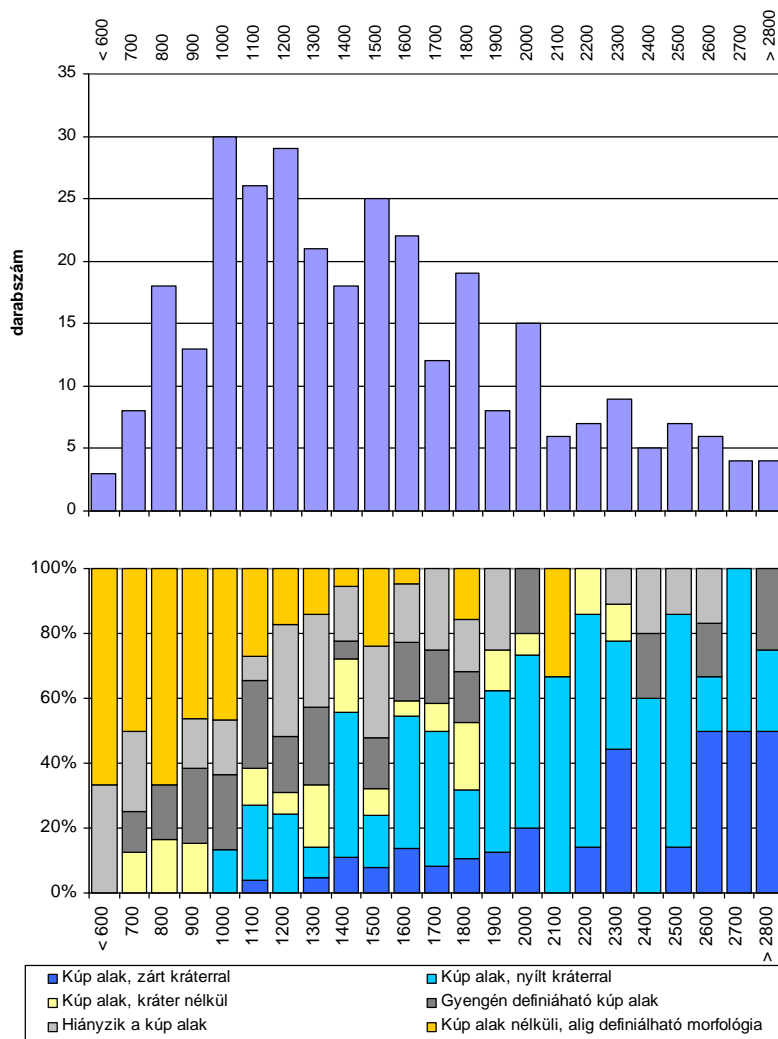
Az általam számított két átmérő, a salakkúpok egymásra merleges két tengelyének átlaga, valamint a területből származtatott átmérő közötti erős kapcsolatot, illetve különbségeket hivatott szemléltetni a következő ábra (32. ábra). Jól láthatóan a kisméretű kúpoknál szinte teljes az egyezés, köszönhetően annak, hogy a kisebb kúpok sokkal inkább kör alakhoz hasonlók. A különbség a közepes méretű szemben nézve, de még inkább a nagyméretű kúpok esetén jelentkezik, kb. 1500 méternél nagyobb átmérő esetén. Ha a kúpnak elnyúlt, ovális, vagy rendkívül felszabdalt a kúpalapja, azaz nagy a kerülete akkor az itt jól megmutatkozik a különbségekben.



32. ábra:

A salakkúpok átmérője és a geometriai átmérő közötti korrelációs kapcsolat

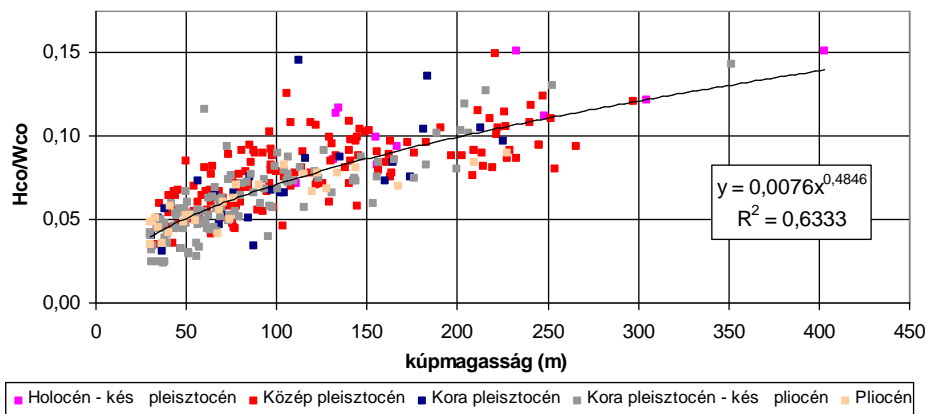
A kúpok átmérje közepesen korrelál az alaktani csoportokkal. Ez a fordított -0,656-os kapcsolat összefügg a területtel és a magassággal is, hiszen ahogy ott már említettem a nagyméretű kúpok, amelyek magasabbak és az átmérjük is nagyobb az átlagnál, sokkal épebb alaktani kategóriákba esnek, mint a többi kisebb méretű kúp (33. ábra). A SFVF salakkúpjainak legtöbbször 1000 és 1200 méter közötti átmérővel rendelkeznek, mely kategória nagyjából megegyezik a magasság gyakoriságoknál említett 65-85 méteres csoportnak. Az ilyen átmérőjű kúpok igen vegyes képet mutatnak az alakot illetően, azaz a zárt kráterrel rendelkező kúpoktól, a kúp alak nélküliek csoportjáig minden típus megtalálható közöttük.



33. ábra: A kúpátmérő gyakoriságok alaktani megoszlása (fent) és a gyakoriságok alak szerinti százalékos megoszlása (lent)

5.4. Kúpmagasság és kúpátmérő hányadosa (H_{co}/W_{co})

A kúpmagasság és H_{co}/W_{co} korrelációja (0,780) nagyon hasonlít a kúpmagasság és kúpátmérő kapcsolatához, azzal a különbséggel, hogy az adathalmazra legjobban a hatvány görbe illeszkedik, ($R^2 = 0,633$). A görbe felett található a fiatalabb salakkúpok, alatta pedig, a mértől függően, az idősebb kúpok (34. ábra), vagyis a fiatal magas kúpoknak az átlagnál nagyobb a H_{co}/W_{co} hányadosa. A görbe felett levő, leginkább kiugró kúpok, a lejtviszonyok által befolyásolt alappal rendelkező salakkúpok, azok, amelyek a San Francisco rétegvulkán, vagy egyéb nem salakkúp oldalában fekszenek, ezáltal relatív magasságuk az átlagnál nagyobb. A görbe alatt levő, az átlagtól nagymértékben eltérő kúpok pedig szinte alapjukig lepusztultak, vagy kifejezetten nagy területtel rendelkeznek. Ahogy a kúpmagasság vizsgálatánál említettem minden korcsoportban erős a magasságbeli változékonyság, ez okozza a két ábrázolt érték közötti nagy szórást.

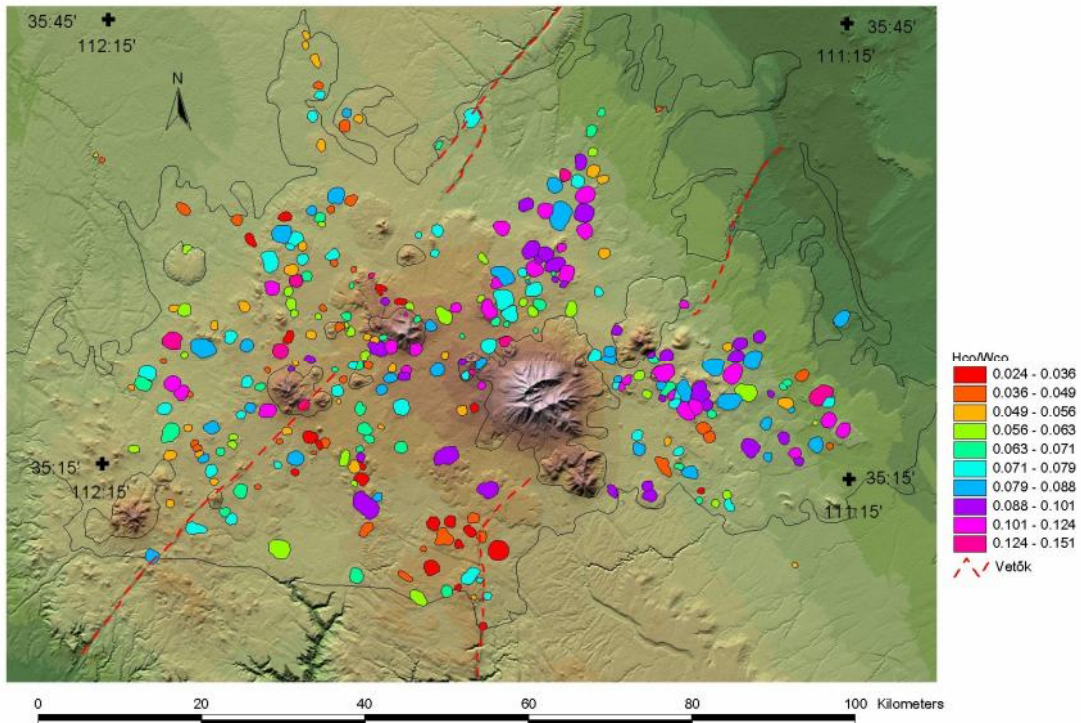


34. ábra: A kúpmagasság és a H_{co}/W_{co} arány közötti korrelációs kapcsolat

Wood úgy véli, hogy a H_{co}/W_{co} hányadosából nagyjából meghatározható a salakkúpok relatív kora ott is, ahol még nem készült részletes radiometrikus kormeghatározás. Természetesen ez a módszer csak viszonyított korokat adhat, azt is csak a szabályos, minden alakotlan rendellenességtől mentes kúpokra. Ez az általam vizsgált kúpok esetében a 3. táblázat adataiból kiolvasható, azonban én Wood-dal valamint Hooper és Sheidan-nel ellentétben a terület egészére vizsgáltam a magasság/átmérő viszonyokat, így a kapott értékek nem egészen egyeznek az általuk kiszámítottakkal. Ennek több oka is lehet. Az egyik fő ok, az eltérő számítási módszer, hiszen a k topográfiai térképeken kézzel számították a vizsgált paramétereket, míg én az SRTM adatait használom, amely pontosabb számítást tesz lehetővé. A másik figyelemreméltó különbség a vizsgált kúpok

számában van. Wood a SFVF területen közel 40, Hooper és Sheridan 237 darab salakkúpot vett számításba, míg én 316 kúpot vizsgáltam. Természetesen az általam megvizsgált kúpok sem fedik teljes mértékben le a terület képét, hiszen a meglévő kb. 600 darab kúpnak ez is csak az 52 százaléka, így a számított adataim sem adhatják a pontos értékeket, de véleményem szerint sokkal inkább ahhoz közeleiek, mint a 237 vagy akár 40 db kúp esetében kapott értékek. További különbség, hogy a k radiometrikus korokat használtak a kúpok korcsoportokba való osztásához, melyre nekem nem volt módom.

A H_{co}/W_{co} arány tulajdonképpen azt fejezi ki, hogy egy kúp mennyire meredek, vagy mennyire lapos. A magas H_{co}/W_{co} úgy jöhet létre, hogy vagy a kúpmagasság igen nagy, vagy az átmérő kicsi, azaz egy meredek kúppal állunk szemben, míg az alacsony H_{co}/W_{co} pont fordítva jöhet ki, ez esetben egy lapos kúpról lehet szó. Ez esetben tehát a nagy magasságú és területű kúpok nem lógnak ki a sorból, mint eddig szinte minden vizsgált érték esetében. A salakkúpok H_{co}/W_{co} arányai közötti területi összefüggés a 35. ábrán látható. A legszembetűnőbb jelenség, hogy a terület déli részén az Oak Creek Canyon közelében található kúpok rendre a legalacsonyabb értékkel bírnak, köszönhetően a magasságukhoz képest jóval nagyobb átmérőjüknek. Ezek mind pliocén ill. korá pleisztocén korú, idős lepusztult kúpok. A holocén kúpok szinte kivétel nélkül 0,10 H_{co}/W_{co} érték feletti kategóriákba tartoznak, legtöbbjük a terület keleti, északkeleti részében található. A neon zöld és a világos narancs színt képviselve, szinte külön kategóriát alkotva jelennek meg az ábrán a kis- és közepes méretű elnyúlt kúpok.



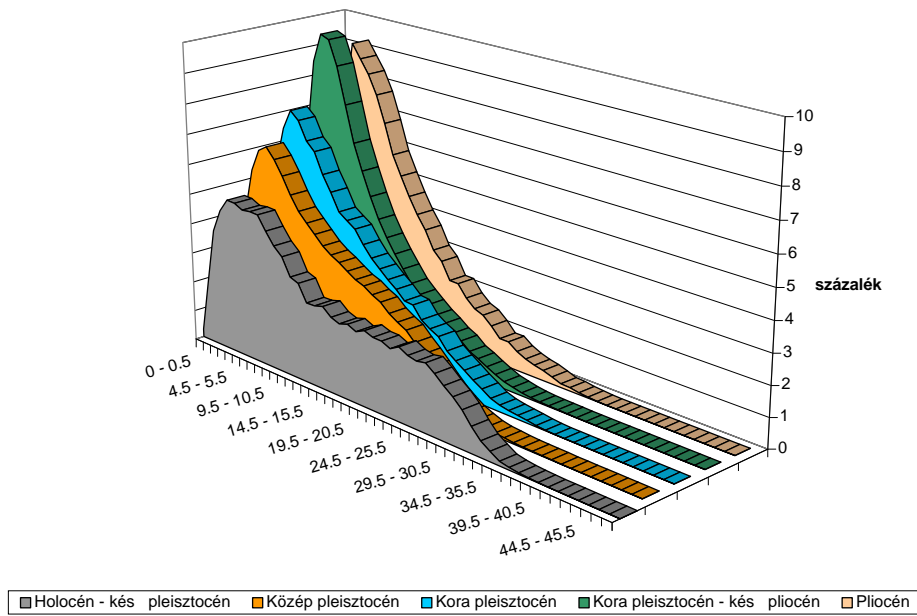
35. ábra: A San Francisco vulkáni terület kúpmagasság és kúpátmérő aránya
A legkisebb értékkel terület déli részén az Oak Creek Canyon körül i pliocén kúpok, míg a legnagyobb értékkel a terület északkeleti, keleti részében található holocén kúpok rendelkeznek.

5.5. A lejt szög korrelációi

A lejt szög változása úgy következik be, hogy a különböző eróziós folyamatok a salakot a kúp felső részén, törmelékletet építve a kúp lábához, vagy a kráter belsejébe szállítják. Ez az eróziós fejlődés az idővel fokozatos csökkenést eredményez mind az átlagos, mind a maximális és az elméleti lejt szög változásában is, ezáltal még nagyobb törmelékletet és valamint laposabb oldala lesz a salakkúpoknak. A kúpok lejt szögének változását vizsgálva Wood (1980b) megállapította, hogy azok alapján is lehet hozzávetőleges korokat megadni szabályos alakú kúpokra, a következő értékeket határozta meg ezt meg:

Merriam korúak (0,05 m.y.)	30,8° +/- 3,9°
Tappan korúak (0,2 - 0,7 m.y.)	23,1° +/- 2,0°
Idősebb korúak	14,1° +/- 4,2°

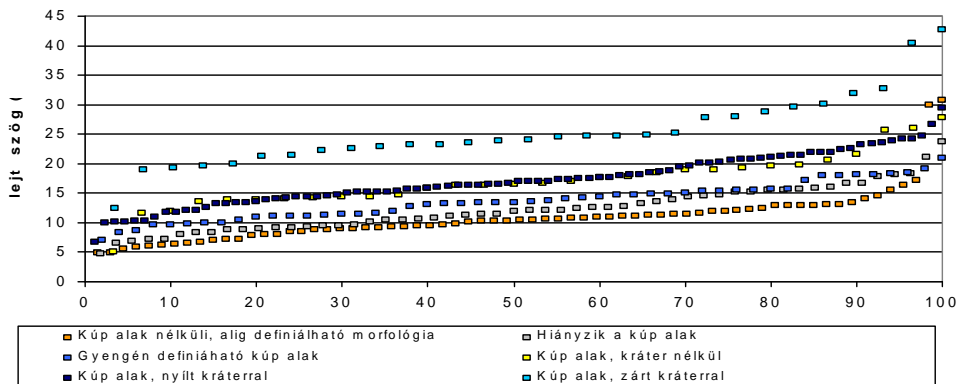
A 36. ábra szemlélteti az egyes korcsoportok lejt szög hisztogramjait, mely segítségével a következő megállapításokat tehetjük. Megfigyelhet a görbék csúcsának egyre kisebb lejt szög értékekhez való hátrálása az id vel, vagyis a kúpok egyre lepusztultabbak, laposabbak lesznek, törmelékszoknyájuk egyre kiterjedtebbé válik. Ez csökkenés a pliocén kúpok esetében kicsit megváltozik, köszönhetően néhány nagyméretű id s kúpoknak. A görbék lefutásai is egyre meredekebbek lesznek a korokkal, mely jelenség szintén az ellaposodás következménye. A közép-pleisztocén, de még inkább a holocén kúpoknál figyelhet meg a nagyobb meredekség értékek közel azonos százaléka. Ez úgy következhet csak be, ha a nagyobb meredekségek egyre nagyobb területeket is fednek le. Vagyis pl. a 20 fokos lejt szög oldal arányaiban nagyobb területet foglal el egy holocén kúp lejt jén, mint egy 15 fokos. Ez egészen kb. 30 fokig így van, ami felett a salak állékonysága rohamosan lecsökken, ezért ennél meredekebb lejt szöggel csak kis mértékben rendelkeznek a holocén salakkúpok. Érdekes továbbá, hogy míg az összes korcsoport görbéje hegyes csúcsban végződik, a holocén görbére ez nem mondható el. A legfiatalabb kúpok esetében a görbének tulajdonképpen nincs jellegzetes csúcsa. Azaz nagyjából 5 és 10 fok között tet zik a holocén kúpok lejt szöge. Ez a „levágott” csúcs egyértelműen a zárt, ill. nyílt kráterek miatt jelenik meg, hiszen a kráterek alja meglehetősen lapos, ez jelenik meg 5-10 foknál. A pliocén, kora-pleisztocén, de leginkább a holocén kúpok lejt szög-görbéje meglehetősen töredezett a közép-pleisztocén görbéhez képest. Ez a jelenség a quantálási hiba miatt adódott, hiszen a holocén korcsoportba csupán 11 kúp tartozik, a közép-pleisztocéni 140-hez képest.



36. ábra: A lejt szög korcsoportonkénti százalékos megoszlása.

A holocén görbén megfigyelhet a maximális lejt szögek kimagasló értéke, valamint az 5 - 10 fok közötti lapos csúcs, amely a kráterek tekn je miatt jöhetett létre. Az id sebb kúpok esetében a kiterjedt törmelékszkonya okozza a kis lejt szögek ki magasló arányát.

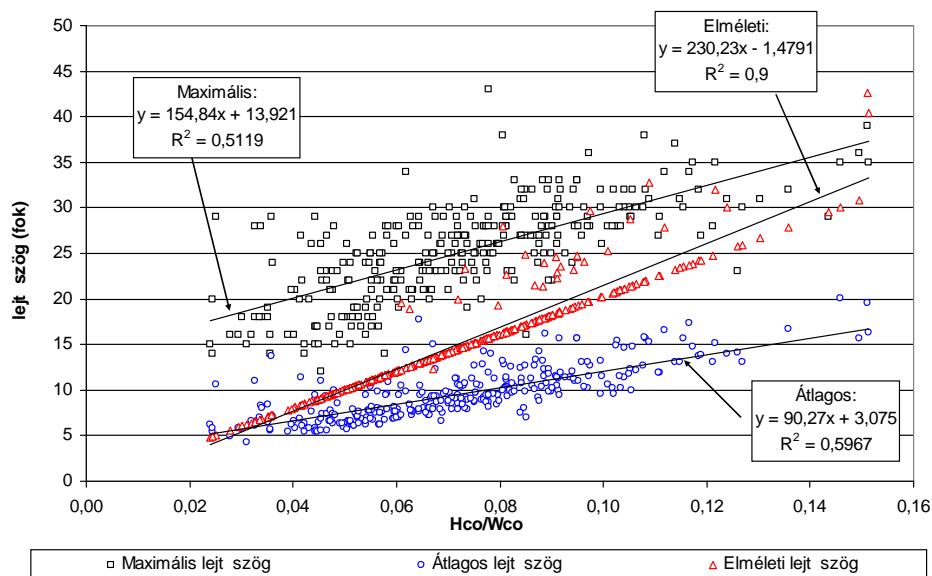
Az elméleti lejt meredekség és az alaktani kategóriák kapcsolata $-0,6368$ -as korrelációt mutat. Ez a negatív érték azt jelenti, hogy az alacsony lejt szöggel rendelkező kúpok magasabb számú alaktani csoportba tartoznak, vagyis annál lepusztultabb képet mutatnak, minél kisebb a lejt szög értékük. Ez a közepesen erős korreláció azt sugallja, hogy sok kúp alakja nem ezt az elvet követi. A salakkúpok között alig található 5 foknál kisebb lejtés t, a maximum pedig $42,66^\circ$ -os. A kúpok elméleti lejt szögének szórása az ép kúpok esetében a legnagyobb, a zárt kráter eknél $5,61$, a nyílt kráter eknél $4,26$. A zárt kráterrel bíró kúpok közül a két legmeredekebb, a Merriam és az SP Crater nagymértékben eltér a többit l (36. ábra).



37. ábra: Egyes alaktani kategóriák elméleti lejt szög viszonyai

Ugyanígy a leglepesztultabb kategóriában is van két, a többit jelent sen eltér , 30 fok lejt meredekség kúp, azonban ezek közül az egyik a Kendrick Peak, a másik a San Francisco vulkán oldalában fekszik. A 37. ábra továbbá azt is szemlélteti, hogy az általam kreált nyílt kráterrel rendelkező kúpok, és a kráter nélküli kúpok csoportja az elméleti lejt szög tekintetében alig mutat eltérést. A többi kategória jól elkülöníthetően válik el a másiktól, ez alól csak a gyengén definiálható kúp alak és a kúp alak nélküliek csoportja alkot kivételt, amelyek a 15 fokos lejt nély igen nehezen különíthetők el egymástól. Ez tehát arra enged következtetni, hogy az alaktani kategória csoportosítás az elméleti lejt szög értékek alapján nem pontosan megoldható.

Az **elméleti lejt szög** értékeket a **H_{co}/W_{co} értékekkel** korreláltatva válik nyilvánvalóvá, hogy ez a lejt szög nem megfelelő a pontos vizsgálatra, ezért számítottam ki a másik két lejt szög értéket is, a maximális és az átlagos lejt szögeket. Ezek az értékek a korábbi mutatókkal nagyon hasonló módon korreláltak ezért nem tüntettem fel őket külön-külön. A H_{co}/W_{co} -val való összefüggés vizsgálatához azonban elengedhetetlen mindhárom lejt szög érték elemzése. Az elméleti lejt szög értékeit a H_{co}/W_{co} értékekből nyertem a módszereknél leírt képletek segítségével (1 és 2). A kráterrel nem rendelkező kúpok, ahogy 38. ábrán látható, egyenes mentén rendeződtek (2). A kráterrel rendelkező kúpok meredeksége eltértektől az egyenestől, hiszen azok elméleti lejt szög értékét egy másik képlettel (1) számítottam ki.

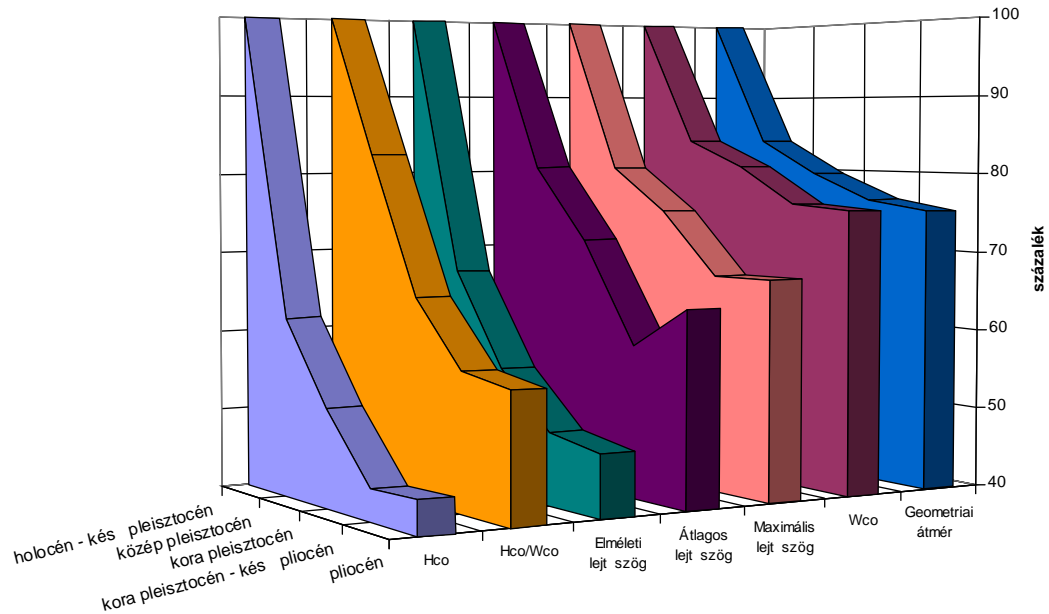


38. ábra: A maximális, az átlagos és az elméleti lejt szög összehasonlítása a H_{co}/W_{co} arány összefüggésében

A maximális lejt szög meghatározását korábban légi vagy földi fényképek alapján végezték (RAY, 1960), vagy topográfiai térképek szintvonalainak s r sége alapján. A maximális és az átlagos lejt szög igen nagy eltérést ad az elméletihez képest. A maximális, ahogy a neve mutatja a lehet legnagyobb lejt szög értéket adja minden e gyek kúpra, ellenben az átlagos lejt szög értékeiben pedig a kúpok relatíve nagy törmelékszoknyája jelent s szerepet kap, míg a meredek oldalai kevésbé. Ezek miatt tehát a H_{co}/W_{co} értékekkel összefüggésben a három lejt szög érték a 38. ábrán látható módon alakul. A természetesen az elméleti lejt szög értéke a legmagasabb három korrelációt tekintve, azonban azt a fent leírtak miatt nem veszem figyelembe, hanem az átlagos lejt szöggel való korrelációs kapcsolatot elemzem. Az átlagos lejt szög és a H_{co}/W_{co} arány közti kapcsolat 0,772-es korrelációt mutat, vagyis közepesen er s kapcsolat áll fenn a meredekség és a kúpmagasság/kúpátmér hányados között. A kúpok jelent s része 10 foknál kisebb átlagos lejt szöggel rendelkezik, ezzel együtt 0,08 -nál kisebb H_{co}/W_{co} -val. Kiugró értékek végig megjelennek az egyenes mentén. Ezek az eltérések általában a lávadómok oldalában fekv , emiatt kis H_{co}/W_{co} arány mellett nagy lejt szöggel rendelkező kúpok.

Figyelembe véve, hogy a fiatal kúpoknak általában 30 fok körüli elméleti lejt szöge van, a kapott eredmények azt mutatják, hogy eleinte viszonylag gyors a csökkenés a lejt szög tekintetében, majd az erózió fokozatosan lelassul. Az Etnán lev salakkúpok lejt szög és a térfogat összefüggéséb l is kiderül, hogy a nagyobb kúpok ($> 15 * 10^6 m^3$) meredekebb lejt vel ($>25^\circ$) jellemezhet k, míg a kisebb kúpoknak sokkal változatosabb a lejt szögük (FAVALLI el al., 2007). Az id el rehaladtával a morfológiai paraméterek közül a H_{co}/W_{co} hányados, valamint az elméleti lejt meredekség szórása enyhén csökken. Ez azt a megállapítást sugallja, hogy minél id sebb egy kúp, annál egyenletesebb az alakja. Ezzel szemben a maximális lejt szög korcsoportonkénti változékonyságának növekedése arra a következtetésre utal, hogy néhány kúpnak id s korára is megmarad legalább az egyik meredek oldala. Ez a tendencia valószínűleg egy nem teljesen szimmetrikus korai kúpforma, vagy egy a kúptól elüt piroklaszt anyag jelenlétének megnyilvánulása lehet (pl.: ellenálló agglutinát). Az erózió lassulása minden kiszámított morfológiai paraméter esetében megfigyelhet (39. ábra). Az eróziós folyamatok sokkal könnyebben végbemennek meredek térszíneken, azonban amint számításomból is kiderül a pliocén

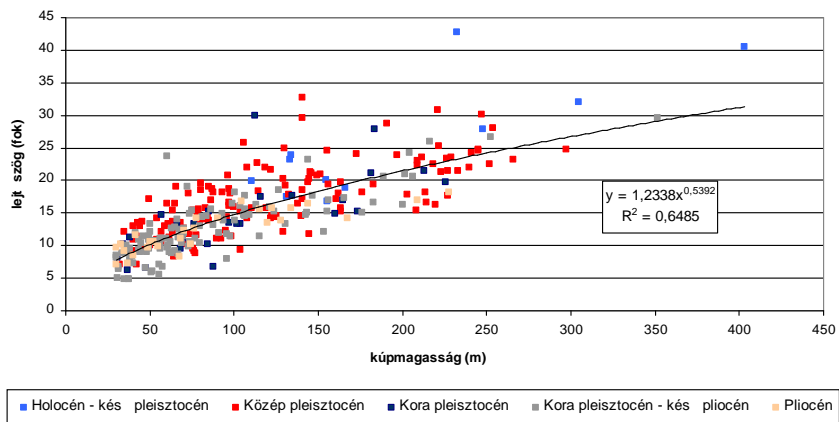
kúpok meredeksége szinte a holocén társaik felére csökken, ezáltal a salak állékonysága, stabilitása.



39. ábra: A morfolometriai paraméterek korcsoportonkénti változása.
(A holocénbeli állapotokat 100 %-nak véve)

Az átlagos lejt szög esetében néhány igen nagyméretű pliocén kúp fordítja vissza a csökkenés tendenciáját.

Az **elméleti lejt szög és a kúpmagasság** 0,794-es közepesen erős korrelációja azt a megállapítást támasztja alá, hogy a magasabb kúpok egyben meredekebbek is. Ez legtöbb esetben így is van, azonban sok kivételt von maga után ez az összefüggés. A 0,648 determinációs együtthatóval illeszkedő hatvány-görbe alatt az átlagnál nagyobb törmelékszoknyával rendelkező kúpok állnak, melyeknek tehát enyhébb a lejt szögük (40. ábra). A görbe feletti azonban változatosabb képet mutatnak: vagy fiatal koruk miatt rendelkeznek kiugró magassággal, vagy összesen nézve, egymásba nem, vagy nagyobb lávadómok oldalában található kúpokról van szó. A legnagyobb szórás a legfiatalabb kúpok esetében figyelhető meg, melyek szinte teljes egészében a görbe felett találhatók.

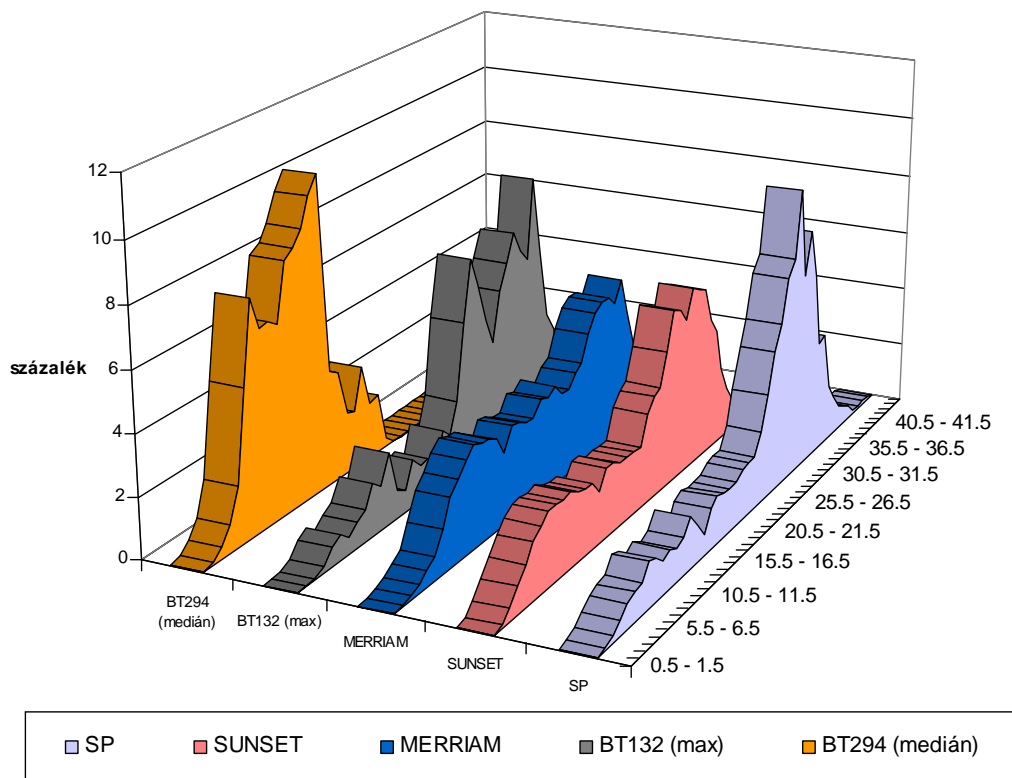


40. ábra: A kúpmagasság és az elméleti lejt szög összefüggése

A domborzatmodell alapján megvizsgáltam egy-egy érdekesnek t n salakkúp lejt histogramját. El ször a meredek oldalakkal rendelkező, épp ezért fiatal, holocén kúpokat histogramjait elemzem (41. ábra). Ezek az SP-, a Sunset-, a Merriam Crater, valamint a legnagyobb lejt szög értékkel rendelkező BT132 jelű, és a lejt szög értékek középértékét mutató BT294 jelű kúp, melyek keresztmetszései a mellékletben megtalálhatóak. A nagy lejt meredekséggel rendelkező kúpok histogramjának vizsgálata mellett érdemes megemlíteni, hogy a kráterek belső oldalának meredeksége, mely legtöbbször a kúp oldalánál is nagyobb lejt szöggel bír, kiugró értékeket mutat a histogramon. Vagyis ez okozza, szinte minden kráterrel rendelkező kúp histogramjában a legnagyobb lejt szög értékeket.

A 232 méter magas holocén-kés pleisztocén (0-0,16 m.y.) korú SP Crater, a tipikus salakkúp képét mutatja a lejt szögét tekintve is. A H_{co}/W_{co} hányados (0,15) értékéből is rögtön kitűnik, hogy egy igen meredek kúppal állunk szemben. Ezt támasztja alá a maximális lejt szög értéke, amely 39 fokot ér el, de az átlagos lejt szöge is 20 fokos. Az enyhe meredekségű lejt igen kis aránya, valamint a 25-35 fok közötti lejt szögek 8-10 százalékos aránya teszik jellegzetesen szabályos és szimmetrikus kúpformájúvá az SP Cratert. A 304 méter magas Sunset és a 402 méter magas Merriam Crater histogramja nagyon hasonló képet mutat. A mellékletben szereplő második és harmadik ábra is a keresztmetszvényük hasonlóságát mutatja. A Merriam Crater utolsó kitörésekor azonban északkeleti lejtjét maga alá temette, ez által „féloldalas” kúppá alakult. Ez a lejt szög histogramon is kivehető, hiszen a Sunset Craterrel ellentétben, neki nagyobb arányban van enyhe meredekségű oldala. Mindkét kúpnak 35 fokos a maximális lejt szöge, míg az

átlagos 15 és 16 fokos a Merriam Crater javára, ugyanis hiába lankás az északkeleti oldala, a déli kifejezetten meredek. A kráterük átmér je, mélysége, de még a kráterperem asszimetriája is nagyon hasonlóan alakul mindkét kúp esetében. A BT132 jel kúp, amely a legnagyobb lejt szöggel rendelkezik, tulajdonképpen kilóg a többi, itt ábrázolt kúp közül. Ez a 112 méter magas, 770 méter széles kúp 20 fokos (legnagyobb) átlagos és 35 fok maximális lejt szöggel rendelkezik, amely azonban nem magának a kúpformának köszönhet , ahogy ez a többit l teljesen eltér hisztogramjából ki is derül, hanem annak, hogy az 1,4-2,7 m.y. éves Kendrick Peak lávadóm oldalában fekszik, ezáltal szinte alig van enyhe lejtés oldala.

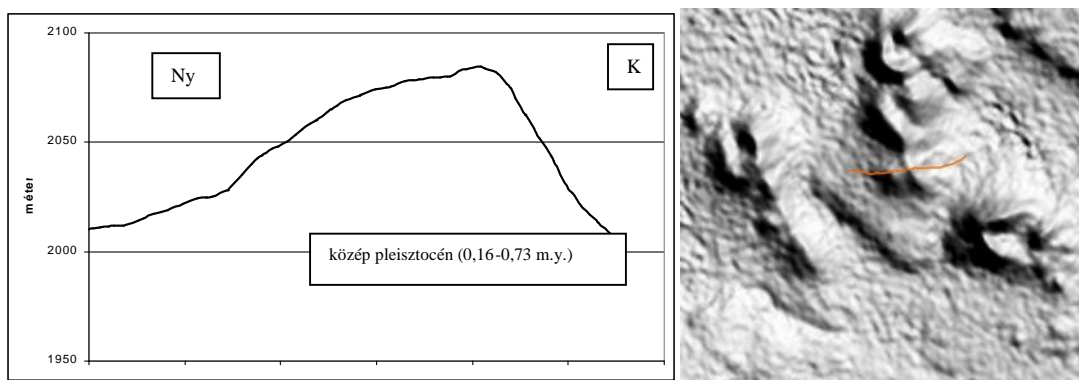


41. ábra: Néhány meredek salakkúp lejt szög viszonyai százalékban.

Az SP, a Sunset és a Merriam tipikus salakkúp hisztogrammal rendelkezik. A BT132 lávadóm oldalában fekv legnagyobb lejt szög átlaggal bíró kúp, míg a BT294 a salakkúpok középértékét viseli magán.

A lejt szög gyakorisági görbéjén a 15 foknál kisebb meredekségek szinte kizárólag a kúp déli oldalához köthet ek, míg a meredek északi oldala végig 15 foknál nagyobb lejt szögeket mutat. A kúp krátere rég lepusztult, hiszen kora pleisztocén (0,73-2,0 m.y.) korú, vagyis igen lepusztult képet mutat, ahogy ezt a hatos (kúp alak nélküli alig

definiálható morfológia) alaktani kategóriába tartozása is mutatja. A 316 salakkúp lejt szögeinek középértékét a BT294 jel kúp képviseli. A közép pleisztocén (0,16-0,73 m.y.) korú kúp gyengén definiálható kúpalkalakkal rendelkezik. A kúp csupán 70 méter magas, átmérje több mint 1 km, vagyis meglehetősen ellaposodott kúpról van szó, melynek H_{co}/W_{co} értéke 0,066. Keresztszelvényén látható (42. ábra), hogy a nyugati oldala meglehetősen lankás és a keleti sem kifejezetten meredek, így jöhet létre a lejt szög görbén az 5-15 fokos intervallumban látható csúcs. Az átlagos lejt meredeksége csupán 9,27 fokos, míg a maximális lejt szöge 21 fok. A domborzatárnyékoltságon ilyen felbontás mellett is kivehető a kúp vízfolyások által feldarabolt kúplába, valamint a keresztszelvényen a széles törmelékcsoknyójának képe.



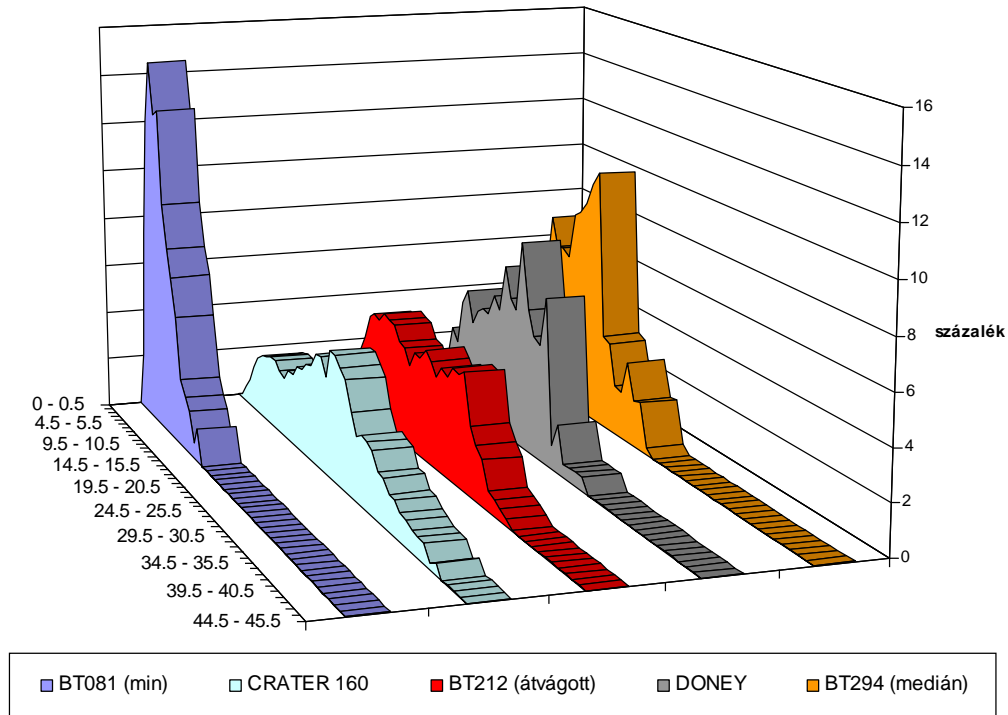
42. ábra: A kúpok átlagos lejt szög értékeinek középértékével bíró, BT294 jel kúp nyugati-keleti irányú keresztszelvénye és domborzatárnyékoltságon készült képe.

(jól kivehető a kúp féloldalas jellege)

A kevésbé meredek kúpok lejt szög histogramjában néhány egyedi kúpot vizsgáltam, melyek vagy a méretük miatt, vagy a törés és által kettészelt ill. törésárokban levő miatt lehet érdekes. A Crater 160, a Doney Crater, a BT212 és a BT081 jel kúpok tartoznak ehhez a vizsgálathoz (43. ábra).

A BT294, melyet az előző bekezdésben már taglaltam, csupán összehasonlítási alapként szerepel az ábrán. A BT081 jel kúp rendelkezik a legkisebb lejt szöggel az összes általam vizsgált SFVF kúpjai közül. A mindössze 36 méteres magassága és 1200 méter széles átmérje az egyik legalacsonyabb H_{co}/W_{co} hányadost eredményezi (0,0310). A 15 fokos maximális lejt szöge mellett, alig 5 fokos az átlagos lejt szöge, amelyet a mellékletben a 6. ábra ill. keresztszelvénye is jól mutat. Ez a kis szimmetrikus halom, mely

az Oak Creek Canyon közelében fekszik, s melynek alakja alig definiálható kúpa lakként, kora pleisztocén (0,73-2,0 m.y.) korú. Az 5 fok körüli enyhe lejt szög értékek jellemzik leginkább ahonnan hisztogramja szinte teljesen egyenesként csökken a nagyobb lejt szögek irányába. A közép pleisztocén (0,16-0,73 m.y.) korú, hatalmas területe, kráterátmérője, valamint 325 méter mély krátere miatt sokat emlegetett Crater 160 átlagos meredeksége 13,19 fok, viszont a maximális meredeksége 38 fok. A mellékletben a 7. ábra mutatja a kúp aszimmetrikus formáját, mely nem csak a kráterperem magasságában, hanem a kúp oldalainak lejt szögében is megfigyelhető, hiszen az északnyugati oldal sokkal enyhébb lejtéssel bír, mint a délkeleti. A Mesa Butte vetél szabályosan kettévágott BT212 jelű kúp lejt szög-gyakorisági görbéje az eddigiekkel eltérő képet mutat. A hisztogramon közel azonos, relatíve magas százalékos arányban vannak jelen a 10 és 30 fok közötti lejt szög értékek, ebből következően a kúp oldalai igen szabályos képet mutatnak. A kúp 173 méteres magassága, és kora pleisztocén (0,73-2,0 m.y.) kora, valamint 12,75 fokos átlagos és 31 fokos maximális lejt szöge kiemeli környezetéből, hiszen már jócskán a terület északi határánál helyezkedik el, ahol csupán 50 méter magasságú kúpok jellemzők. Keresztmetszete (*melléklet, 8. ábra*) alig tér el a holocén kúpokétól, csak oldalainak meredeksége enyhébb. Délkeleti oldalában levő nagy kiterjedésű lávamező enyhe lejtése is befolyásolta a kapott lejt szög értékeket, ez okozhatja a kisebb meredekségek valamivel nagyobb arányát. Az utolsó külön vizsgált elnyúlt alakú kúp a Doney Crater, amely a Doney vetél mentén alakult ki, a közép pleisztocén (0,16-0,73 m.y.) folyamán. A mindössze 70 méter magas kúp közvetlenül a vetél mentén jött létre, félig abban épült fel. Ez a jelenség adja az aszimmetrikus lejtű kúp alakját, melyeknek átlagos lejt szöge 11,11 fok, a maximális pedig 28 fok. Hisztogramja nagy különbségeket mutat, főleg a 20 fokos lejt szög körüli értékek esetén, melyek a délkeleti lejtéssel jellemzők. A nagyobb meredekségek kis arányúak szintén ebből az asszimetriából adódik, hiszen a meredek északnyugati oldala jóval rövidebb, mint az enyhe délkeleti.

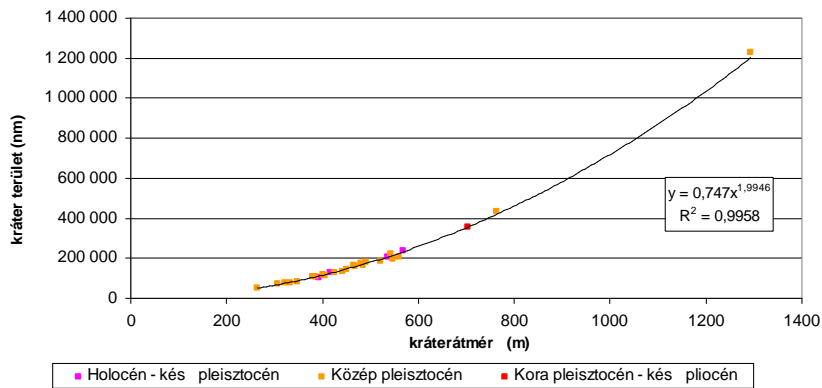


43. ábra: Néhány kevésbé meredek salakkúp lejt szög viszonyai .

A legkisebb lejt szöggel bíró BT081 meredeken csökken gyakoriság -görbéje jellemzi a legid sebb, vagy a lelepusztultabb kúpokat, míg a vet k mentén lev kúpok hisztogramja a BT212, vagy a Doney Crater görbéjére hasonlítanak.

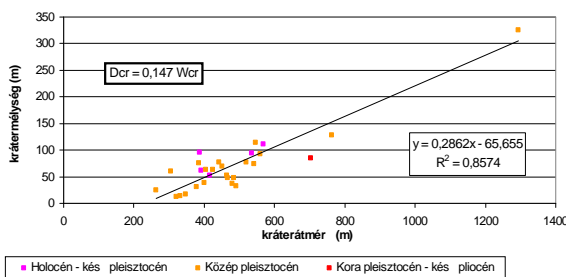
5.6. A kráterrel rendelkező kúpok korrelációi

A zárt kráterrel rendelkező salakkúpok többnyire a terület keleti felén helyezkednek el, csupán négy található a San Francisco rétegvulkántól nyugatra. A **kráterátmérő és a kráterterület** 0,970-es korrelációja nagyon szoros, egyértelmű összefüggést mutat a két változó között. Az adatokra illesztett hatvány-görbe determinációs együtthatója 0,995, vagyis a kráterek esetében a terület négyzetesen változik az átmérő növekedésével, ráadásul a koroktól is függetlenül (44. ábra). A legfiatalabb, holocén - és pleisztocénben 5, a közép pleisztocénben 23, míg a kora pleisztocén - és pliocén korcsoportban csupán 1 salakkúpnak van zárt krátere, viszont mindegyik korcsoport kúpjaira megfeleltethető a hatvány szerinti növekedés.

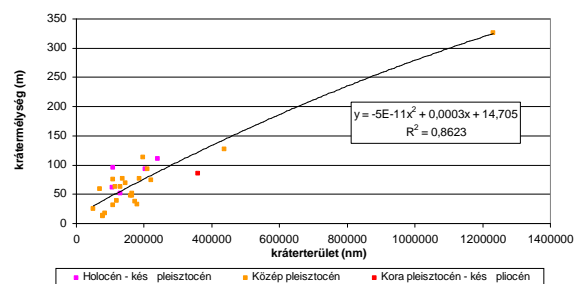


44. ábra: A kráterátmér és a kráterterület közti korreláció

A legnagyobb értékkel a már többször emlegetett Crater 160 rendelkezik, és ez minden további kráter-korrelációs kapcsolatra is igaz, ahogy a **krátermélység és a kráterátmér**, valamint a **krátermélység és a kráterterület** (45. ábra) összefüggések esetében is. Az előbbi 0,912, míg az utóbbi 0,922-es korrelációval rendelkezik, másodfokú polinom görbe 0,857 és 0,862 determinációs együtthatójával. A két összefüggés tulajdonképpen a kráterátmér és a kráterterület összefüggéséből egyenesen következik, hiszen a lepusztulás következtében a kráter szélesedik, azaz az átmérője, a területe és mindeközben a kráter mélyül is egészen addig, míg egy időszerű vízfolyás át nem vágja a kráterperemet, hiszen onnantól kezdve egész máshogy fejlődik tovább a kráter. A krátermélység és a kráterátmérő hányadosa Hooper és Sheridan (1998) szerint idővel fokozatosan csökken és nagyjából 1,25 millió éves korukra veszítik el kráterüket. Ezt a megállapítást a 22. ábra elemzése esetén a kora pleisztocén korcsoportra már én is megtettem. A zárt kráterrel rendelkező kúpok krátere egy-két kivételt eltekintve 100 méternél sekélyebb. Minél nagyobb egy kráter átmérője, annál mélyebb is az. A krátermélység, a kráterátmérő 0,147-szereseként írható le.



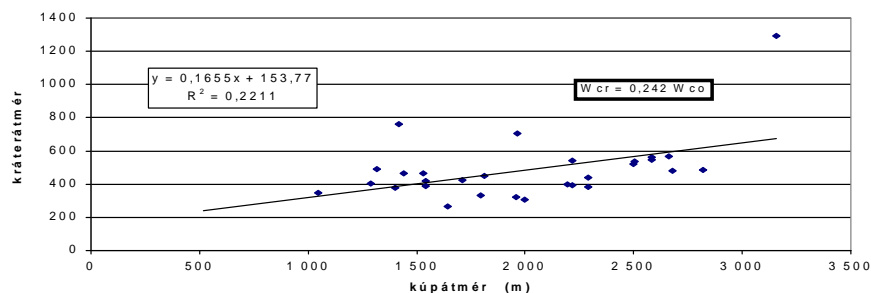
A kráterátmér és a krátermélység kapcsolata



A krátermélység és a kráterterület összefüggése

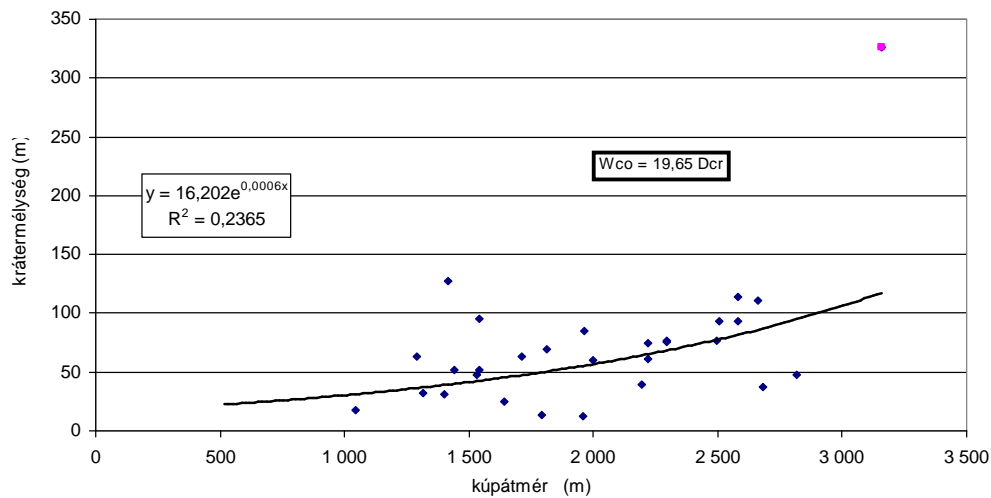
45. ábra

A H_{co}/W_{co} aránnyal ellentétben Wood úgy véli, a **kráterátmér /kúpátmér hányadosa** független az időtől, hiszen a kráter növekedése lépést tart a kúp körüli törmelékjeit szélesedésével (Wood, 1980b). Azaz elmondható, hogy a kúpok átmérőjének növekedésével együtt, a kráterek átmérője is növekszik. Ellentétben a kúpmagasság időbeli csökkenésével a kráterátmérő és a kúpátmérő aránya tehát (W_{cr}/W_{co}) számottevően nem változik a holocén és a közép-pleisztocén korú kúpok között. Vagyis megállapítható, hogy a W_{cr}/W_{co} hányados számos salakkúpot vizsgálva egy viszonylag állandó érték különböző korokra és lepusztulási állapotokra nézve. Wood megállapítja továbbá, hogy ez a viszonylag állandó arány a SFVF változatos anyagú (úgy mint: bazalt, bazalt-andezit) kúpjai esetében sem változik jelentősen, épp ezért a lepusztulás tekintetében ezt a legkevésbé fontos morfológiai paraméternek tekinti (WOOD, 1980b). Meg kell továbbá jegyezni, hogy a SFVF és a hozzá hasonló vulkáni területek bizonyítják, hogy a kráterek általában törmelékkel kitöltődnek, vagy rövid idő alatt lepusztulnak és emiatt válnak bizonytalan tényezővé, emiatt nem alkalmasak tökéletes morfológiai vizsgálatokra (Hooper és Sheridan, 1998). A kúpátmérő és a kráterátmérő 0,47-es korrelációs kapcsolatát ábrázolva (46. ábra), gyengén illeszkedő ($R^2=0,221$) egyenest tudunk csak a pontokra helyezni. Az átlagtól merőben eltérő értékeket mutatnak a kráterek, természetesen a Crater 160-nál az élen. A pontokra illesztett egyenes felett azok a kúpok találhatóak, melyek kráterei az átlaghoz képest jóval szélesebbek, kúpátmérőjük alapján sokkal kisebbnek várnánk azokat. Az egyenes alatt viszont pont fordítva, azok a kúpok találhatóak, melyek kúpátmérője szélesebb a kráterátmérőjükhöz képest. Az előbbi eset jóval szembeesőbb a terület kúpjai között, elég csak a Crater 160-ra gondolnunk. A két érték között, 24-szeres a különbség, más szóval a kráterátmérő a kúpátmérő 0,242-szerese, az átlagot tekintve. Ez jóval kisebb, mint amit Porter (1972) mért a Hawaii kúpokon ($W_{cr} = 0,40W_{co}$), vagyis a SFVF kráterrel rendelkező kúpjai kisebb kráterátmérővel, ill. szélesebb kúpalappal, törmelékcsoknyával rendelkeznek, mint a Mauna Kea vulkán salakkúpjai.



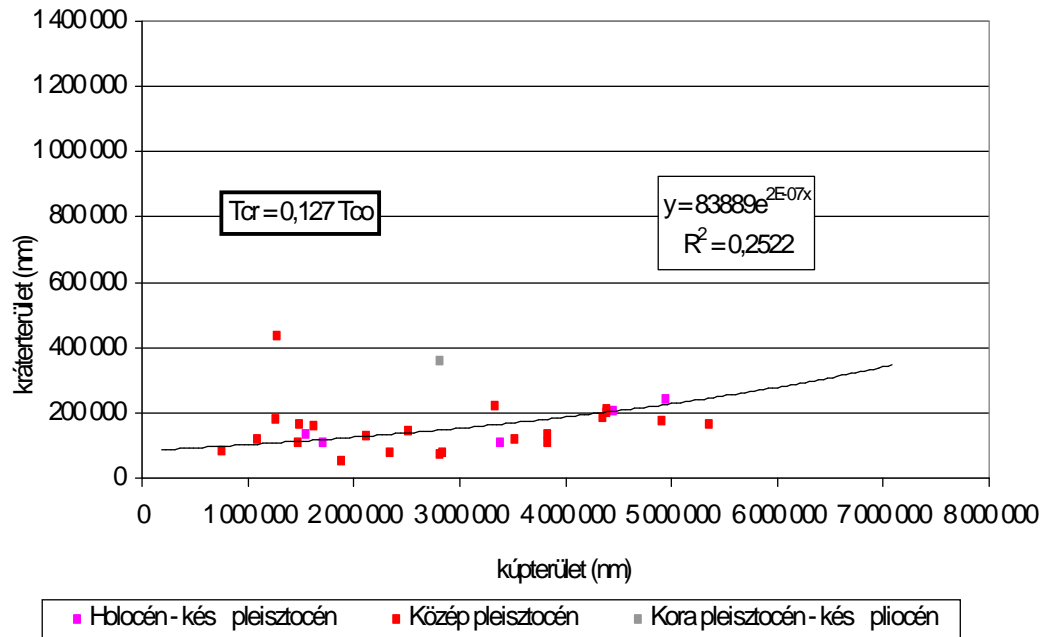
46. ábra: A kúpátmérő és a kráterátmérő korrelációja

A **kúpátmérő és a krátermélység** közepesen erős (korrel=0,519) összefüggése igen hasonló eredményt ad, mint a kúpátmérő és a kráterátmérő kapcsolata adott. A pontokra exponenciális görbét illesztve, 0,236-os determinációs együtthatót kapunk. A 47. ábra vizsgálata során kihagytam az elemzésből a legmélyebb Crater 160-t, amely nagyon erősen befolyásolta volna a görbét, hiszen ez esetben a kiugró értékeket a mély kráterek adják amilyen a Sunset Crater-t is északkeletre található, név nélküli kúp is. A görbe alatt levő kúpok a nagy kúpátmérőjükhöz képest igen kis krátermélységgel rendelkeznek, melynek oka a kráterfalak beomlása, a kráter feltöltődése lehet. A kúpátmérő értékéből a krátermélységet is hozzávetőlegesen meg lehet határozni, hiszen $W_{co} = 19,65 \cdot D_{cr}$.



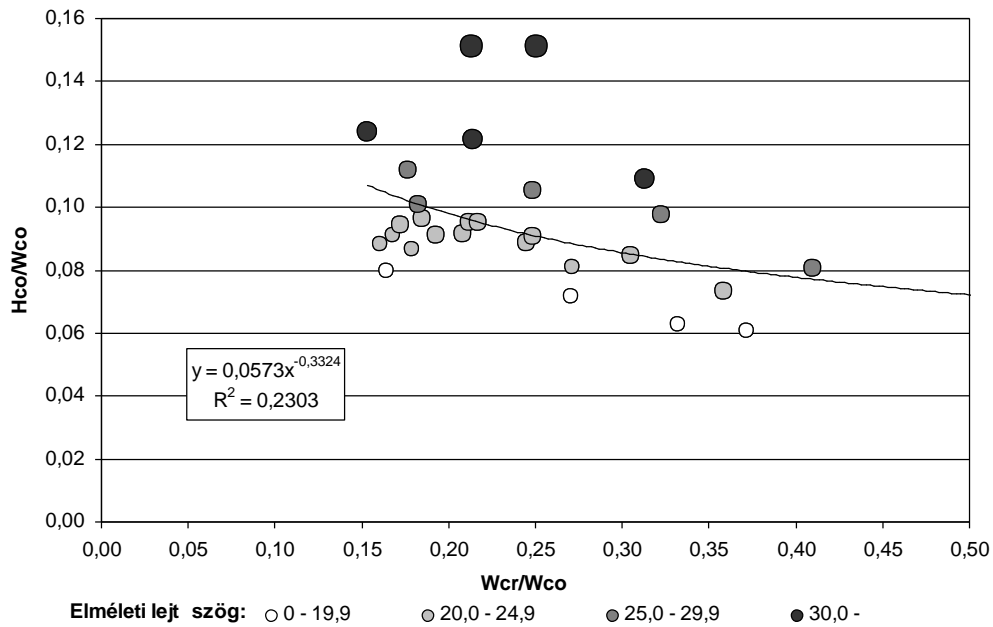
47. ábra: A kúpátmérő és a krátermélység összefüggése
(a Crater 160 külön jelölve)

A **kúpterület** növekedésével lépést tart **kráterterület** is, vagyis az erózió folyamán a kráter kiszélesedésével együtt a kúp törmelékszoknyája, azaz a kúp területe is növekszik, hiszen minél nagyobb egy kúp területe, annál nagyobb a kráter területe is. A kúpterületet meg lehet határozni a kráterterület értékéből, hiszen $T_{cr} = 0,127 T_{co}$. A két változó között közepesen erős (0,515) korreláció áll fenn (48. ábra). E vizsgálatból is kivontam a Crater 160-t, hiszen hatalmas területével erősen elnyomná a pontokra illesztett exponenciális görbét, mely anélkül is csupán 0,252 R^2 -tel illeszkedik a pontokra. A görbétől eltérő kúpok kráterterülete jóval nagyobb, mint az átlag, és ezek a görbe felett találhatók. A görbe alatt levő kúpok sokkal kisebb eltérést mutatnak, vagyis az, hogy az adott kúpterülethez kisebb kráter tartozik, mint az átlag, ez kevésbé jellemző a SFVF kúpjaira.



48. ábra: A kúpterület és a kráterterület kapcsolata (a Crater 160 nélkül)

A következő összetett ábrán a SFVF összes zárt kráterrel rendelkező kúp morfológiai adatait feltüntettem (49. ábra). Az ábra azt a már többször megállapított tényt szemlélteti, hogy a meredek elméleti lejtőszöggel rendelkező kúpok egyben relatíve nagy magassággal, és kis átmérővel, azaz nagy H_{co}/W_{co} hányadossal rendelkeznek, és ezt a kráterátmérő/kúpátmérő hányadosa kevésbé befolyásolja. A lejtőszög tulajdonképpen független a kráter méretétől, sokkal inkább a H_{co}/W_{co} -tól függ. A kráterméretet viszont kis mértékben befolyásolja a kúp magasság, ugyanis a pontokra $0,2303 R^2$ -tel illeszkedő hatványgörbe alapján, minél alacsonyabb egy kúp magassága, illetve nagyobb az átmérője, annál szélesebb a kráter átmérője. Megállapítható továbbá, hogy a kúp magasság a kráter szélesség közel negyedeként írható le ($H_{co} = 0,25 * W_{cr}$).



49. ábra: A SFVF zárt kráterrel rendelkező kúpjainak morfolometriai képe.

Az ábra szemlélteti, hogy a kúpmagasságtól a kráterátmérő kismértékben, a lejt szög viszont erősen függ, továbbá a kráterátmérő alig függ a lejt szögtől.

6. Konklúzió

Az utóbbi években közkinccsé vált SRTM nagy felbontású domborzati modell immár lehetővé teszi vulkáni formák morfolometriai elemzését, azokat is melyek kisebb méretük folytán a korábbi adatok elégtelen felbontása miatt az elemzések során általában kimaradtak, vagy igen sok időt be telt feldolgozásuk. A San Francisco vulkáni terület sok különböző méretű részben erodált formából áll, melyek részletes elemzése a dolgozat által történt meg. A nagyszámú vulkáni kúp paramétereinek meghatározásából, korcsoportonként elemzéséből a területről korábban készült tanulmányokhoz hasonló eredményeket kaptam. A holocén-kés pleisztocén (0-0,16 m.y.) salakkúpok ez alapján tehát zárt kráterrel, 200 méter magas, 25,7 fokos, igen meredek lejtű, 0,109 +/- 0,024 Hco/Wco aránnyal rendelkező kúpok. A közép pleisztocén (0,16-0,73 m.y.) korú társaiak 0,090 +/- 0,017 Hco/Wco aránnyal és 20,5 fokos lejtűvel rendelkeznek. Ez a csökkenés eleinte igen gyorsan megy végbe, majd egyre lassabb ütemben erodálnak a kúpok, míg végül csupán egy bucka, halom nem lesz belőlük, hiszen a pliocén (2,48-5,0) kúpok már csupán 0,061 +/- 0,015 Hco/Wco-val és 12,2 fokos meredekséggel rendelkeznek, melyhez csupán 87 méteres átlagos magasság társul. A morfolometriai elemzés során tehát

megállapítható, hogy a minden egyes paraméter (a kúpmagasság, a magasság/átmérő hányadosa, a lejtő szög, az átmérő) csökken a kúpok korával, de a legkevésbé, illetve a leglassabb ütemben mégis a kúpok szélessége változik.

A kiszámított értékek egymással való korrelációs kapcsolatából következtetni tudtam egyes morfológiai adatok egymásra hatására. Ezek alapján magától értetődőnek tűnt, hogy a kúpok területét, a kúpok keleti, nyugati, északi, déli teljes egészében meghatározza, hasonlóan a kráterek területét azok átmérője. Érdekes azonban, hogy a kúpterületet a kúpmagasság, azt pedig a kúpátmérő határozza meg. A kúpmagasság továbbá a lejtő szöggel is szoros kapcsolatot mutatott. A kráterátmérő és a kúpátmérő kapcsolata között azonban találtam jelentős összefüggést a lepusztulás tekintetében, csupán kis mértékben befolyásolják egymás alakulását, nem úgy a krátermélység a kúpterületet és a kúpátmérőt. A kráterek mélysége ezzel szemben a kráterek területét jelentős mértékben befolyásolja. Az általam kialakított alaktani csoportok kialakításánál, a korábbi tanulmányokban használt kategóriáktól eltérően nem vettem figyelembe a terület növényborítottságát, csupán a kúpok alakja, magassága, illetve kráterük léte határozta meg a létrehozott osztályokat. Ez a besorolás a többi paraméter összefüggésében vizsgálva nem hozta meg a várt eredményt, hiszen csupán a kúpmagassággal, valamint a lejtő szöggel volt érdemi kapcsolata, ellenben a korral egyáltalán nem korrelált. E morfológiai csoportok további problémája, hogy meglehetősen nagy felbontást kíván a helyes kiválasztáshoz, azonban, mint kiderült ehhez az SRTM részletessége sem volt elegendő. Ezzel tehát nyilvánvalóvá vált, hogy az alaktani csoport kialakítása több paraméter figyelembe vételével kell, hogy történjen, mely még további kutatásokat kíván.

A kúpok részletes kora, valamint a terület teljes földtani térképének ismeretében a SFVF területén található összes vulkáni forma vizsgálata, valamint a kúpok irányultsága, a magamaprodukción mértéke, térbeli eloszlása, valamint – feltételezések szerinti – fraktálszer jellege további részletes kutatómunkát igényelne.

Összességében a fentiekben alkalmazott digitális domborzatelemzési és morfológiai elemzések jó egybeesést mutatnak a San Francisco vulkáni terület korábbi kutatóinak eredményeivel, így igazán hasznosak lehetnek olyan kevésbé kutatott vulkáni területeken, ahonnan csak hiányos adatok állnak rendelkezésre.

7. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani Dr. habil Karátson Dávid PhD egyetemi docensnek a Természetföldrajzi Tanszék vezetőjének, valamint Dr. Székely Balázsnak, a Geofizika Tanszék tudományos főmunkatársának, hogy lehetővé tették a dolgozatom elkészítését, továbbá köszönöm a munkájukat és segítségüket.

8. Irodalom

AMOS, R.C., SEIF, S., and CROWE, B., 1981. Pyroclastic activity of Sunset Crater - evidence for a large magnitude, high dispersal Strombolian eruption: American Geophysical Union, EOS Transactions, vol. 62, no.45, p. 1085.

BEZY, V. J., 2003. A guide to the geology of the Flagstaff Area, Arizona Geological Survey Down-to-Earth 14, p. 21.

BORSY, Z. (sz.) 1998. Általános Természetföldrajz, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, p. 306-312.

BREED, W.J., 1964. Morphology and lineation of cinder cones in the San Francisco volcanic field. Museum of Northern Arizona Bulletin, No. 40, p. 65-71.

CHAMPION, D.E., 1980. Holocene geomagnetic secular variation in the western United States: Implications for global geomagnetic field: U.S. Geological Survey Open-File Report 80-824, p. 314.

COLTON, H.S., 1967. The basaltic cinder cones and lava flows of the San Francisco Mountain volcanic field: Museum of Northern Arizona Bulletin 10, p. 58.

COX, A.V., DOELL, R.R., and DALRYMPLE, G.B., 1964. Reveals of the Earth's magnetic field, Science, v. 144, p. 1537-1543.

DAVIS, G.H., 1978. Monocline fold pattern of the Colorado Plateau. In: V. Matthews, III, ed., Laramide folding associated with basement block faulting in the western United States: GSA, Memoir 151, p. 215-233.

DOHRENWEND, J.C., WELLS, S.G., TURRIN, B.D., 1986. Degradation of Quaternary cinder cones in the Cima volcanic field, Mojave Desert, California. Geol. Soc. Am. Bull. 97, p. 421-427.

DOOLITTLE, W.E., 1998. Innovation and diffusion of sand- and gravel- mulch agriculture in the American Southwest; a product of the eruption of Sunset Crater. In: Volcanoes and man. Raynal, J.P., ed., Quaternaire (Paris), vol.9, no.1, p. 61-69.

DUFFIELD, W.A., 1997. Volcanoes of Northern Arizona, Sleeping Giants of the Grand Canyon Region, Arizona: Grand Canyon Association, p. 68.

DUFFIELD, W.A., RIGGS, N.R., KAUFMANN, D., CHAMPION, D., FENTON, C., FORMAN, S., MCINTOSH, W., HEREFORD, R., PLESCIA, J. and ORT, M., 2006. Multiple constraints on the age of a late Pleistocene lava dam across the Little Colorado River at Grand Falls, Arizona: Geological Society of America Bulletin, v. 118, no. 3/4, p. 421-429.

FAVALLI, M., KARÁTSON D., MAZZARINI F., and PARESCHI M.T., 2007. Morphometry of scoria cones at Mt. Etna volcano, Italy, based on high -resolution LiDAR data. (benyújtva)

HODGES, C.A., 1962. Comparative study of S.P. and Sunset Craters and associated lava flows. Plateau, vol. 35, no.1, p. 15-35.

HOLM, R.F., 1986a. Field guide to the geology of the central San Francisco volcanic field, northern Arizona. In: Nations, J.D., Conway, C.M. és Swann, G.A., eds., Geology of central and northern Arizona, Geological Society of America, Rocky Mountain Section, Field Trip Guidebook, p. 27-41.

HOLM, R.F., 1986b. Geomorphic evidence for youngest dated fault in North-Central Arizona, The Mountain Geologist, vol. 24., no.1, p. 19-25.

HOLM, R.F., 1987. San Francisco Mountain: A Late Cenozoic composite volcano in Northern Arizona. In: Beuss, S.S. (ed.), Centennial Field Guide, Geol. Soc. Am. Rocky Mt. Sect. 2, p. 389-392.

HOLM, R.F., MOORE, R.B., 1987. Holocene scoria cone and lava flows at Sunset Crater, northern Arizona. In: Rocky Mountain section of the Geological Society of America. Beus, S.S., ed., Geol. Soc. Am., Boulder, CO, United States (USA) p. 393-397.

HOLM, R.F., 2004. Landslide preconditions and collapse of the San Francisco Mountain composite volcano, Arizona, into cold debris avalanches in Late Pleistocene. Journal of Geology, no.112, p. 335-348.

HOOOPER, D.M., and SHERIDAN M.F., 1998. Computer -simulation models of scoria cone degradation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 83: p. 241 -267.

INBAR, M., HUBP, J.L., RUIZ, L.V., 1994. The geomorphologica l evolution of the Paricutin cone and lava flows, Mexico, 1943 - 1990. *Geomorphology* 9, 57-76.

KEAR, D., 1957. Erosional stages of volcanic cones as indicators of age. *N.Z. Sci. Technol.*, 38B, p.671-6

LUEDKE, R.G., and SMITH, R.L., 1978. Map showing distri bution, composition, and age of late Cenozoic volcanic center in Arizona and New Mexico: U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigations Series Map I -0191-A.

MANKINEN, E.A., and DALRYMPLE, G.B., 1979. Revised geomagnetic polarity time scale for the interval 0-5 m.y. B.P., *Journal of Geophysical Research*, v. 84, p. 615 - 626.

MARTIN del POZZO, A.L., 1982. Monogenetic vulcanism in Sierra Chichin´autzin, Mexico. *Bull. Volcanol.* 45, 9 -24.

MCGETCHIN, T.R., SETTLE, M., and CHOUET, B.A., 1974. Cinder cone growth modeled after Northeast Crater, Mount Etna, Sicily. *J. Geophys. Res.* 79, p. 3257 -3272.

MORRE, R. B., WOLFE, E. W. and ULRICH, E. W., 1974. Geology of the Eastern and Northern Parts of the San Francisco Volcanic Field, Arizona, in *Geology of Northern Arizona*, edited by T. Karlstrom et al., Guidebook for GSA Rocky Mountain Section Meeting. p. 465-494.

MOORE, R.B. and WOLFE, E.W., 1976. Geologic map of the eastern San Francisco volcanic field, Arizona: USGS Miscellaneous Investigations Series Map I -953, scale 1:50,000.

OLLIER, C., 1988. *Volcanoes* - Basil Blackwell, Oxford, p. 228.

PIKE, R.J., 1978. Volcanoes on the inner planets: some preliminary comparisons of gross topography. *Proc 9th Lunar Planet Sci. Conf.*, p. 3239 -3273.

PORTER, S.C., 1972. Distribution, morphology, and size-frequency of cinder cones on Mauna Kea volcano, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin* 83, p. 3607-3612.

PRIEST, S.S., DUFFIELD, W.A., MALIS-CLARK, K., HENDLEY, J. and STAUFFER, P., 2001. The San Francisco Volcanic Field, Arizona, USGS Fact Sheet 017-01, Flagstaff, Arizona, p. 1-2.

RABUS, B., EINEDER, M., ROTH, A., BAMLER, R., 2003. The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *Photogrammetric Remote Sensing* 57, p. 241-262.

RAY, R.G., 1960. Aerial photographs in geologic interpretation and mapping. U.S. Geol. Surv., Prof. Paper 373, p. 230.

REYNOLDS, S.J., 1982. Geologic features of northeastern Arizona. Fieldnotes from the State of Arizona, Bureau of Geology and Mineral Technology, vol.12, no.1, p.1-8.

SCOTT, D.H., TRASK, N.J., 1971. Geology of the Lunar Crater volcanic field, Nye Country, Nevada. U.S. Geol. Surv., Prof. Paper, 599 -I.

SELLERS, W.D., HILL, R.H. (Eds.), 1974. Arizona Climate. The University of Arizona Press, Tucson, AZ, USA, p. 616.

SHOEMAKER, E.M., SQUIRES, R.L., és ABRAMS, M.J., 1978. Bright Angel and Mesa Butte fault systems of northern Arizona. In: Geological Society of America Memoir 152, p. 341-367.

SMILEY, T.L., 1958. The geology and dating of Sun set Crater, Flagstaff, AZ. Ninth Field conf., New Mexico Geol. Soc., field conf. guidebook, p. 186 -190.

TANAKA, K.L., SHOEMAKER, E.M., ULRICH, G.E. and WOLFE, E.W., 1986. Migration of volcanism in the San Francisco volcanic field, Arizona. In: Geological Society of America Bulletin, v.97, p. 129-141.

TÍMÁR G., TELBISZ T., SZÉKELY B., 2003. rtechnológia a digitális domborzati modellezésben: az SRTM adatbázis. *Geodézia és Kartográfia* 55 (12). p. 11-15.

WERNER, M., 2001. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Mission Overview. *Journal of Telecommunication (Frequenz)* 55: p. 75-79.

WINKLER, P., IVÁN GY., KAY S., SPRUYT P. és ZIELINSKI R., 2006. rfelvételekb l származtatott digitális felületmodell min ségének ellen rzése a magyarországi nagyfelbontású digitális domborzatmodell alapján, *Geodézia és Kartográfia*, MFTTT, 2006/2, 56. évf., p. 22-31.

WOLFE, E.W., ULRICH, G.E. and MOORE, R.B., 1983. San Francisco volcanic field, Arizona: *Volcano News*. No. 13, p. 1 -3.

WOLFE, E.W., ULRICH, G.E., HOLM, R.F., MOORE, R.B. and NEWHALL, C.G. 1987. Geologic map of the central part of the San Francisco Volcanic Field, North Central Arizona. USGS Misc. Field Studies Map, MF-1959, scale 1:50,000.

WOOD, C.A., BALDRIDGE, S. 1990. Volcano tectonics of the Western United States. In: Volcanoes of North America (ed: Wood, C.A., Kienle, J.) Cambridge University Press, p. 147-154.

WOOD, C.A., 1980a. Morphometric evolution of cinder cones. J. Volcanol. Geotherm. Res. 7, p. 387-413.

WOOD, C.A., 1980b. Morphometric analysis of cinder cone degradation. J. Volcanol. Geotherm. Res. 8, p. 137-160.

Internetes hivatkozások:

<http://southwest.library.arizona.edu/azso/index.html>

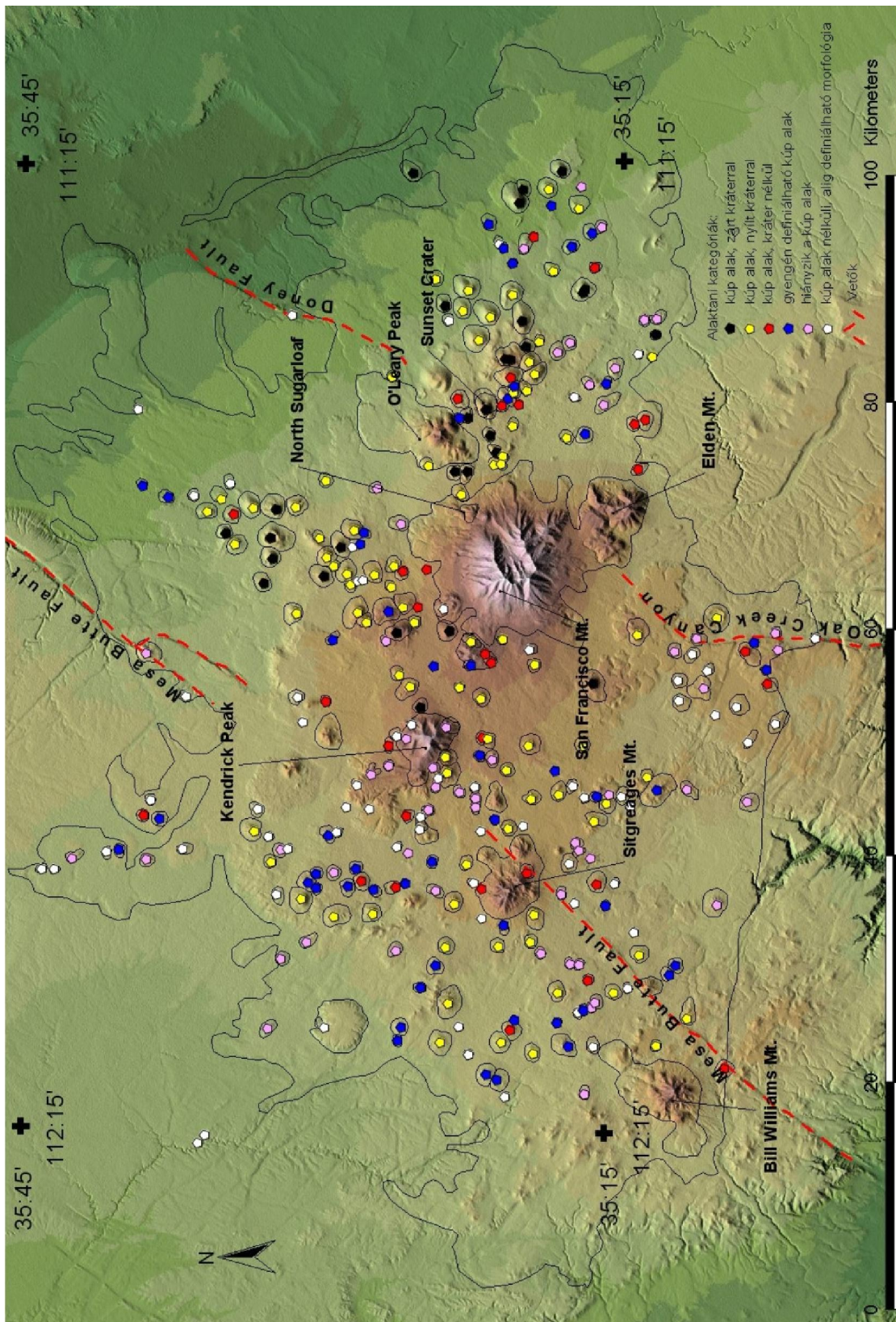
<http://www.canyondave.com/Layers.html>

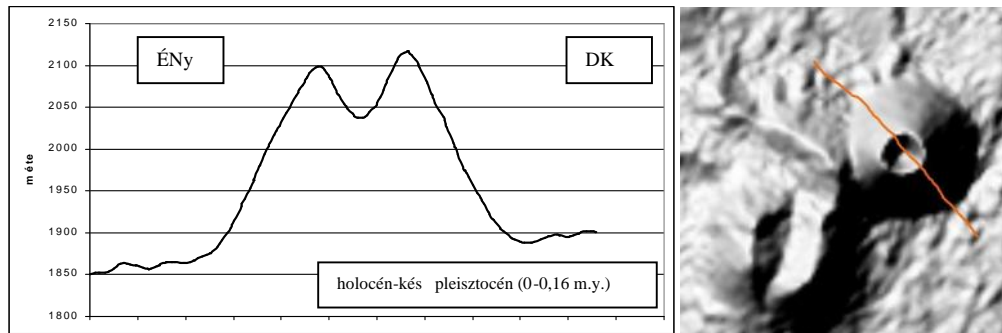
<http://www.wrcc.dri.edu/narratives/ARIZONA.htm>

http://www2.nature.nps.gov/geology/inventory/publications/reports/sucr_gre_rpt_print_body.pdf

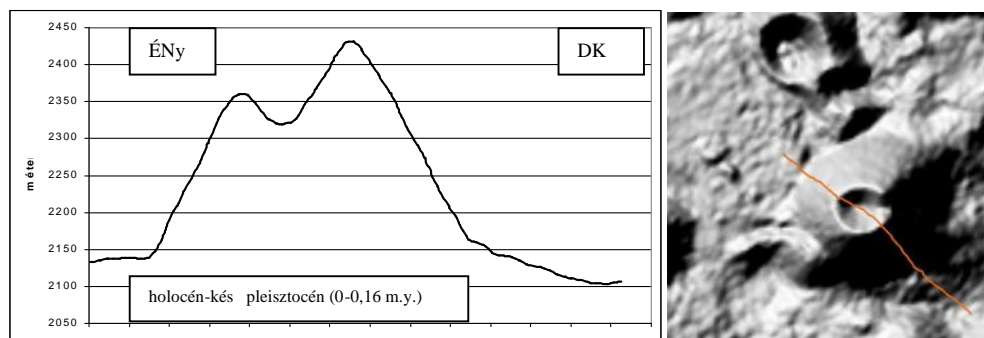
Melléklet

1. ábra: A San Francisco vulkáni terület salakkúpjainak alaktani kategóriái

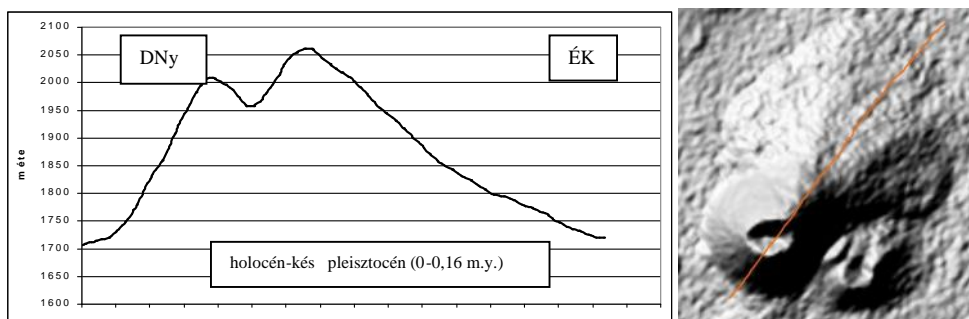




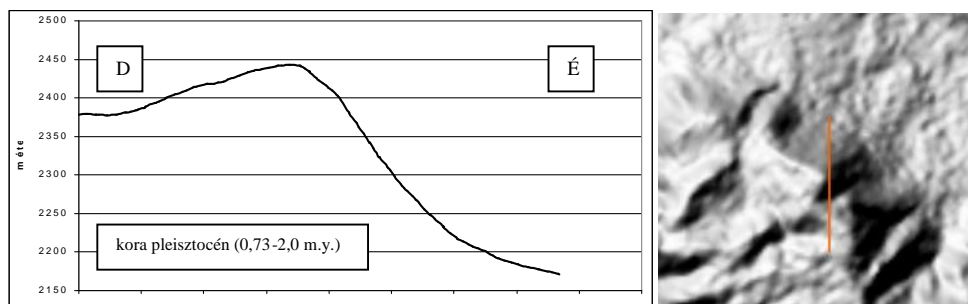
2. ábra: Az SP Crater északnyugat-délkelet irányú keresztmetszévényé



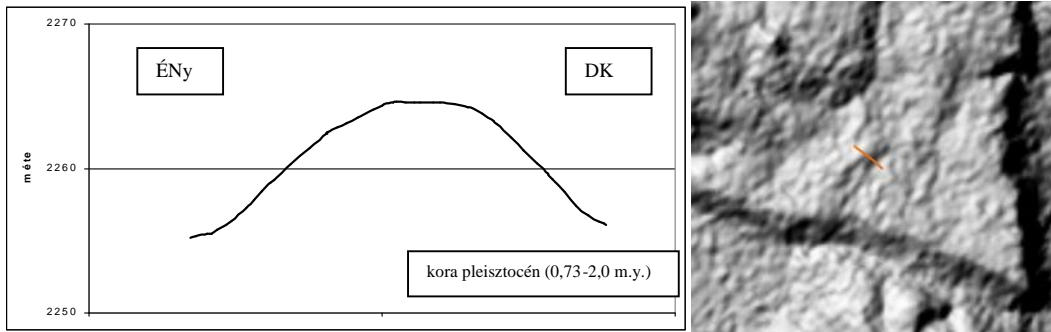
3. ábra: A Sunset Crater északnyugat-délkelet irányú keresztmetszévényé



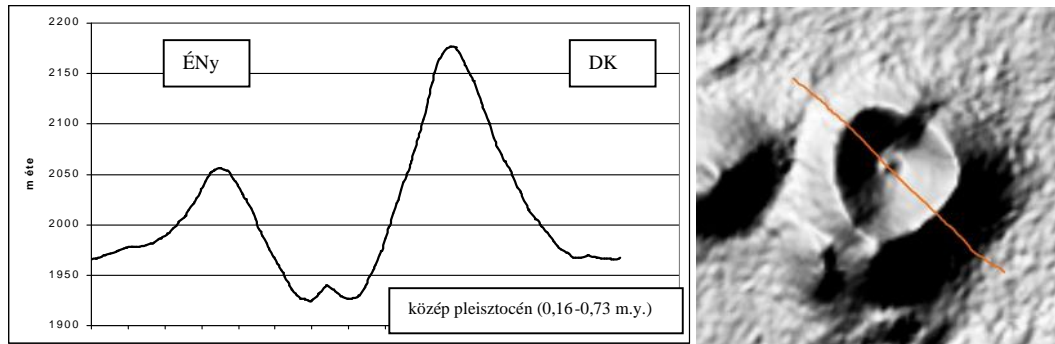
4. ábra: A Merriam Crater délnyugat-északkelet irányú keresztmetszévényé



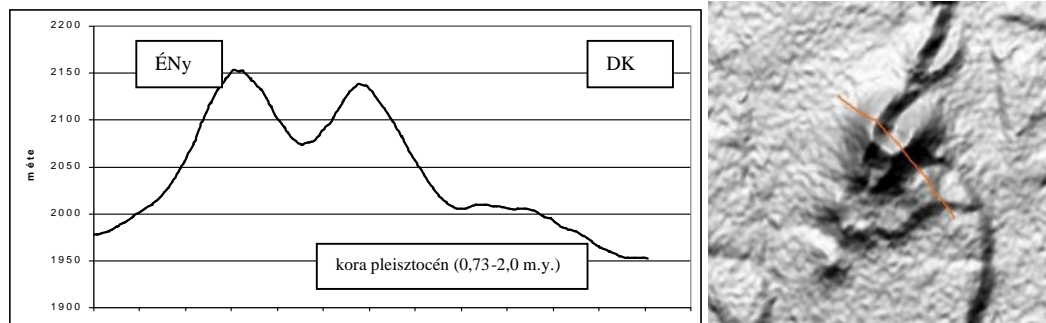
5. ábra: A BT132 jel , a legnagyobb átlagos lejt szöggel rendelkező kúp észak-dél irányú keresztmetszévényé



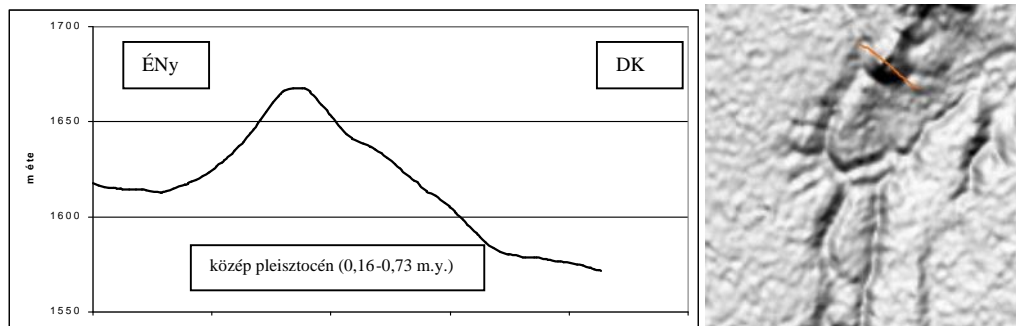
6. ábra: A legkisebb átlagos lejt szöggel rendelkező BT081 jel salakkúp északnyugat-délkelet irányú keresztmetszévé



7. ábra: A Crater 160 nevű salakkúp északnyugat-délkelet irányú keresztmetszévé



8. ábra: A BT212 jelű, töréssel kettévágott kúp északnyugat-délkelet irányú keresztmetszévé



9. ábra: A törésvonal mentén fekvő Doney kúp északnyugat-délkelet irányú keresztmetszévé